

УДК 628.336.6;62-62;633.62;633.15

ПОТЕНЦІАЛ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ІЗ СИЛОСНОЇ МАСИ СОРГО ЦУКРОВОГО ТА КУКУРУДЗИ

Грабовський М.Б. – к.с.-г.н., доцент,
Білоцерківський національний аграрний університет

Наведено результати вивчення розрахункового виходу біогазу із силосної маси сорго цукрового, кукурудзи та їх сумішей. Показники вмісту азоту, фосфору і вуглецю були вищими на 0,27–0,29%, 0,04–0,12% і 1,21–1,27%, а калію менші на 0,17–0,23% у кукурудзи порівняно з сорго цукровим. За вмістом цих елементів суміш кукурудзи і сорго цукрового займає проміжне місце між вказаними культурами. За рахунок вищого вмісту сухої речовини питомий вихід біогазу з одиниці внесеної силосної маси кукурудзи був вищим на 33,7–50,6% порівняно з сорго цукровим та на 9,2–13,0% з сумішшю цих культур. При розрахунку виходу біогазу з одиниці площі найвищі показники (9,1–10,2 тис. м³/га) отримані з суміші силосної маси сорго цукрового та кукурудзи.

Ключові слова: сорго цукрове, кукурудза, біогаз, метан, силосна маса, суміш.

Грабовский Н.Б. Потенциал производства биогаза из силосной массы сорго сахарного и кукурузы

Приведены результаты изучения расчётного выход биогаза из силосной массы сорго сахарного, кукурузы и их смесей. Показатели содержания азота, фосфора и углерода были выше на 0,27–0,29%, 0,04–0,12% и 1,21–1,27%, а калия меньше на 0,17–0,23% в кукурузы по сравнению с сорго сахарным. По содержанию этих элементов смесь кукурузы и сорго сахарного занимает промежуточное место между этими культурами. За счёт высокого содержания сухого вещества удельный выход биогаза с единицы внесённой силосной массы кукурузы был выше на 33,7–50,6% по сравнению с сорго сахарным и на 9,2–13,0% со смесью. При расчёте выхода биогаза с единицы площади высокие показатели (9,1–10,2 тыс. м³/га) получены из смеси силосной массы сорго сахарного и кукурузы.

Ключевые слова: сорго сахарное, кукуруза, биогаз, метан, силосная масса, смесь.

Grabovskiy M.B. Potential for biogas production from sweet sorghum and corn silage

The article presents the results of calculation of biogas output from silage mass of sweet sorghum, corn and their mixtures. The content of nitrogen, phosphorus and carbon was higher by 0.27–0.29%, 0.04–0.12% and 1.21–1.27%, while potassium content was lower by 0.17–0.23% in corn, compared with sweet sorghum. By the content of these elements, a mixture of corn and sweet sorghum occupies an intermediate position between these crops. Due to the higher content of dry matter, the specific biogas output per unit of the applied silage mass of corn was higher by 33.7–50.6% in comparison with sweet sorghum and by 9.2–13.0% compared to the mixture of these crops. When calculating the output of biogas from one hectare, the highest values (9.1–10.2 thousand m³/ha) were obtained from a mixture of silage masses of sweet sorghum and corn.

Key words: sweet sorghum, corn, biogas, methane, silage mass, mixture.

Постановка проблеми. В Європейських країнах частка використання рослинної сировини для виробництва біогазу становить 75,9%, з них 59,6% займає силос кукурудзи [1]. Крім силосу кукурудзи, використовують також силос цукрового сорго, цукрові буряки, конюшину, свічграс, трітїкале та ряд інших [2].

Частка силосу кукурудзи в суміші з іншими ко-субстратами в біогазових установках може складати 2–99% [3]. При цьому, найбільшого поширення (25%) мають біогазові установки, де частка силосу кукурудзи в суміші складає 40–60%. У більшості випадків силос кукурудзи використовується разом з ще 1–5 видами субстратів, найчастіше рослинних. Використання гною як моно- субстрату для виробництва біогазу в більшості випадків з економічної точки зору є недоцільним та потребує додавання рослинних субстратів [4].

Найбільший вихід метану можливо отримати при зброджуванні в біогазових установках усієї рослини кукурудзи. 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 рослини [5].

Цукрове сорго має біомасу композиційно подібну біомасі кукурудзи, але відзначається більш високим рівнем продуктивності [6]. Врожайність зеленої маси сорго в середньому становить 60–80 т / га і може досягати 100 т / га з вмістом близько 22% сухої речовини [7]. З 1 тонни силосу сорго можна отримати близько 110 м³ біогазу з вмістом метану 54%.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Компонентний склад органічної речовини та здатність її до біологічного розпаду є ключовими факторами, що визначають потенціал виходу метану з силосу кукурудзи [8]. У свою чергу компонентний склад органічної речовини кукурудзи залежить від ряду факторів: місця вирощування, кліматичних умов, гібриду кукурудзи, тривалості вегетаційного періоду, технології вирощування, способу силосування кукурудзи [5].

Згідно досліджень, проведених у європейських наукових установах, вміст сухої речовини у різних гібридів кукурудзи змінюється в межах від 25,1 до 37,0%, вміст сухої органічної речовини становить 95,0–96,5% від сухої речовини, летких жирних кислот – 2,0–4,7 г × кг, співвідношення С:N – 8,8–33,2 [2]. Збільшення тривалості вегетаційного періоду кукурудзи з 97 до 151 днів призводить до зростання співвідношення С:N з 24,2–37,0 до 45,1–52,1. При цьому питомий вихід СН₄ знижується з 313–366 до 268–287 лн.СН₄ × кг СОР⁻¹ (сухої органічної речовини), але сумарний вихід метану з 1 т. силосу збільшується у 1,9–2,5 рази [5].

На думку Р. Weiland та інших [9], кукурудза – це більш однорідний матеріал, ферментація якого у біогазовій установці становить 90%, а різних видів трав лише 50%. Дослідженнями І. Lewandowski [10] встановлено, що правильно проведена ферментація 1 кг сухої маси може забезпечити отримання близько 0,4 м³ біогазу з теплотворною здатністю 16,8–23,0 МДж, а після відділення СО₂ його теплотворна здатність зростає до 35,7 МДж. За даними Н. Oechsner і А. Lemmer [11], з 1 тони біомаси трав можливо отримати 100 м³ біогазу, а з 1 тонни кукурудзи, зібраної у фазу воскової стиглості, 180 м³.

Для виробництва біогазу з енергетичних культур кукурудза як сировина має найбільше значення. Кукурудза як С4-рослина має найвищий врожайний потенціал. Вирощування і зберігання силосної кукурудзи технічно розвинене і широко оптимізоване [12]. Як субстрат для виробництва біогазу вирощують спеціальні енергетичні гібриди кукурудзи з урожайністю сухої маси 9–30 т / га [13]. Це орієнтовно становить 5 300–9 000 м³ / га метану залежно від гібриду кукурудзи, кліматичних умов вирощування та фази збирання [14].

Широке використання кукурудзи як монокультури для виробництва біогазу негативно впливає на навколишнє середовище з точки зору втрати біорізноманіття, зменшення виробництва продуктів харчування і кормів, збільшення інтенсивності розвитку шкідливих організмів та використання елементів живлення [15]. Як альтернатива кукурудзі були запропоновані інші культури для виробництва біогазу, такі як соняшник, міскантус, просо, коноплі, сорго і суданська трава [2–4, 6, 7–9].

В умовах Фінляндії найбільший вихід метану був отриманий у кукурудзи (4 000–9 200 м³ / га), а на другому місці була волошка лугова (2 700–6 100 м³ / га). Питомий вихід метану з традиційних і нових енергетичних культур варіювалися від 170 до л × кг⁻¹ СОР. Найвищі питомі виходи метану були отримані у кукурудзи, тоді як нові енергетичні культури мали менші показники. Згідно з цими

дослідженнями грятися збірна, костриця лучна і тимофіївка лучна підходять для виробництва біогазу без істотної різниці між ними за питомим виходом метану та виходом метану з 1 гектару [16].

У країнах Європейського союзу запроваджено Закон про поновлювані джерела енергії (EEG 2012), згідно якого масова частка кукурудзи в субстраті для біогазових установок не повинна перевищувати 60%. Як альтернативу кукурудзі країни Західної Європи розглядають цукрові буряки.

В посушливих умовах Півдня України перспективною культурою для виробництва біогазу є цукрове сорго. Вчені підраховали, що у разі вирощування сорго на площі 500 тис. га за врожайності культури на рівні 100 ц / га, можна отримати близько 4,4 млрд. м³ метану. [17]. Цукрове сорго забезпечує вихід біогазу на рівні 17,6 тис. м³ / га, кукурудза – 16,0 тис. м³ / га, цукрові буряки – 10,9 тис. м³ / га, кормові буряки – 10,8 тис. м³ / га.

Метою досліджень було розрахувати вихід біогазу із силосної маси сорго цукрового, кукурудзи та їх сумішей.

Матеріали та методика досліджень. Польові досліді проводили в 2012–2013 Р. в умовах дослідного поля Білоцерківського національного аграрного університету, яке розміщене в Центральному Лісостепу України.

У досліді висівали гібриди кукурудзи Моніка 350 МВ і Бистриця 400 МВ та сорт сорго цукрового Силосне 42 і гібрид Довіста в одновидових та сумісних посівах.

Попередник у досліді – соя. Повторність у досліді – 4-разова. Площа ділянки 39,2 м², облікової – 19,6 м², розміщення ділянок послідовне, методом систематичної рендомізації. Агротехніка в досліді відповідала загальноприйнятій для центрального Лісостепу України. Методичною основою експериментальних досліджень були «Методика проведення дослідів з кормовиробництва» [18], «Основи наукових досліджень в агрономії» [19].

Визначення якісних показників силосної маси сорго цукрового і кукурудзи та їх сумішей проводили в лабораторії стаціонарних агрохімічних досліджень Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН. Визначали вміст сухої речовини, азоту, фосфору, калію та вуглецю за методикою [20] та згідно стандарту ДСТУ ISO 6497:2005 [21]

На основі якісних показників зеленої маси сорго цукрового і кукурудзи розраховано вихід біогазу та метану за методами, запропонованими Т. Атон та іншими [5] та А.М. Buswell, Н.Ф. Mueller [22]. У розрахунках прийнято, що вихід метану становить 58% від отриманого біогазу.

Результати досліджень. У фазі воскової стиглості зерна, вміст азоту в рослинах сорго цукрового становив 1,09–1,14%, фосфору – 0,32–0,39%, калію – 1,11–1,16% та вуглецю – 38,06–38,59%. У гібридів кукурудзи показники азоту, фосфору і вуглецю були вищими на 0,27–0,29%, 0,04–0,12% і 1,21–1,27%, а калію меншими на 0,17–0,23%. За вмістом цих елементів суміш кукурудзи і сорго цукрового займає проміжне положення між вказаними культурами (табл. 1).

За даними німецьких дослідників у гібридів кукурудзи, які збиралися у фазу воскової стиглості зерна, з вмістом сухої речовини 30–42% середній вихід метану був 0,40 м³ / кг субстрату. Гібриди DK 604 і Doge, які були зібрані у фазу молочно-воскової стиглості, при вмісті сухої речовини 22,2 і 19,8% забезпечували на 6,5 і 16% нижчий вихід метану [23].

Зі збільшенням групи стиглості гібридів кукурудзи відмічено зменшення питомого виходу метану. Зі збільшенням вмісту сухої речовини більше 22% вихід метану становить приблизно 370 лн.×кг⁻¹ СОР. При вмісті сухої речовини більше

35% питомий вихід метану знижується. Оптимальний питомий вихід метану спостерігався за вмісту сухої речовини від 30 до 35% [12].

Таблиця 1

Вміст сухої речовини, азоту, фосфору, калію і вуглецю в силосній масі кукурудзи і сорго цукрового у фазу воскової стиглості зерна, (середнє за 2012–2013 Р.), %

Сорт, гібрид	Суха речовина	Вміст			
		N	P	K	C
Силосне 42	22,3	1,09	0,32	1,11	38,06
Довіста	23,4	1,14	0,39	1,14	38,59
Моніка 350 МВ	30,7	1,38	0,44	0,88	39,33
Бистриця 400 МВ	32,2	1,41	0,43	0,97	39,80
Силосне 42 + Моніка 350 МВ	25,3	1,21	0,36	0,93	37,87
Силосне 42 + Бистриця 400 МВ	26,0	1,23	0,37	1,01	37,81
Довіста + Моніка 350 МВ	25,9	1,28	0,37	0,96	38,01
Довіста + Бистриця 400 МВ	26,6	1,29	0,36	1,03	37,96

За даними латвійських вчених [24], урожайність сухої маси кукурудзи змінюється від 12 до 16 т / га. Вихід біогазу з досліджуваних зразків становить 476–570 л × кг⁻¹ СОР. Середній вміст метану був в межах 49,6–59,3%.

У наших дослідженнях мінімальні значення розрахункового питомого виходу біогазу та метану на основі вмісту елементів у силосній масі зафіксовано у сорту сорго цукрового Силосне 42 – 103,1 і 59,8 л × кг⁻¹. Максимальними ці показники були у гібриду кукурудзи Бистриця 400 МВ – 155,3 і 90,0 л × кг⁻¹ (рис. 1).

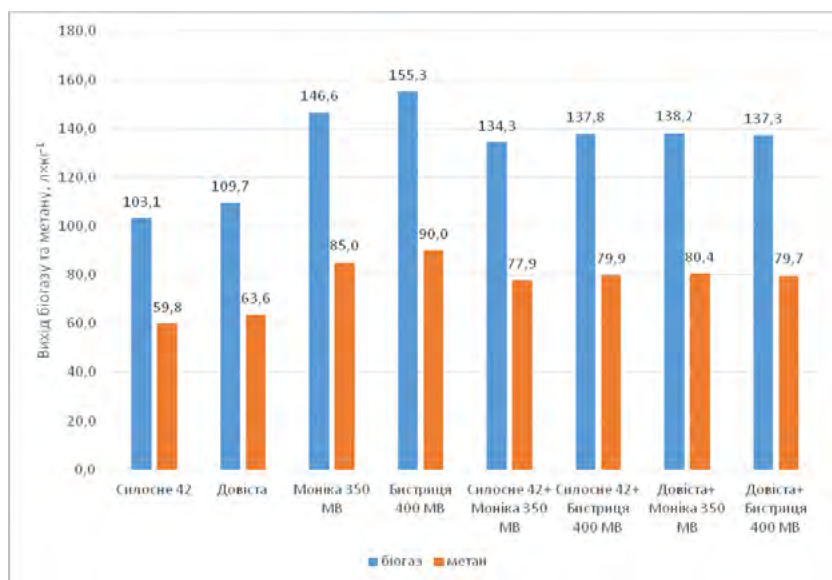


Рис. 1. Розрахунковий питомий вихід біогазу та метану на основі вмісту сухої речовини, азоту, фосфору, калію і вуглецю в силосній масі кукурудзи і сорго цукрового та їх сумішей, л × кг⁻¹

При сумісному вирощуванні цих культур найкращим виявився варіант Довіста + Моніка 350 МВ. Розрахунковий питомий вихід біогазу та метану з суміші силосної маси кукурудзи і сорго цукрового становив 138,2 і 80,4 л/кг. За рахунок вищого вмісту сухої речовини та азоту, фосфору, калію і вуглецю в зеленій масі кукурудзи показники розрахункового виходу біогазу і метану були вищими на 4,1–11,2% порівняно з її сумішшю із сорго цукровим.

За врожайністю зеленої маси сорго цукрове на 34,9–64,5% перевищує кукурудзу. Так, у середньому за роки досліджень у сорго цукрового в одновидовому посіві урожайність зеленої маси становила у сорту Силосне 42 – 68,1 т / га, у гібриду Довіста – 76,7 т / га, а у гібридів кукурудзи Моніка 350 МВ і Бистриця 400 МВ – 47,2 і 50,5 т / га (табл. 2).

Таблиця 2

**Урожайність зеленої маси кукурудзи і сорго цукрового
в одновидових та сумісних посівах, т / га**

Сорт, гібрид	2012 р.	2013 р.	Середнє
Силосне 42	64,3	71,8	68,1
Довіста	73,1	80,2	76,7
Моніка 350 МВ	40,8	53,6	47,2
Бистриця 400 МВ	43,1	57,8	50,5
Силосне 42+ Моніка 350 МВ	68,5	80,7	74,6
Силосне 42+ Бистриця 400 МВ	69,3	83,6	76,5
Довіста + Моніка 350 МВ	72,4	86,6	79,5
Довіста + Бистриця 400 МВ	73,6	89,5	81,6
НІР _{0,5}	1,8	2,5	

За сумісної сівби цих культур урожайність зеленої маси була на 6,4–9,3% і 51,4–68,4% вищою порівняно з одновидовою сівбою сорго цукрового і кукурудзи. Максимальна врожайність зеленої маси зафіксована за сумісного вирощування гібридів сорго цукрового і кукурудзи Довіста і Бистриця 400 МВ – 81,6 т / га. При цьому не відмічено достовірної різниці з варіантом Довіста + Моніка 350 МВ у 2012 р. (НІР_{0,5} = 0,8). При застосуванні як компонента суміші сорго цукрового Силосне 42 урожайність зеленої маси становить 74,6–76,5 т / га, що на 3,0–7,0 т / га менше порівняно з варіантом, де висівали гібрид Довіста.

Урожайність зеленої маси сорго цукрового і кукурудзи залежить і від гідротермічних умов вегетаційних періодів досліджуваних років. Так, у більш сприятливому за кліматичними умовами 2013 р. вона була вищою на 9,7–21,6% порівняно з 2012 р.

Розрахунковий вихід біогазу та метану з силосної маси сорго цукрового і кукурудзи та їх сумішей на 1 га посівної площі становить у сорго цукрового 7,0–8,4 і 4,1–4,9 тис. м³ / га, кукурудзи – 5,7–6,5 і 3,3–3,7 тис. м³ / га при сумісному вирощуванні – 9,1–10,2 і 5,3–5,9 тис. м³ / га (рис. 2).

За рахунок вищого вмісту сухої речовини питомий вихід біогазу з одиниці внесеної силосної маси кукурудзи був вищим на 33,7–50,6% порівняно з сорго цукровим та на 9,2–13,0% у порівнянні з сумішшю цих культур. При розрахунку виходу біогазу та метану з одиниці площі вищі показники отримані у варіантах сумісного вирощування сорго цукрового та кукурудзи. Це пояснюється вищою продуктивністю сумісних посівів сорго цукрового та кукурудзи порівняно з одновидовими.

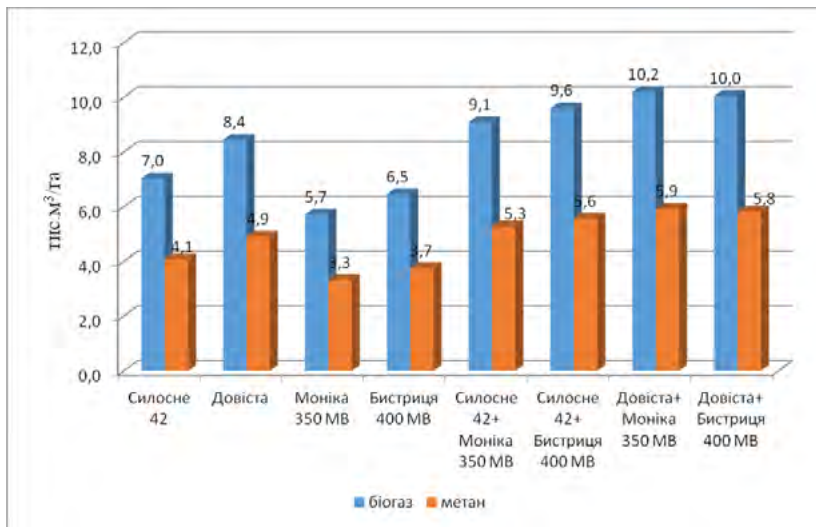


Рис. 2. Розрахунковий вихід біогазу та метану з силосної маси сорго цукрового і кукурудзи та їх сумішей, (середнє за 2012–2013 р.), тис. м³ / га

Висновки. Показники вмісту азоту, фосфору і вуглецю були вищими на 0,27–0,29%, 0,04–0,12% і 1,21–1,27%, а калію менші на 0,17–0,23% у кукурудзи порівняно із сорго цукровим. За вмістом цих елементів суміш кукурудзи і сорго цукрового займає проміжне місце між вказаними культурами. За сумісної сівби сорго цукрового та кукурудзи урожайність зеленої маси була на 6,4–9,3% і 51,4–68,4% вищою порівняно з їх одновидовою сівбою. Максимальна врожайності зеленої маси зафіксована за сумісного вирощування гібридів сорго цукрового і кукурудзи Довіста і Бистриця 400 MB – 81,6 т / га. За рахунок вищого вмісту сухої речовини питомий вихід біогазу з одиниці внесеної силосної маси кукурудзи був вищим на 33,7–50,6% порівняно з сорго цукровим та на 9,2–13,0% з сумішню цих культур. При розрахунку виходу біогазу та метану з одиниці площі найвищі показники (9,1–10,2 і 5,3–5,9 тис. м³ / га) отримані у варіантах сумісного вирощування сорго цукрового та кукурудзи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Развитие биогазовых технологий в Украине и Германии: нормативно-правовое поле, состояние и перспективы / Г. Гелетуца та ін. Киев-Гюльцов. 2013. 72 с.
2. Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Schelle H., Herrmann C. Biogas Crops – Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2009. Vol. XI. P. 1087–1093.
3. Masse L., Masse D. I., Beaudette V., Muir M. Size distribution and composition of particles in raw and anaerobically digested swine manure. *Transactions of the ASAE*. 2005. № 48 (5). P. 1943–1949.
4. Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2003. № 109 (1–3). P. 263–274.
5. Amon T., Amon B., Kryvoruchko M., 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*. 2007. № 118. P. 173–182.

6. Mahmood A., Ullah H., Ijaz M., Naeem A.S., Honermeier B. Evaluation of sorghum cultivar for biomass and biogas production. *Aust. J. Crop Sci.* 2013. №7 (10). P. 1456–1462.
 7. Podkówka W., Podkówka Z., Kowalczyk-Ju'sko A., Pasyniuk P. Agricultural biogas renewable energy source. Theory and practical application. Wydawnictwo PWRiL. 2012. P. 147–152.
 8. Bartuševics J., Gaile Z. Effect of silaging on chemical composition of maize substrate for biogas production. *Annual 16th International Scientific Conference Proceedings, "Research for rural development 2010"*, Jelgava, Latvia, 19–21 May 2010, Vol. 1, pp. 42–47.
 9. Weiland P., Bilitewski B., Werner P., Dornack C., Stegmann R., Rettenberger G., Faulstich M., Wittmaier M. Trockenfermentation in der Landwirtschaft-Welche Substrate und Techniken finden Anwendung. *Anaerobe biologische Abfallbehandlung*. 2008. pp. 235–245.
 10. Lewandowski I., Heinz A. Delayed harvest of miscanthus – influences on biomass quantity, quality, and environmental impacts of energy production. *European Journal of Agronomy*. 2003. № 19. P. 45–63.
 11. Oechsner H., Lemmer A. Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten? VDI-Gesellschaft Energietechnik: Biogas 2009. Energieträger der Zukunft, 2009, P. 37–46.
 12. Amon Th., Kryvoruchko V., Amon B., Bodiroza V., Zollitsch W., Boxberger J. Biogas Production from Energy Maize. *Landtechnik*. 2006. № 2. P. 86–87.
 13. Braun A., Weiland R., Wellinger P. Biogas from energy crop digestion. In *IEA Bioenergy Task. 2008*. Vol. 37. pp. 1–20.
 14. Amon T., Kryvoruchko V., Amon B. Methane production from maize, grassland and animal manures through anaerobic digestion. *Sustainable Organic Waste Management for Environmental Protection and Food Safety II*. 2004. P. 175–182.
 15. Schittenhelm S. Effect of drought stress on yield and quality of maize / sunflower and maize / sorghum intercrops for biogas production. *J. Agron. Crop. Sci.* 2010. № 196. P. 253–61.
 16. Seppälä M. Biogas Production from High-Yielding Energy Crops in Boreal Conditions / Academic dissertation of the University of Jyväskylä, 2013, 92 p.
 17. Роїк М.В., Ганженко О.М., Тимошук В.Л. Концепція виробництва біогазу з біоенергетичних рослин в Україні. *Біоенергетика*. 2014. № 2. С.6–8.
 18. Методика проведення дослідів з кормовиробництва / під ред. А.О. Бабица. Вінниця, 1994. 87 с.
 19. Основи наукових досліджень в агрономії / під ред. В.О. Єщенко. К. : Дія, 2005. 288 с.
 20. Агрохімічний аналіз / М.М. Городній, А.П. Лісовал, А.В. Бикін та ін. / Підручник. 2-е видання. – К. : Арістей, 2005. 476 с.
 21. ДСТУ ISO 6497:2005. Методи відбирання проб. [Розроблений вперше; введ. 01.01.08.] – К. : Держспоживстандарт України, 2008. 19 с.
 22. Buswell A.M., Mueller H.F. Mechanism of methane fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1952. № 44 (3). P. 550–552.
 23. Oechsner H., Lemmer A., Neuberger C. Crops as a Digestion Substrate in Biogas Plants. *Landtechnik*. 2003. № 2. P. 146–147.
 24. Dubrovskis V., Plume I., Bartusevics J., Kotelenecs V. Biogas production from fresh maize biomass. *Engineering for rural development*. 2010. P. 220–225.
-