

УДК 628.336.6; 628.35; 62-62

Кучерук П.П.¹, Матвеев Ю.Б.¹, Ходаківська Т.В.¹, Грабовський М.Б.²

¹Інститут технічної теплофізики НАН України

²Білоцерківський Національний аграрний університет

ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ З СУМІШЕЙ ГНОЙОВИХ ВІДХОДІВ ТВАРИННИЦТВА ТА РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В УКРАЇНІ

Наведено результати експериментальних досліджень ефективності та потенціалу виробництва біогазу з гнойових відходів та вітчизняних гібридів кукурудзи.

Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности и потенциала производства биогаза из навозных отходов и отечественных гибридов кукурузы.

Results of a study on both efficiency and potential yield of biogas when digesting manure with domestic maize varieties are shown.

Ключові слова: біогаз, гнойові відходи, тваринництво, рослинна сировина, експериментальні дослідження, силос кукурудзи.

ВРХ – велика рогата худоба;

ЄС – Європейський Союз;

СК – силос кукурудзи;

СР – суха речовина;

СОР – суха органічна речовина;

т у.п. – тонна умовного палива.

Індекси нижні:

ел. – електричний;

ін. – інокулят.

В умовах дефіциту власних викопних палив та фактично монопольної залежності від поставок природного газу з Російської Федерації Україна потребує інтенсивного розвитку виробництва місцевих видів палив, зокрема з відновлюваної сировини. Значний потенціал аграрного виробництва в Україні дає обґрунтовані підстави вважати цей сектор таким, що, окрім власне традиційного виробництва, здатен зробити суттєвий внесок в енергозабезпечення країни. Так технічно досяжний потенціал виробництва енергії лише з відходів та побічної продукції аграрного виробництва складає близько 31 млн. т у.п. [1] або 29,4 % від сумарного кінцевого споживання енергії в Україні станом на 2010 р., що становило 105,5 млн. т у.п. [2]. Для порівняння, загальне споживання енергії у сільському господарстві складало в 2010 р. 2,54 млн. т у.п. Разом з відходами аграрного виробництва слід врахувати також можливість вирощування рослинної сировини для енергетичних потреб, в першу чергу на вільній від посівів ріллі, загальна площа якої в 2011 р. склала 3,6 млн. га [3].

Одним з традиційних секторів відновлюваної енергетики у світі, та в ЄС зокрема, є виробництво

та енергетичне використання біогазу. В 2011 р. в ЄС-25 було вироблено біогазу з потенціалом первинної енергії 14,4 млн. т у.п., з якого загальною вироблено 35,9 ТВт·год електричної енергії [4]. З цього об'єму частка біогазу, виробленого на біогазових станціях, що спеціально розроблені під енергетичні цілі, склала 56,7 %. Основною сировиною для виробництва такого біогазу є органічні відходи та продукція сільського господарства. Решта – біогаз з полігонів ТПВ (31,3 %) та біогаз каналізаційних очисних споруд (12 %).

Німеччина традиційно займає провідну позицію серед країн ЄС як у загальному обсязі виробництва біогазу (50,2 %), так і серед енергетичних біогазових станцій (77,2 %). В 2011 р. тут нараховувалось 7215 біогазових станцій загальною встановленою електричною потужністю 2904 МВт_{ел.}. Найвагоміша частка біогазу в Німеччині виробляється з енергетичних видів рослин – 46,2 %, під які використовується 850 тис. га ріллі [5] (рис. 1).

Таким чином, не менше 1/3 всього біогазу, що виробляється енергетичними біогазовими станціями в ЄС, припадає на біогаз з енергетич-

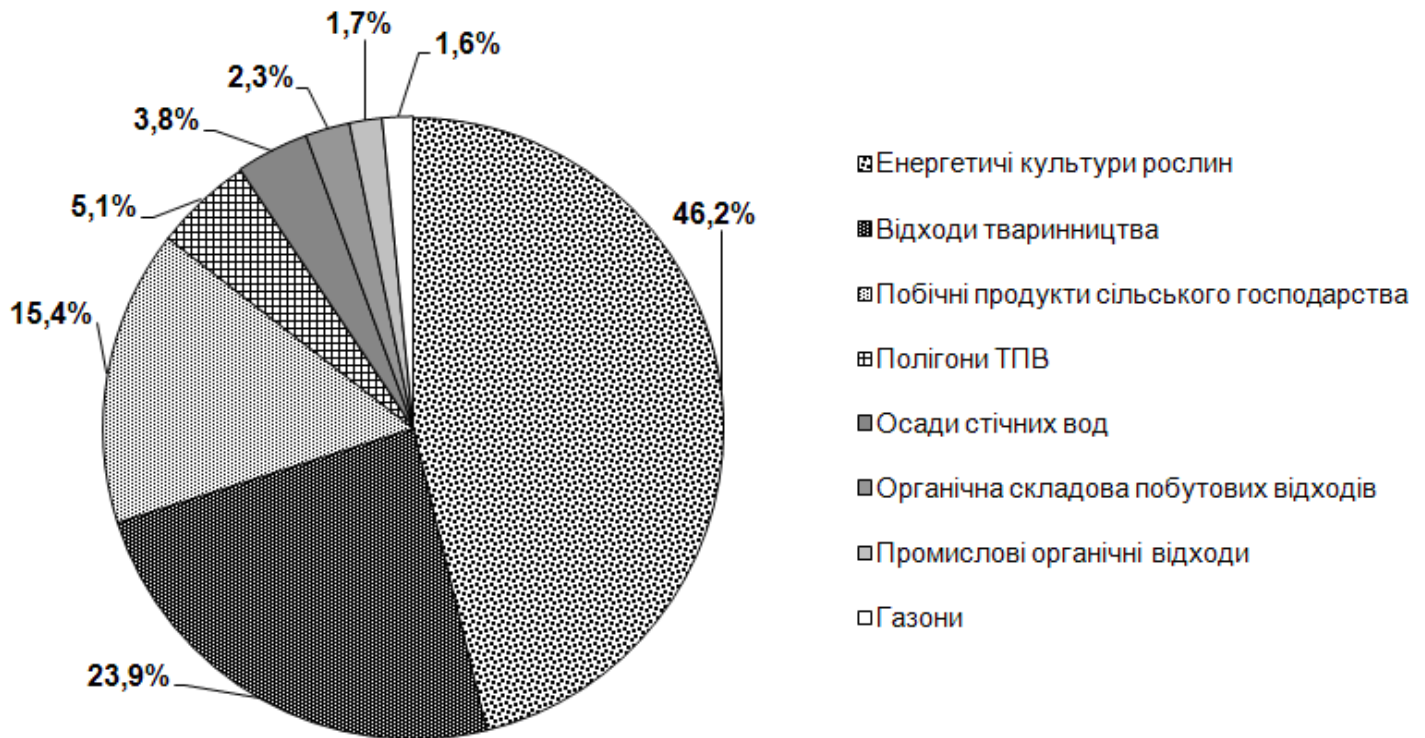


Рис. 1. Вклад окремих груп відходів і сировини в виробництво біогазу в Німеччині.

них видів рослин, серед яких найбільш поширеною є кукурудза на силос (СК). Такий субстрат використовується в 97 % з всіх біогазових станцій в Німеччині, а його частка в сумішах з іншими видами сировини сягає 99 % [6]. При цьому в 62 % випадків частка СК в сумішах складає 40 % і більше. Таке поширення СК для виробництва біогазу стало можливим завдяки таким основним чинникам: кукурудза має один з найвищих потенціалів виробництва енергії (нетто) на 1 га ріллі серед інших видів енергетичних рослин; сприятливі кліматичні умови, невибагливість до ґрунтів та різноманіття гібридів кукурудзи дозволяють вирощувати кукурудзу на широкому ареалі в країнах ЄС; законодавчо закріплений механізм стимулювання через дію «зеленого» тарифу на електроенергію з відновлюваної сировини робить виробництво біогазу з силосу кукурудзи економічно виправданим.

В Україні кукурудза є традиційною зерновою культурою і вирощується практично в кожній області. Практичного використання гібридів кукурудзи, спеціально вирощених як енерге-

тичні культури для виробництва біогазу, наразі нема. Натомість, вирощування енергетичної кукурудзи на усіх площах вільної ріллі в Україні могло б забезпечити виробництво значного об'єму біогазу, за різними оцінками від 8 [7] до 18 млрд. м³ СН₄ [8].

Ідея використання силосу кукурудзи для виробництва біогазу виникла в результаті пошуку альтернативних видів органічної сировини, що здатна значно розширити загальний потенціал виробництва біогазу, а також збільшувати питомий вихід біогазу з одиниці об'єму біореакторів при використанні базової сировини – гнойових відходів тваринницьких підприємств. Встановлено, що збільшення масової частки сухої органічної речовини (COP) силосу кукурудзи у суміші з гноєм ВРХ до 70 % в діапазоні органічного навантаження анаеробного біореактора проточного типу 4,45...7,78 гCOP/л/добу призводить до збільшення питомого виходу метану в 2,1 рази [9].

Не зважаючи на значний розвиток досліджень процесів сумісного зброджування гнойових відходів з рослинними ко-субстратами, в т.ч. із СК,

закордонними дослідниками, в Україні до цього часу нема достатньої бази наукових результатів для обґрунтованого вибору технологічних регламентів роботи біореакторів. Не вивчені основні закономірності розпаду органічної речовини в сумішах гнойових відходів з СК, не встановлені оптимальні співвідношення вмісту органіки в таких сумішах та вплив температури процесу на інтенсивність утворення метану, відсутні відомості про кінетичні константи швидкості анаеробного розпаду органіки в таких сумішах.

Дослідження [10] показали, що на потенціал виходу метану з СК впливають ряд факторів, серед яких основними є гібрид та тривалість його вегетаційного періоду. Встановлено, що зі збільшенням тривалості вегетації питомий вихід метану на одиницю маси СОР силосу кукурудзи помітно падає при збільшенні тривалості вегетації з 97 днів до 151. При цьому вихід метану з 1 т свіжого силосу зростає у 1,9...2,5 рази. Дослідження показали також, що зброджування суміші зерна кукурудзи з початками, лише зерна або лише стебел без зерна та початків веде до зниження виходу метану на 43...70 % у порівнянні зі зброджуванням усієї наземної частини рослини. Максимальний вихід метану з пізньостиглих гібридів кукурудзи склав 7100...9000 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$ [11]. Аналогічний показник для сортів кукурудзи раннього та середнього дозрівання складає 5300...8500 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$.

В роботі авторів вперше була поставлена задача широкого експериментального дослідження процесів сумісного анаеробного зброджування гнойових відходів з СК вітчизняних гібридів. Дослідження з вітчизняними гібридами, як біоенергетичними рослинами, в Україні не проводились. Мета даної роботи полягає у встановленні оптимальних співвідношень масової частки сухої органічної речовини СК в суміші з гнойовими відходами свиней та ВРХ. За критерій оптимальності приймався питомий вихід метану з одиниці об'єму біореактора за одиницю часу. Оптимальні за складом суміші гною свиней з СК досліджувались на предмет впливу температури протікання процесу та на предмет токсичності субстрату по відношенню до інокуляту. Програма експериментальних досліджень включала 5 тестів, а саме:

1. Тест на ефективність додавання СК до гною свиней в пропорції за СОР 0...100 %;
2. Тест на ефективність додавання СК до гною ВРХ в пропорції за СОР 0...100 %;
3. Тест на потенціал виходу біогазу для оптимальної суміші гною свиней з місцевими гібридами кукурудзи;
4. Тест на вплив температури процесу для оптимальної суміші гною свиней з СК в діапазоні 34...40 °С;
5. Тест на токсичність для оптимальної суміші гною свиней з СК в діапазоні органічних навантажень 0,5...7,0 гСОР/гСОР інокуляту.

Процес анаеробного зброджування проводився в непроточних біореакторах періодичної дії. Базовими субстратами в експерименті були гній свиней (відібрано з очисних споруд свиногокомплексу в с. Калита, Київської обл.) та СК 8 вітчизняних гібридів, що вирощувались на дослідному полі Білоцерківського Національного аграрного університету (табл. 1). Характеристики використаних субстратів та інокуляту наведено в табл. 2. З базових субстратів компонувались модельні суміші з різним співвідношенням СОР гною, СК та інокуляту.

Після подрібнення стебел кукурудзи в подрібнювачі AL-KO типу New TEC 2400 R було утворено модельний силос з лінійними розмірами часток в діапазоні 0,2...37,9 мм та середньою вагою 2,4...15,0 мг.

Вимірювання об'єму біогазу здійснювалось щодобово візуально за показами рухомої частини евідометра. Об'єм утвореного біогазу приведено стандартним методом до нормальних умов (273 К; 101,325 кПа) для сухого газу. Вміст метану, двоокису вуглецю та сірководню в біогазі вимірювався за допомогою цифрових газоаналізаторів GEM-500 та Dräger X-am 7000. Для визначення вмісту сухої речовини та сухої органічної речовини використано стандартні методики (вміст вологи та сухого залишку за ГОСТ 26713-86, вміст золи за ГОСТ 26714-86).

Результати досліджень показали, що збільшення частки СОР СК в суміші з гном свиней призводить до збільшення інтенсивності виходу біогазу з одиниці робочого об'єму біореактора – до 25% у порівнянні з моно-зброджуванням гною. Натомість, моно-зброджування

Таблиця 1. Використані в експерименті гібриди кукурудзи, що були вирощені на різних фонах добрив та їх урожайність, 2011 р.

Гібриди кукурудзи	Група стиглості кукурудзи	Код зразку	Удобрення	Фаза стиглості	Урожайність, т/га
Венілія	ФАО 220	E0	Без добрив	Воскова	53,1
		E80	$N_{80}P_{60}K_{60}$		61,7
Бистриця 400 МВ	ФАО 400	D50 (0)	Без добрив	Молочна	51,9
		D50 (3)	$N_{100}P_{80}K_{80}$		63,4
Моніка 350 МВ	ФАО 350	C50 (0)	Без добрив	Молочно-воскова	61,3
		C50 (3)	$N_{100}P_{80}K_{80}$		68,5
Любава 279 МВ	ФАО 270	B50 (0)	Без добрив	Воскова	49,7
		B50 (3)	$N_{100}P_{80}K_{80}$		57,8

Таблиця 2. Вміст СР та СОР в модельних субстратах та інокуляті

Субстрат	Вміст сухих речовин (СР), %	Вміст СОР, % від СР
Інокулят	2,8...3,3	72,1...77,5
Гній свиней	7,5...9,0	89,2...89,5
Гній ВРХ	4,1...4,5	83,8...84,2
Силос кукурудзи	18,7...33,7	92,0...95,7

СК призводить до падіння пікового значення виходу метану та середньої інтенсивності утворення біогазу [12]. Додавання СК до гною ВРХ більш суттєво інтенсифікує процес утворення біогазу – фактично в 5-кратному розмірі у порівнянні з моно-зброджуванням гною (рис. 2).

Оптимальною за динамікою розпаду СОР визначено суміш гною свиней та СК зі співвідношенням СОР гною до СОР СК рівним 1:3. Дослідження ефективності зброджування місцевих гібридів кукурудзи показали, що внесення добрив не суттєво позначається на динаміці розпаду СОР. Вихід метану для різних гібридів кукурудзи склав діапазон значень 238,1...341,6 $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{т СОР}$.

Збільшення органічного навантаження вище 5 $\text{гСОР}/\text{гСОР}_{\text{ин}}$ призводить до помітного пригнічення виділення метану, а при значенні 7 $\text{гСОР}/\text{гСОР}_{\text{ин}}$ призводить до закисання та затухання процесу взагалі. При зміні температури процесу на кожні 2 °С в діапазоні 34...40 °С відносний приріст ступеня розпаду СОР тестових сумішей збільшувався відповідно на 7,9 %, 6,4 %, 4,0 %.

Потенціал виробництва метану з досліджених варіацій гібридів кукурудзи на 1 га землі складає 3,5...6,3 тис. $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$, і залежить як від виду гібриду так і від кількості внесених мінеральних добрив. При цьому внесення добрив в більшості випадків підвищує такий потенціал (рис. 3). Дані інших авторів [10] показують діапазон цього значення для іноземних енергетичних гібридів кукурудзи 2,9...9,3 тис. $\text{nm}^3\text{CH}_4/\text{га}$, що дозволяє вважати вітчизняні гібриди прийнятними для ефективного виробництва біогазу.

Практичне застосування результатів досліджень авторів є доцільним на тваринницьких комплексах, де утворюються гнойові стоки з досить низьким вмістом СР (< 7 %). Типово це свинокомплекси, де додаткова вода потрапляє в систему видалення гною з підпільних ям. Моно-зброджування такого гною прийнято вважати недоцільним з точки зору

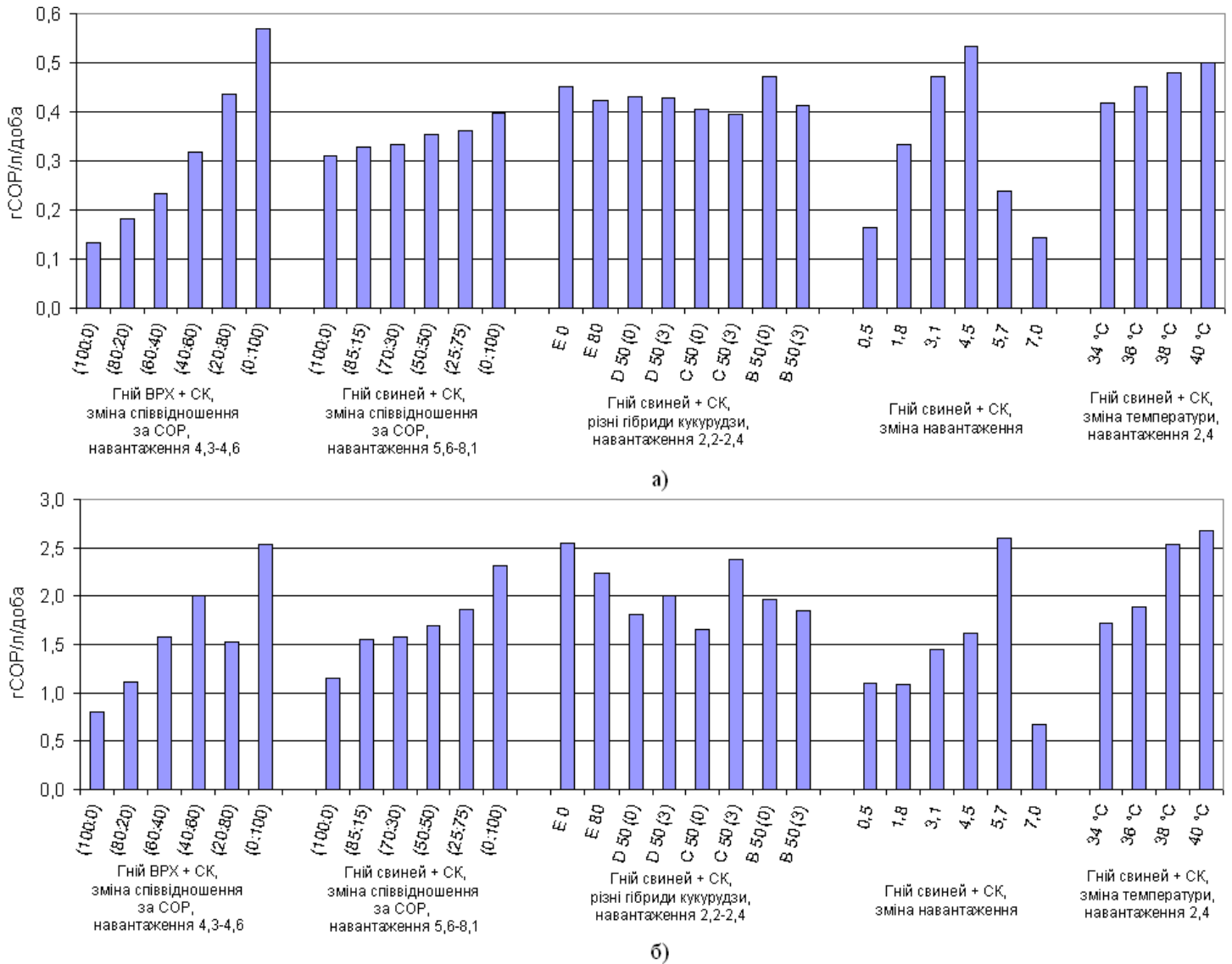


Рис. 2. Зведені результати серії експериментальних досліджень:
а) середні значення швидкості розпаду COP в тестових сумішах;
б) максимальні значення швидкості розпаду COP в тестових сумішах.

виробництва енергії через низький питомий вихід біогазу з одиниці робочого об'єму біореактора.

Додавання кукурудзи дозволяє як збільшити питомий вихід біогазу так і інтенсифікувати розпад органіки. В табл. 3 наведено результати оцінки потенціалу впровадження технології сумісного зброджування гною свиней з СК в пропорції COP 1:3 на свинокомплексах в Україні (згідно даних Держкомстату за 2010 р.). При цьому, сумарно встановлена електрична потужність ТЕЦ/ТЕС на біогазі складе 160 МВт_{ел.}

Проекти енергетичних біогазових станцій на

основі гнойових відходів тваринництва та силосу кукурудзи можуть бути рентабельними за умови продажу виробленої електричної енергії за «зеленим» тарифом 16,16 євроцентів/кВт·год (коефіцієнт ЗТ рівний 3,0) [13].

Висновки

1. Сумісне зброджування силосу кукурудзи з гнойовими відходами є більш ефективним з точки зору інтенсивності метанотворення у порівнянні з моно-зброджуванням гною;
2. Найбільш інтенсивно розпад органічної ре-

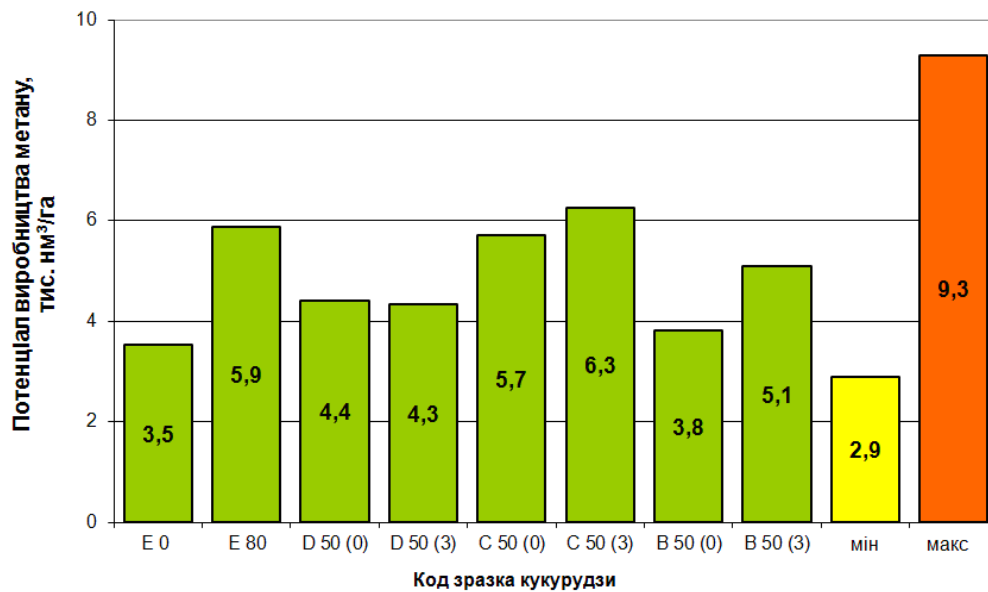


Рис. 3. Потенціал виробництва метану при вирощуванні місцевих гібридів кукурудзи на 1 га землі.

Таблиця 3. Потенціал впровадження технології сумісного збродження силосу кукурудзи з гноєм свиней на свинокомплексах в Україні

Група підприємств	Кількість підприємств групи	Середнє поголів'я тварин на підприємствах групи, гол	Встановлена потужність КГУ при моно збродженні, кВт _{ел}	Встановлена потужність КГУ при сумісному збродженні, кВт _{ел}
1	98	2401	33	173
2	93	3 799	53	274
3	15	5 420	75	392
4	89	16 985	237	1227
Всього	295	28 605	30 МВт _{ел}	160 МВт _{ел}

човини відбувається при співвідношенні СОР гною та силосу кукурудзи в суміші рівним 1:3;

3. Вихід метану з вітчизняних гібридів кукурудзи складає 238,1...341,6 нм³СН₄/т СОР або 3,5...6,3 тис. нм³СН₄/га, і залежить як від гібриду, так і від фактору внесення добрив;

4. Широке застосування запропонованої технології на свинокомплексах в Україні дозволить розширити потенціал виробництва енергії біогазу в 5-кратному розмірі у порівнянні з моно-збродженням гною;

5. Запропонована технологія може бути рентабельна за умови продажу виробленої з біогазу електричної енергії за «зеленим» тарифом на рівні 16,16 євроцентів/кВт·год.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Жовмір М.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Ч. 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз // Пром. теплотех-

ника, 2011, т. 33, № 1. – С. 57-64.

2. *Енергетичний баланс України* за 2010 р. Експрес-випуск Державної служби статистики України від 03.02.2012 р.

3. *Сільське господарство України*. Статистичний збірник за 2011 р. За ред. Н.С. Власенко. Державна служба статистики України, 2012. – 386 с.

4. *Biogas barometer – EUROBSERV'ER // Systèmes solaires le journal des énergies renouvelables* 212 – December, 2012. – p. 66-79.

5. *German society for sustainable biogas and bioenergy utilization (GERBIO)*. European Biogas Policy and Regulatory Assessment in Germany and Europe // IBK Biogas Operators Course, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany. – September 18-21, 2012.

6. *Biogas-Messprogramm II*. 61 Biogasanlagen im Vergleich. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) // Gulsow, 2009. – 168 p.

7. *Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В.* Перспективи виробництва біогазу в Україні // Відновлювана енергетика. – 2011, №3 (26) – С. 73-77.

8. *Шульц Р., Кооп Ю, Фултон Дж., Персонн Х.* Виробництво і використання біогазу в Україні. – Рада з питань біогазу з.т. / Biogasrat e.V., Травень 2012. –74 с. http://ua-energy.org/upload/files/Biogas_

ukr.pdf

9. *Comino E., Rosso M., Riggio V.* Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix (2010). *Biore-source Technology* 101, p. 3013–3019.

10. *Amon T., Amon B., Kryvoruchko, Zollitsch W., Mayer K., Gruber L.* Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield // *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (2007), p. 173-182.

11. *Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Zollitsch W., Pötsch E.* Biogas production from maize and clover grass estimated with the methane energy value system (з інтернет ресурсу: www.nas.boku.ac.at). – p. 175-178.

12. *Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Гелетуха Г.Г., Морозова Є.В., Перерва Є.С.* Дослідження ефективності сумісного зброджування гною свиней та силосу кукурудзи // *Зб. наук. праць ІМТ НААН «Механізація, екологізація та конвертація біосировини в тваринництві»*, 2011, вип. 2(8). – С. 45-53.

13. *Гелетуха Г.Г., Матвеев Ю.Б., Кучерук П.П., Ходаковская Т.В., Гелетуха А.И.* Анализ необходимости применения в Украине «зеленого» тарифа на электроэнергию, вырабатываемую из биогаза // *Пром. теплотехника*, 2012, Т.34, №4. – С. 67-74.

Получено 27.12.2012 г.