

МАШИНИ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ

УДК 631.371:620.92

СИРОВИННА БАЗА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

*С.М. Кухарець, кандидат технічних наук
Житомирський національний агроекологічний університет
Г.А. Голуб, доктор технічних наук
Національний університет біоресурсів і
природокористування України*

Встановлено основні техніко-технологічні параметри біогазового реактора і процесу виробництва біогазу. Запропоновано технологічні етапи отримання біогазу із застосуванням обертових метантенків. Визначено економічну ефективність виробництва електроенергії на основі біогазу.

Біомаса, метантенк, біогаз, перемішування, ефективність.

Постановка проблеми. Підвищення енергетичної ефективності біогазових установок є одним із головних напрямків покращення технологічного процесу виробництва біогазу, а тому обґрунтування методів визначення питомої потужності та енергетичних параметрів експлуатації біогазових установок потребує постійного удосконалення.

Експлуатація біогазових установок показала, що сприяння контакту анаеробних бактерій із біомасою субстрату забезпечується за рахунок перемішування субстрату, однак при цьому інтенсивного перемішування слід уникати, оскільки це може призвести до погіршення анаеробного зброджування за рахунок порушення симбіозу ацетогенних та метаногенних бактерій. На практиці компроміс досягається за рахунок повільного обертання мішалок або їх роботи упродовж короткого часу [1]. У той же час, досвід експлуатації реакторів біогазових установок показав, що практично неможливо усунути розшарування біомаси в реакторі на мінеральний осад та органічну плаваючу біомасу, що вказує на недоліки в роботі систем перемішування [2, 3].

Аналіз останніх досліджень. У результаті проведених наукових досліджень нами запатентовано ряд технічних рішень, які дозволяють у значній мірі усунути розшарування біомаси за рахунок забезпечення перемішування шарів біомаси із використанням

© С.М. Кухарець, Г.А. Голуб, 2015

занурених обертових біогазових реакторів. Визначено також рівень занурення обертового метантенка в рідину, а також коефіцієнт його заповнення в залежності від геометричних параметрів та густини рідини, в яку занурений обертовий метантенк при забезпеченні його знаходження у завислому стані [4].

Потужність, що витрачається на подолання моменту опору в підшипниках залежить від рівня органічної біомаси в метантенку, його ваги, а також характеристик біогазу та біомаси [5, 6]. Потужність, що витрачається на перемішування біомаси залежить від характеристик біомаси (густини, вмісту сухої речовини, розміру частинок сухої речовини) та конструкційно-кінематичних характеристик метантенка (кутова швидкість, внутрішній радіус, довжина, геометричні розміри та розміщення лопаток, мішалок й перегородок всередині метантенка).

Мета досліджень. Встановити основні техніко-технологічні параметри обертового біогазового реактора і процесу виробництва біогазу, а також визначити економічну ефективність виробництва електроенергії на основі біогазу.

Результати досліджень. Виробництво біогазу на основі обертових метантенків пропонується виконувати за технологічними етапами, що наведені на рис. 1.

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

$$B = B_P + B_T = k_{БГР} k_{BP} \sum_{i=1}^n S_i 100 Y_i (k_{Bi} - k_{3i}) + k_{БГТ} k_{BT} \sum_{j=1}^m N_j T_j (m_{Ej} + m_{Bj}) k_{Гj}, \quad (1)$$

де B – потенціал виробництва біогазу при зброджуванні рослинної біомаси та гноївки, м^3 ; B_P – вихід біогазу при зброджуванні рослинної біомаси, м^3 ; B_T – вихід біогазу при зброджуванні гноївки, м^3 ; $k_{БГР}$, $k_{БГТ}$ – питомий вихід біогазу при анаеробному зброджуванні відповідно рослинної біомаси та гноївки, $\text{м}^3/\text{кг}$; k_{BP} , k_{BT} – коефіцієнт використання відповідно рослинної біомаси та гноївки в біогазових установках, відн. од.; n – кількість культур в сівозміні, які використовуються для виробництва рослинної біомаси; S_i – площа вирощування i -ї культури, га; Y_i – урожайність i -ї культури, ц/га; k_{Bi} – коефіцієнт виходу біомаси i -ї культури, відн. од.; k_{3i} – коефіцієнт втрат біомаси i -ї культури під час збирання, відн. од.; m – кількість груп тварин та птиці; N_j – поголів'я тварин та птиці j -го виду, гол.; T_j – стійловий період поголів'я тварин та птиці j -го виду, діб; m_{Ej} – маса екскрементів j -го виду тварин та птиці, кг/гол. за добу; m_{Bj} – маса води, що надходить в екскременти j -го виду тварин та птиці, кг/гол. за добу; $k_{Гj}$ – коефіцієнт виходу гноївки придатної для рідкофазного зброджування, відн. од.

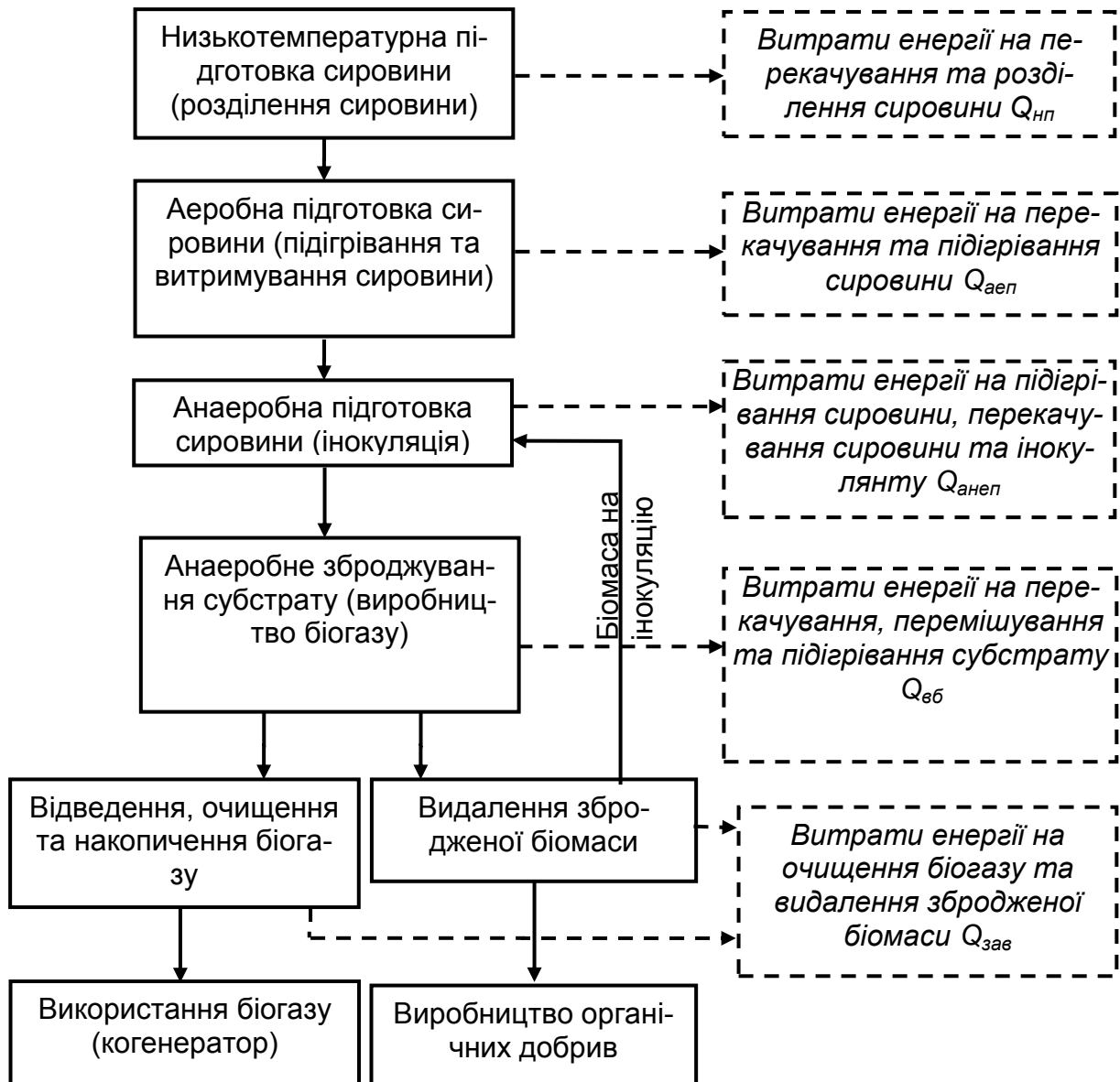


Рис. 1. Блок-схема технологічних етапів отримання біогазу.

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

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

Питомий вихід біогазу в розрахунку на один кілограм біомаси при анаеробному зброджуванні можна встановити на основі досліджень [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] та знаючи основні параметри субстратів (табл. 1).

1. Основні параметри субстрату (середні значення) та межі значень питомого виходу біогазу.

Основа субстрату	Щільність		Вміст сухої маси, $k_{см}$	Розмір частинок твердої фракції $r_{ср}$, м	Динамічна в'язкість η_B , Па с	Питомий вихід біогазу, м ³ /кг	
	біомаси ρ_B , кг/м ³	сухої біомаси $\rho_{срB}$, кг/м ³				мін	макс
Гній ВРХ	1028	1140	0,20	0,01	0,03	0,0314	0,0570
Гній свинячий	1046	1200	0,23	0,01	0,05	0,0405	0,0900
Пташиний послід	1006	1020	0,32	0,01	0,02	0,0473	0,1152
Кукурудзяні залишки (силос)	1027	1100	0,27	0,03	0,03	0,0765	0,2328
Цукровий буряк	1069	1300	0,23	0,05	0,06	0,1656	0,1879
Кормовий буряк	1036	1300	0,12	0,05	0,04	0,0465	0,0867
Бурякова гичка	1024	1150	0,16	0,03	0,03	0,0578	0,0768
Зелені трави (силос)	1038	1100	0,38	0,02	0,04	0,0963	0,2356
Зернова барда	1004	1050	0,07	0,01	0,01	0,0214	0,0493
Картопляна барда	1004	1050	0,07	0,01	0,01	0,0204	0,0466
Плодова барда	1001	1030	0,03	0,01	0,01	0,0054	0,0185
Пресований жом	1048	1200	0,24	0,02	0,05	0,0495	0,0865
Меляса	1043	1050	0,85	0,01	0,05	0,2448	0,3969

На основі значень питомого виходу біогазу та біометану можна визначити щільність отриманого біогазу для широкого спектру біосировини (табл. 2).

Виходячи із основних параметрів субстрату та біогазу приведених в табл. 1 і табл. 2 [11] та відповідних розрахунків [4, 6] можна встановити параметри обертового метантенка, що забезпечують мінімізацію енерговитрат на перемішування біомаси та необхідну продуктивність за біогазом.

2. Розрахункові значення щільності біогазу.

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

При рекомендованих параметрах біомаси, біогазу та обраних конструкційних параметрах біогазового обортового реактора [11], можна оцінити вплив коефіцієнта заповнення на витрати енергії та визначити його оптимальне значення.

Встановлено параметри біогазового обортового реактора (табл. 3) при оптимальному коефіцієнті заповнення, що забезпечують його плавання [5, 6].

Використання параметрів наведених в табл. 3. дозволяє проектувати обортові біогазові обортові реактори із мінімальними питомими енерговитратами на перемішування біомаси.

У результаті проведеного аналізу можна стверджувати, що заповнений на величину від 94 до 95 % обортовий реактор з об'ємом завантаження біомаси V_B від 3 до 103 м³ (робочий діаметр D лежить в діапазоні від 1 до 4,3 м) потребує мінімальної потужності для приводу N_{KP} від 299 Вт до 10,4 кВт при його зануренні у рідину на вели-

чину від 95 до 97 %. При цьому питома потужність приводного механізму в розрахунку на об'єм біомаси в реакторі лежатиме в межах від 99,85 до 101,23 Вт/м³.

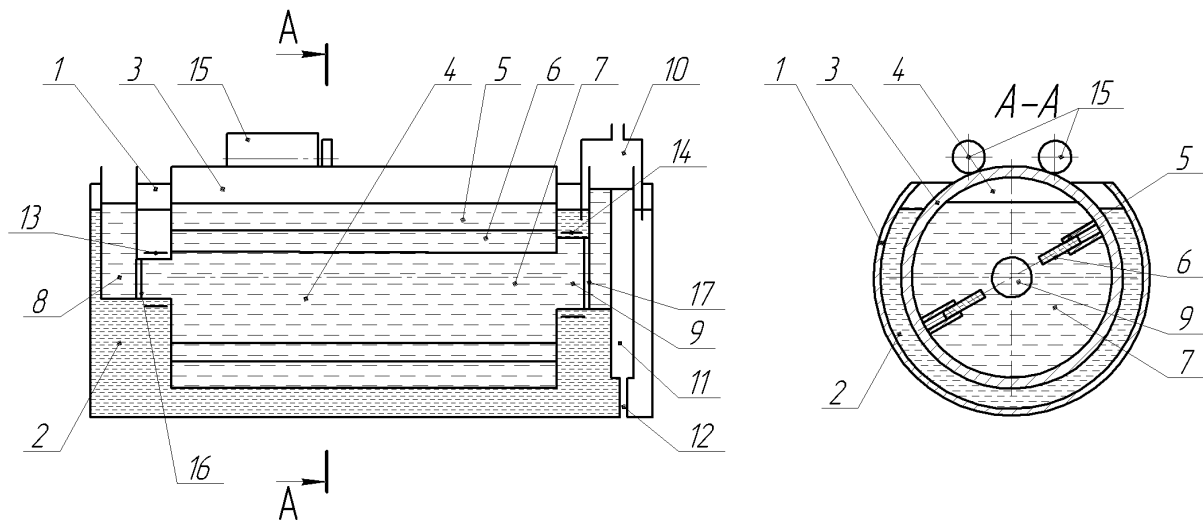


Рис. 2. Схема біогазового обертового реактора, модульного типу: 1 – горизонтальний зовнішній корпус; 2 – рідина; 3 – циліндричний реактор; 4 – камера зброджування; 5 – перегородка; 6 – рухомі пластини; 7 – органічна маса; 8, 9, 12 – патрубки; 11 – вивантажувальна камера; 13, 14 – підшипникові вузли; 15 – зовнішній привод; 16, 17 – блок-ущільнення.

3. Раціональні конструкційні параметри біогазових обертових реакторів.

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

Враховуючи, що на підігрівання субстрату можна отримати енергію прямого спалювання біомаси рослинництва, а для перемішування та перекачування субстрату використати частку електрое-

нергії виробленої в результаті використання біогазу, виробнича собівартість біометану становитиме:

$$C_{БМ} = \frac{\rho_{ПБ}}{k_{БМ} \tau_{ЗБ}} C_{БМ} (1 - k_{Д}) + (1 + k_{ЗВ} + k_{ЗГ})(ТОР_{БМ} + ЕЛ_{БМ} + ЗП_{БМ}), \quad (2)$$

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

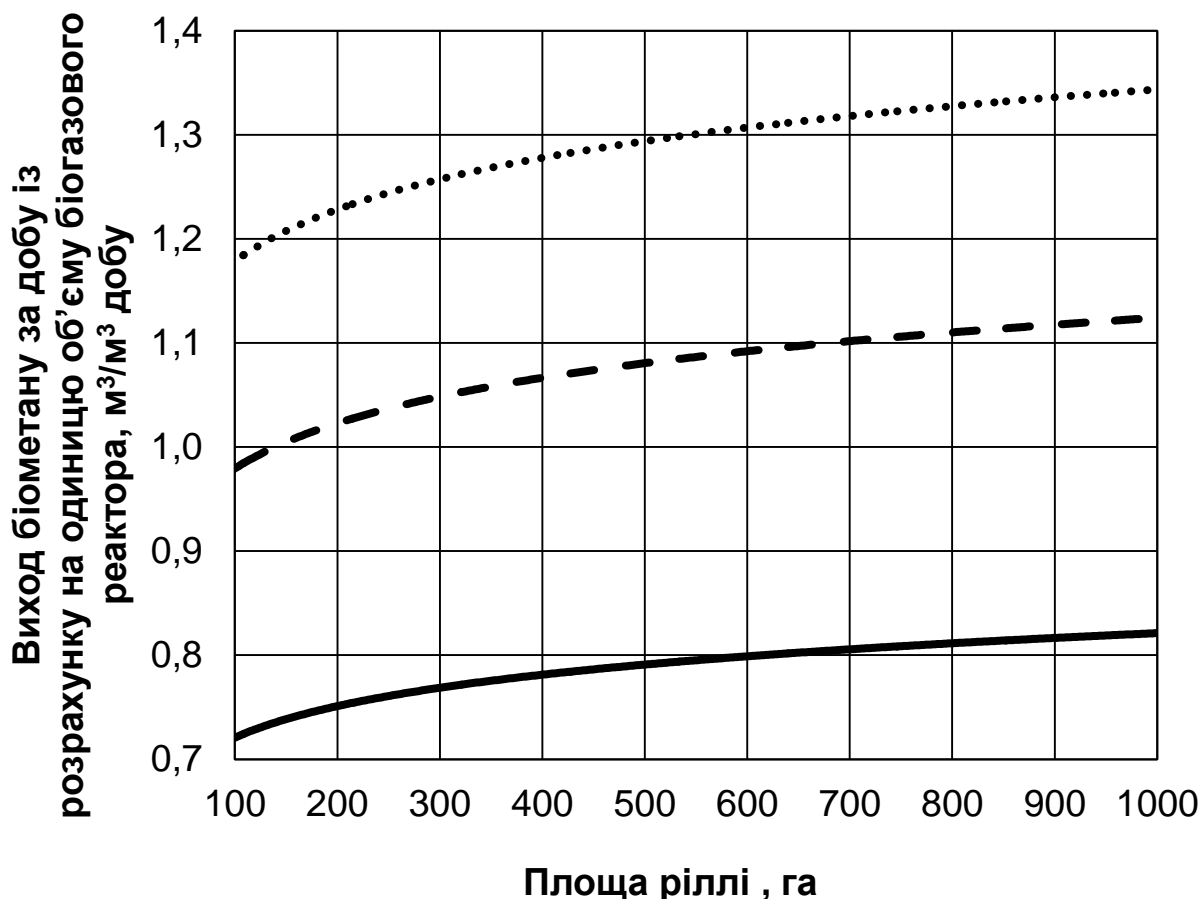
Собівартість виробництва електроенергії на основі біометану можна визначити на основі виразу:

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

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

Як видно із приведених виразів, вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора (рис. 3) є величиною, яка визначає техніко-економічні показники біогазових установок. Розрахунки показали, що із збільшенням площі ріллі питомий вихід біогазу дещо зростає, що пояснюється збільшенням ефективності використання біогазових установок із збільшенням об'єму метантенків.

Собівартість виробництва електроенергії із біометану з прив'язкою до площі із шестипільною сівозміною приведена на рис. 4.



- зерно-молочна спеціалізація
- - зерно-свинарська спеціалізація
- зерно-птахівнича спеціалізація

Рис. 3. Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора в залежності від площі ріллі модельних господарств.

Таким чином, із збільшення площі ріллі понад 1000 га собівартість виробництва електроенергії на основі біогазу стабілізується на рівні від 0,30 до 0,44 грн/кВт год.

Висновок. Вихід біометану за добу із розрахунку на одиницю об'єму біогазового реактора для підприємств із зерно-молочною спеціалізацією становить від $0,72 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу до $0,81 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу, а собівартість виробленої на його основі електроенергії із використанням біогазових реакторів обертового типу становить від 0,44 грн/кВт год. до 0,85 грн/кВт год., для підприємств із зерно-свинарською спеціалізацією відповідно від $0,98 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу до $1,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу та від 0,38 грн/кВт год. до 0,85 грн/кВт год. та для підприємств із зерно-птахівничою спеціалізацією – від $1,18 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу до $1,34 \text{ м}^3/\text{м}^3$ добу та від 0,30 грн/кВт год. до 0,72 грн/кВт год. Причому менші значення виходу біометану та вищі значення собівартос-

ті електроенергії будуть мати місце при площі ріллі 100 га, а відносно більші значення виходу біометану та менші значення собівартості електроенергії – при площі ріллі 1000 га.

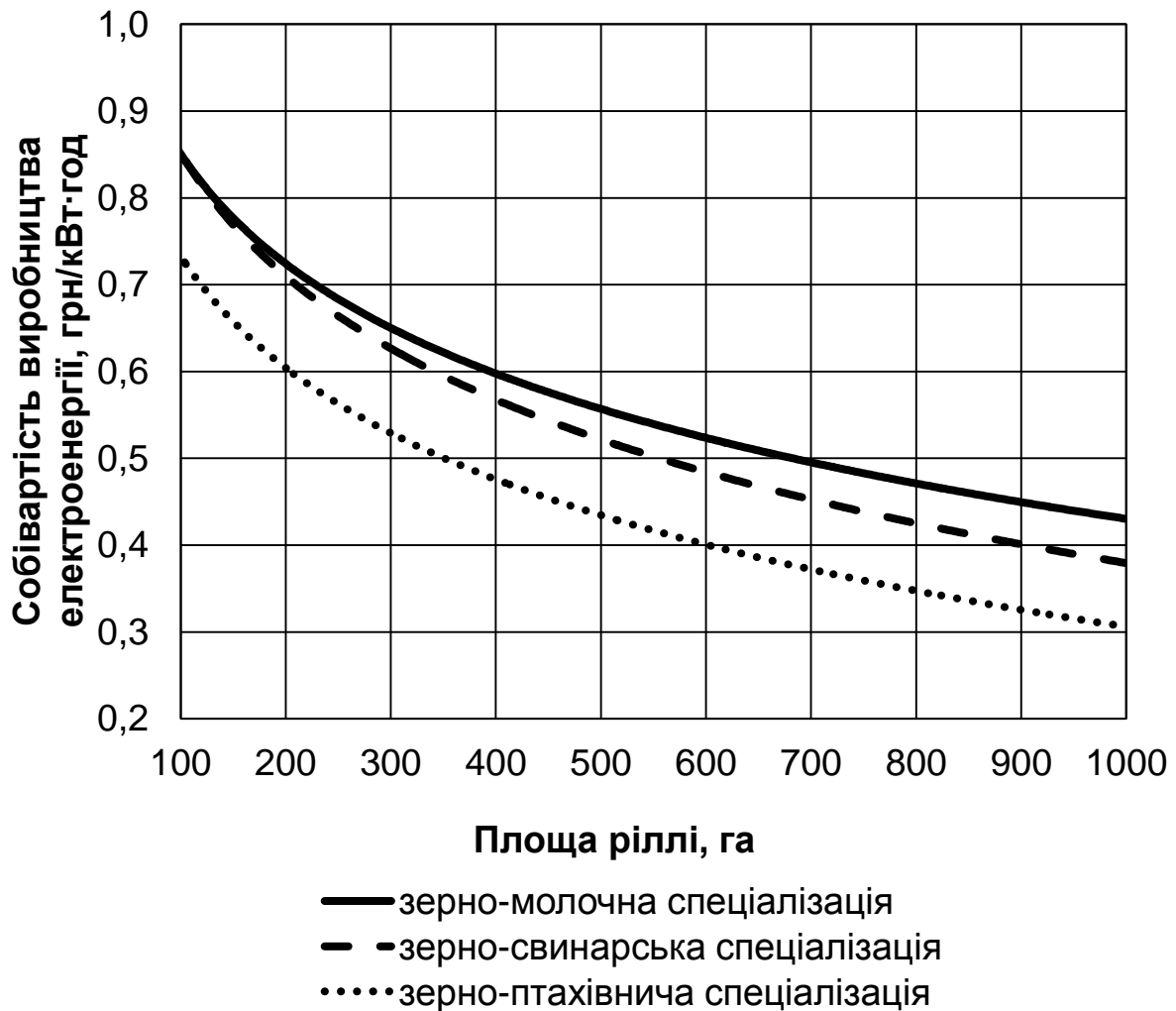


Рис. 4. Зміна собівартості електроенергії виробленої із біометану в залежності від площі ріллі модельних господарств.

Список літератури

1. *Руководство по биогазу. От получения до использования / Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). 5-е издание. – Гюльцов: Германия, 2012. – 213 с.*
2. *Голуб Г.А. Технічне забезпечення виробництва біогазу / Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна, Б.О. Рубан, В.О. Войтенко // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки. – Вінниця, 2012. – Вип. 10. – С. 17–19.*
3. *Голуб Г. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Г. Голуб, В. Войтенко, Б. Рубан, В. Єрмоленко // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2 (29). – С. 18–21.*
4. *Голуб Г.А. Обґрунтування рівня занурення та коефіцієнта заповнення біома-сою обертового метантенка / Г.А. Голуб, О.В. Дубровіна // Науковий вісник Наці-*

онального університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2012. – Вип. 170, ч. 2. – С. 55–61.

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

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

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

8. *Мовсесов Г.Є.* Основні положення технології біогазового (анаеробного метанового) зброджування органічних відходів / *Г.Є. Мовсесов, О.О. Ляшенко* // Рекомендації Інститут механізації тваринництва НААН України. – Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2010. – 29 с.

9. *О. Наске.* Biogas von A bis Z. / *О. Наске, М. Хельм* // Borsig Energy GmbH, 2001. – 47 р.

10. *Биогаз* на основе возобновляемого сырья. Сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии / [*Геммеке Бурга, Крисста Ригер, Войланд Петер и др.*]. – Гюльцов: FNR, 2010. – 118 с.

11. *Handreichung.* Biogasgewinnung und – nutzung. / [*Amon Tomas, fon Bredov Hartvig, Doeler Helmut ets.*]. – Gulzow: FNR, 2010. – 234 р.

12. *Tasneem Abbasi.* Biogas Energy / *T Abbasi, S. Tauseet, S. Abbasi.* - New York: Springer, 2012. – 169 р.

13. *Баадер В.* Биогаз: теория и практика / *В. Баадер, Е. Доне, С. Бренндерфер* ; пер. с нем. и предисловие *М.И. Серебряного.* – М.: Колос, 1982. – 148 с.

Установлены основные технико-технологические параметры биогазового реактора и процесса производства биогаза. Предложены технологические этапы получения биогаза с применением вращающихся метантенков. Определена экономическая эффективность производства электроэнергии на основе биогаза.

Биомасса, метантенк, биогаз, перемешивание, эффективность.

Was established the basic technical and technological parameters of biogas reactor and process of biogas production and proposed technological stages of biogas digesters using rotating methane tanks and determined the economic efficiency of electricity generation with biogas.

Biomass, methane tanks, biogas, mixing, efficiency.