

ПЕРСПЕКТИВИ ОТРИМАННЯ БІОГАЗУ**З ЦУКРОВОГО СОРГО В УКРАЇНІ****Г. І. КУЛІЧКОВА**, <http://orcid.org/0000-0001-6909-391X>*Державна установа «Інститут харчової біотехнології та геноміки
Національної академії наук України»*

E-mail: newmilk@ukr.net

Н. А. САВИЦЬКА, <http://orcid.org/0000-0001-8264-2303>*ІНЦ «Інститут біології та медицини» Київського національного
університету імені Тараса Шевченка***О. І. ВОЛОДЬКО**, кандидат технічних наук,
<http://orcid.org/0000-0003-1465-9271>**Т. С. ІВАНОВА**, кандидат біологічних наук,
[https:// orcid.org/0000-0002-5219-8034](https://orcid.org/0000-0002-5219-8034)**С. П. ЦИГАНКОВ**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
[https:// orcid.org/0000-0002-4166-4124](https://orcid.org/0000-0002-4166-4124)*Державна установа «Інститут харчової біотехнології та геноміки
Національної академії наук України»*<https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.05.001>

Анотація. Розвиток енергетики має вирішальний вплив на стан економіки у державі та рівень життя населення. За допомогою біогазових технологій можна збільшити частку енергії з відновлювальних джерел у національному енергетичному балансі, зменшити обсяг утворення відходів і збільшити обсяг їх переробки та повторного використання на основі інноваційних технологій та виробництв, а також обмежити викиди парникових газів. Регулювати продуктивність анаеробної ферментації можна за допомогою застосування макроелементів і мікроелементів. Вони є стимуляторами, а також більш економічно та екологічно безпечними каталізаторами порівняно з хімічними реагентами, які часто вимагають значних витрат енергії.

Показано, що багаса цукрового сорго сорту Ботанічний має високий вміст органічних сухих речовин (87,85 %), багата на мікроелементи, тому це безумовно багатообіцяюча сировина для анаеробної ферментації. Теоретичний вихід біогазу із багаси сорго становить 476,38 л/кг сухої речовини, з вмістом метану 52,90 %. Очікувана енергетична цінність метану складає 9,02 МДж/кг сухої речовини багаси сорго. Сорго є однією із культур з найвищим співвідношенням C/N, це обумовлює перспективу ко-ферментації з субстратом, що має низьке значення цього параметру (бурякова вінаса). Цукрове сорго є перспективним кандидатом для продукції біогазу завдяки гарному хімічному складу, відносно високим показникам виходу метану та можливості експлуатації маргінальних земель на території України для його культивування.

Ключові слова: біогаз, анаеробна ферментація, цукрового сорго, багаса, мікроелементи, енергетична цінність

Актуальність. Україна забезпечує себе природним газом і нафтою власного видобутку лише на 20 %. Ціна альтернативної енергії від 3 до 17 разів нижча за енергію з традиційних джерел (Федуняк І.О., 2014). Це питання ще більш актуальне, враховуючи сучасні відносини України з Росією - одним з найбільших постачальників природного газу.

Для задоволення енергетичних потреб України в енергетичних продуктах, а також для інтеграції у Європейський простір та виконання цілей сталого розвитку, необхідне впровадження нових енергоощадних технологій і розвиток альтернативних та екологічно чистих джерел енергії (Чебан І.В., 2017). Виробництво біогазу з відновлювальних джерел відповідає цілям сталого розвитку для країн світу, затвердженим на засіданнях Генеральної Асамблеї ООН у вересні 2015 року.

Біогаз – це займиста природна суміш газів, яка утворюється внаслідок розкладання органічних речовин за анаеробних умов, є сумішшю з 50-70 % метану і 30-50 % вуглекислого газу, а також незначної кількості сірководню, азоту, водню та інших домішок. Співвідношення метану до вуглекислого газу залежить від природи субстрату та від рН під час процесу, домішки азоту

з'являються з розчиненого у субстраті повітря, водяна пара – від випаровування з субстратів при термофільних умовах, сірководень – з відновлення сульфатів субстрату, амоніак – від гідролізу білкових речовин або сечовини (Angelidaki I., etc., 2018). Можливі джерела біогазу: відходи тваринних ферм, спиртових та цукрових заводів, стічні води чи органіка на сміттєвих полігонах. Біогаз можна використовувати для отримання електроенергії та в опаленні чи приготуванні їжі.

За допомогою біогазових технологій можна збільшити частку енергії з відновлювальних джерел, зменшити обсяг утворення відходів, а також обмежити викиди парникових газів. Одна біогазова установка може досягти показника 70-80 % у використанні «місцевої складової», що є важливим плюсом для економіки країни (Токарчук, Д. та ін., 2013).

За даними Біоенергетичної асоціації України (UABIO, 2021), у 2021 році в Україні всього налічується 50 біогазових проєктів. Це майже на 50% більше біогазових установок порівняно з 2020 роком (27 біогазових проєктів). Загальна встановлена електрична потужність біогазових установок в Україні становить більше 86 МВт, вона зросла на 23,25% порівняно з 2020 роком. Електрична потужність окремих

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

проектів сягає до 12 МВт. Реалізовані проекти біогазових комплексів в агросекторі орієнтовані здебільшого на виробництво електричної енергії та продаж її за “зеленим” тарифом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Склад біогазу, а також його кількість, змінюється та залежить від виду субстрату та технології його зброджування. До складу субстрату обов’язково повинні входити вітаміни та мікроелементи для адекватної роботи ферментних систем бактерій (Adekunle K, etc., 2015). Правильний вибір субстрату для ферментації дає можливість впливати на результат процесу, максимізувати вихід виробленої енергії та отримати біодобриво високої якості.

Відомо, що 70 % території України складають сільськогосподарські землі (Lakyda P, etc., 2011), а за оцінками міжнародного проекту FORBIO майже 7% земель, що не використовуються, можливо додатково залучити під вирощування енергетичних культур (Mergner R, etc., 2017). Цукрове сорго (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) – це трав’яниста рослина родини злакових, стебла якої містять сік із 12-20 % цукрів, характеризується гарною адаптивністю до посушливих умов, коливань температур, засолених та кислих ґрунтів, а тому вирощується як енергетична культура для виробництва біоетанолу та біогазу, в

тому числі на маргінальних землях (Volodko, etc., 2020).

Сік цукрового сорго є перспективною сировиною для виробництва біоетанолу, а багаса, як побічний продукт, може бути використана на цьому ж підприємстві для утворення біогазу (С. П. Цыганков и др., 2009). Таким чином, підприємство виробляє комерційний продукт, вирішує проблему утилізації відходів виробництва, і забезпечує себе електроенергією та теплом шляхом роботи когенераційної установки на біогазі (Rakhmetova S, etc., 2020).

Базовий потенціал залишкової біомаси в Україні складає 2,13 млн. т умовного палива (це паливо, теплота згоряння якого дорівнює 29,3 МДж/кг). При використанні таких побічних продуктів агропромислового виробництва як солома або багаса і барда можна отримати додатково до основного продукту (спирт з енергетичним потенціалом 22,56 МВт•год/га•рік) майже у двічі більше енергії – 45,06 МВт•год/га•рік із побічних продуктів (В.О. Дубровін та ін., 2009). Потенціал виходу біогазу та метану з багаси сорго згідно багатьох досліджень досить високий. Деякі дослідження (Wannasek L., etc., 2017) про кількісний метановий вихід з біомаси сорго дають дані 207-387 м³ газу на тонну субстрату. Метановий потенціал для сорго в іншому джерелі (Sawatdeenarunat C., etc., 2014),

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

зазначається як 286-319 нормальних м³ на тонну летких речовин.

Мета дослідження – визначення біохімічного складу та потенціалу багаси цукрового сорго як сировини для виробництва біогазу.

Матеріали і методи дослідження. Насіння цукрового сорго сорту Ботанічний (Рахметов Д. та ін., 2015) було надано Національним ботанічним садом ім. Гришка, вирощування рослин проводилось в Шостківському районі Сумської області, на Поліссі, в континентальних кліматичних умовах, на дерново-підзолистому ґрунті. У досліді використовувалась багаса сорго, яку отримували після відтискання на роликовому пресі соку зі стебел. Потім багасу сорго висушували при кімнатній температурі, подрібнювали та перемелювали за допомогою лабораторного млина.

Визначення вмісту вологості проводилося за методикою ГОСТ 29143-91 ваговим методом при висушуванні у сушильній шафі за температури 105 °С до постійної маси. Вміст сухих речовин визначали відніманням вмісту вологості від 100 %. Вміст зольності досліджували за ГОСТ 11022-95 шляхом спалення у муфельній печі при температурі 550 °С до постійної маси. Визначення вмісту сирого жиру проводилося за методикою ГОСТ 13496.15-97 екстрагуванням гексаном за допомогою апарату Сокслет.

Визначення вмісту сирого протеїну здійснювалося в результаті визначення загального вмісту нітрогену за методикою К'ельдаля (ДСТУ ISO 1871:2003) та перемножуванням отриманого результату на коефіцієнт 5,7 (Нечаєв и др., 2007). Мікроелементний склад визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії (пат. RU2499049C2) за допомогою оптичного емісійного спектрометра паралельної дії з індуктивно зв'язаною плазмою Shimadzu ICPE-9000 (Японія).

Вміст вуглеводів (%) розраховували за формулою: 100 % – (вологість + зольність + сирий жир + сирий протеїн) (Костенко В.М. та ін., 2008). Вміст органічних сухих речовин (ОСР, %) отримували за формулою (Kulichkova G., etc., 2020): $ОСР = 100 \% - \text{вологість субстрату} - \text{зольність}$.

Теоретичний вихід біогазу розраховували за стехіометричною формулою (Braun, 2007): $C_6H_{12}O_6 = 3 CH_4 + 3 CO_2$

Відповідно, за стандартних умов теоретично 1 моль глюкози може дати 3 моля метану та 3 моля вуглекислого газу. З 1 граму вуглеводного субстрату ми отримаємо 0,747 л газу. Аналогічно, 1 г протеїну дає 0,7 л біогазу (29 % CO₂ та 71 % CH₄), а 1 г ліпідів – 1,25 л біогазу (32 % CO₂ та 68 % CH₄) (Braun, 2007). Енергетичну цінність метану, що можна отримати при анаеробному ферментуванні з

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

кілограму багаси сорго розраховували, виходячи із того, що метан має енергетичну цінність 35,8 МДж/м³ (Kulichkova G., etc., 2020).

Всі дослідження проводилися у трьох повторностях, за результати було прийняте середнє арифметичне з вирахуванням похибки.

Результати дослідження та їх обговорення. В рамках дослідження було проведено біохімічний аналіз багаси цукрового сорго. Всі показники розраховували у перерахунку на суху речовину. Результати зведені до таблиці 1:

1. Біохімічний склад багаси цукрового сорго, %

Вид сировини	Сухі речовини	Зольність	Сирий жир	Сирий протеїн	Лігнін	Вуглеводи
Багаса сорго	90,52± 0,09	2,67± 0,14	0,55± 0,03	8,55± 0,4	23,91± 1,2	54,84±1,86

Вологість висушеної багаси сорго становила менше 10 %, що забезпечувало тривале зберігання її як субстрату для анаеробного ферментування. Водночас, силосування як попередня обробка здатне підвищити вихід метану завдяки кислотному гідролізу та біологічній деструкції, що покращують розкладання лігніну (Sun et al., 2021). Без попередньої обробки лігнін практично не розкладається

при анаеробному ферментуванні (Pasteris et al., 2022).

Результати розрахунків енергетичного потенціалу багаси сорго зведені до таблиці 2. Оскільки вуглеводи складають більше половини сухої речовини багаси сорго, то саме вони в основному забезпечують потенціал утворення біогазу. Разом з тим, вміст білків та жирів підвищує рівень цільового продукту метану в біогазі.

2. Енергетичний потенціал багаси сорго при анаеробному ферментуванні

Параметри	Розраховані показники
Органічні сухі речовини, %	87,85
- в тому числі, без врахування лігніну	63,94
Вихід біогазу, л/кг сухої речовини	476,38
- із білків	59,85
- із жирів	6,88
- із вуглеводів	409,65
Вихід біометану, л/кг сухої речовини	252,00
- із білків	42,49
- із жирів	4,68
- із вуглеводів	204,83
Енергетична цінність метану, МДж/кг сухої речовини багаси сорго	9,02

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

Для подальшої метанової ферментації неабияке значення має макро- та мікроелементний склад багаси сорго. Регулювати продуктивність анаеробної ферментації можна за допомогою застосування макроелементів і мікроелементів. Вони є стимуляторами, а також більш економічно та екологічно безпечними каталізаторами порівняно з хімічними реагентами, які часто вимагають значних витрат енергії (Chunlan M., etc., 2015). Дослідження показали, що мікроелементи мають значний вплив на зброджування при виробництві біогазу. Ні стимулює виробництво біогазу та вміст метану в біогазі. Додавання солей Са та Mg як енергетичні добавки можуть підвищити продукцію CH_4 та запобігти піноутворенню. W важливий для деградації пропіонатів і метаногенів (Reda T., etc., 2008). Fe реагує з H_2S з утворенням FeS ; тому можна використовувати додавання заліза для уникнення корозії в компресорах і токсичності H_2S в біогазі.

Макроелементи, такі як азот, фосфор, калій і магній, необхідні для активації або функціонування багатьох мікроорганізмів у біологічних процесах. Потреба у макроелементах в основному оцінюються на основі бактеріального складу та його росту і складу біомаси.

Співвідношення поживних речовин зазвичай наступне: $\text{C:N:P:S}=600:15:5:1$, а оптимальне співвідношення C:N:P для збільшення виходу метану становить $200:5:1$ (Rajeshwari K., etc., 2000). Під час біологічних процесів вуглець, зазвичай, забезпечується субстратом і використовується для зміцнення клітинної структури мікроорганізму. Азот необхідний для біосинтезу білка. Сірка потрібна, оскільки входить до складу важливих амінокислот і як незамінна поживна речовина для метаногенного росту бактерій. Вміст фосфатів є вирішальним для забезпечення енергоносіїв АТФ і НАДФ під час обміну речовин.

Результати визначення елементного складу багаси зведені до таблиці 3.

Аналізуючи отримані результати, можемо побачити, що найбільше в багасі сорго виявилось такого макроелементу як кальцій, що вказує на потенціал отримання високого виходу метану. Важливим показником також є те, що вміст важких металів кадмію та свинцю є дуже малим. Це вказує на те, що ґрунт, на якому зростало цукрове сорго, не є забрудненим важкими металами, і що дигестат після ферментації цілком можна буде використовувати як добриво, так як воно буде безпечним.

3. Мікро- і макроелементний склад багаси цукрового сорго

Назва елемента	Кількість, мг/кг
Кальцій	2220,7±444,2
Магній	809,2±161,8
Сірка	730,0±145,8
Бор	6,6±1,4
Мідь	15,0±3,0
Залізо	64,3±12,9
Марганець	14,9±3,0
Цинк	41,5±8,3
Молібден	<0,02
Натрій	570,1±114,1
Алюміній	18,2±3,6
Нікель	0,6±0,1
Кадмій	<0,02
Свинець	<0,02
Кобальт	<0,02

Висновки і перспективи. Багаса сорго як сировина для біогазу має високу біологічну цінність, багата на мікроелементи, тому це безумовний кандидат для анаеробної ферментації. Сорго є однією із культур з найвищим співвідношенням C/N (Herrmann S., etc., 2016), це обумовлює перспективу ко-ферментації з субстратом, що має низьке значення цього параметру (зокрема, бурякова вінаса як відхід виробництва біоетанолу).

За результатами визначення біохімічного складу багаси цукрового сорго теоретичний вихід біогазу становить 476,38 л/кг сухої речовини, з вмістом метану 52,90 %. Очікувана енергетична цінність метану складає 9,02 МДж/кг сухої речовини багаси сорго. Досліджувана багаса сорго містить необхідну кількість нікелю як ключового мікроелементу для утворення біогазу, проте для оптимізування процесу необхідним є

додаткове внесення заліза (1-5 г/кг), молібдену (0,044-100 мг/л) та кобальту (0,029-5 мг/л) у біодоступних формах.

Для отримання великої кількості біомаси цукрового сорго, а потім відповідно і біогазу, необхідно підібрати оптимальні методи культивування даної рослини (Pinnamaneni S., etc., 2013). Цукрове сорго є перспективним кандидатом для продукції біогазу завдяки гарному хімічному складу, відносно високим показникам виходу метану та можливості експлуатації маргінальних земель на території України для його культивування. Багаса сорго має досить високий потенціал виходу біогазу. Покращити вихід біогазу із багаси сорго можливо шляхом попередньої підготовки, зокрема, силосування. Для підвищення потенціалу виходу біогазу з багаси сорго можливо

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

додавати комплементарні ко-субстрати та мікроелементи, що прискорюють процес метаногенезу у

біодоступній формі, враховуючи комерційну доцільність.

Список використаних джерел

1. Федуняк І.О. Ефективність виробництва біогазу в Україні. Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»: збірник наукових праць / ред. кол.: І.Д. Пасічник, О.І. Дем'янчук. Острог: Видавництво Національного університету «Острозька академія», 2014. Вип. 26. С. 45–49.

2. Чебан І.В., Діброва А.Д. Ринок біоенергії в Україні. Науковий вісник Ужгородського національного університету. 2017. Вип. 14, Ч. 2. С. 176-181.

3. Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P., Luo G., Campanaro S., Wenzel H., Kougias P.G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*. 2018. Vol. 36, Iss. 2. P. 452-466.

4. Токарчук, Д. та Яремчук, О. (2013). Виробництво і використання біогазу в Україні: економічні і соціальні перспективи. Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки). С. 338-346.

5. Біоенергетична асоціація України UABIO (2021). *Біоенергетичні об'єкти: інфографіка*. [online] Available at: <https://uabio.org/materials/11862/> [Accessed 16 Dec. 2021].

6. Adekunle, K., Okolie, J. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Adv. in Bioscience and Biotechnol.* 06. 205-212. 10.4236/abb.2015.63020.

7. Lakyda, P., Geletukha, G., Vasylyshyn, R., Zhelezna, T., Zibtsev, S., Böttcher, H. (2011). In: *Lakyda PI, Ed. Energy potential of biomass in Ukraine*. Kyiv: Publishing Center of NUBiP of Ukraine, Institute of Forestry and Landscape-Park Management of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

8. Mergner, R., Janssen, R., Rutz, D. (2017). Fostering sustainable feedstock production for advanced biofuels on underutilized land in Europe. 25th European Biomass Conference and Exhibition.

Stockholm. pp. 125-130.

9. Volodko, O., Ivanova, T., Kulichkova, G., Lukashevych, K., Blume, Ya., Tsygankov, S. (2020) Fermentation of sweet sorghum syrup under reduced pressure for bioethanol production. *Open Agric J*; 14: 235-245.

<http://dx.doi.org/10.2174/1874331502014010235>

10. Использование побочных продуктов производства биоэтанола для получения энергии / С. П. Цыганков, А. Г. Новак, А. И. Куличкова // *Відновлюв. енергетика*. 2009. № 2. С. 74-80.

11. Rakhmetova, S., Vergun, O., Blume, R., Bondarchuk, O., Shymanska, O., Tsygankov, S., Yemets, A., Blume, Ya., Rakhmetov, D. (2020). Ethanol Production Potential of Sweet Sorghum in North and Central Ukraine. *The Open Agriculture J.* 14. 321-338. 10.2174/1874331502014010321.

12. Дубровін В.О., Мельничук М.Д., Мельник Ю.Ф. Біоенергія в Україні – розвиток сільських територій та можливості для окремих громад: [науково-методичні рекомендації]. К: НУБіП України, 2009. 122 с.

13. Wannasek, L., Ortner, M., Amon, B., Amon, T. (2017). Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield. *Biomass and Bioenerg.* 106. 137-145. 10.1016/j.biombioe.2017.08.03.

14. Sawatdeenarunat, C., Surendra, K., Takara, D., Oechsner, H., Khanal, S. (2014). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresour technol.* 178. 10.1016/j.biortech.2014.09.103.

15. Рахметов, Д., Корабльова, О., Стаднічук, Н. та ін. (2015). *Каталог відділу нових культур*. НАН України, Нац. ботан. сад. ім. М.М. Гришка. Київ: Фітосоціоцентр.

16. Нечаев, А., Траубенберг, С., Кочеткова, А. (2007). *Пищевая химия*. Санкт-Петербург: ГИОРД.

17. Костенко В.М., Панько В.В., Сироватко К.М., Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин. Частина I

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

“Хімічний склад, оцінка поживності та якості кормів”. – Вінниця: РВБ ВДАУ, 2008.-141 с.

18. Kulichkova, G., Ivanova, T., Köttner, M., Volodko, O., Spivak, S., Tsygankov, S., Blume, Ya. (2020). Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials. *The Open Agriculture J.* 14: 219-234. <http://dx.doi.org/10.2174/1874331502014010219>

19. Braun, R. (2007). Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development. In: RANALLI, P. (eds) *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5486-0_13

20. Sun H., Cui X., Li R., Guo J., Dong R. Ensiling process for efficient biogas production from lignocellulosic substrates: Methods, mechanisms, and measures, *Bioresource Technology*, Volume 342, 2021, 125928, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125928>

21. Pasteris A.M., Heiermann M., Theuerl S., Plogsties V., Jost C., Prochnow A., Herrmann Ch. Multi-advantageous sorghum as feedstock for biogas production: A comparison between single-stage and two-stage anaerobic digestion systems, *Journal of Cleaner Production*, Volume 358, 2022, 131985, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131985>.

22. Chunlan, M., Yongzhong, F., Xiaojiao, W., Guangxin, R. (2015) Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – Vol. 45. – P. 540-555.

23. Reda, T., Plugge, C.M., Abram, N.J., Hirst, J. (2008) Reversible interconversion of carbon dioxide and formate by an electroactive enzyme. *Proc. Natl. Acad. Sci.* – Vol. 105. – 10654-10658.

24. Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore, V. (2000) State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable Sustainable Energy Rev.* – Vol. 4. – P. 135-156.

25. Herrmann, C., Idler, C., Heiermann, M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics.

Bioresource Technol. 206. 10.1016/j.biortech.2016.01.058.

26. Pinnamaneni, S., Kumar, C., Reddy, B. (2013). Sweet Sorghum: From Theory to Practice. In: Rao P., Kumar C. (eds) *Characterization of Improved Sweet Sorghum Cultivars*. SpringerBriefs in Agriculture. Springer, India. 10.1007/978-81-322-0783-2_1.

References

1. Fedunyak I.O. (2014). Efficiency of biogas production in Ukraine. Scientific Notes of the National University "Ostroh Academy". "Economics" series: a collection of scientific papers / editor. col.: I.D. Pasichnik, O.I. Demyanchuk. Ostroh: Publishing House of the National University "Ostroh Academy", Vol. 26. pp. 45–49.

2. Cheban I.V., Dibrova A.D. (2017). Bioenergy market in Ukraine. Scientific Bulletin of the Uzhhorod National University. Issue 14, Part 2. P. 176-181.

3. Angelidaki I., Treu L., Tsapekos P., Luo G., Campanaro S., Wenzel H., Kougias P.G. (2018.) Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*. Vol. 36, Iss. 2. P. 452-466.

4. Tokarchuk, D. and Yaremchuk, O. (2013). Production and use of biogas in Ukraine: economic and social perspectives. Collection of scientific works of Tavriyya State Agro-Technological University (Economic Sciences). P. 338-346.

5. Bioenergy Association of Ukraine UABIO (2021). Bioenergy facilities: infographic. [online] Available at: <https://uabio.org/materials/11862/> [Accessed 16 Dec. 2021].

6. Adekunle, K, Okolie, J. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Adv. in Bioscience and Biotechnol.* 06. 205-212. 10.4236/abb.2015.63020.

7. Lakyda, P., Geletukha, G., Vasylyshyn, R., Zhelezna, T., Zibtsev, S., Böttcher, H. (2011). In: *Lakyda PI, Ed. Energy potential of biomass in Ukraine*. Kyiv: Publishing Center of NUBiP of Ukraine, Institute of Forestry and Landscape-Park Management of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

8. Mergner, R., Janssen, R., Rutz, D. (2017). Fostering sustainable feedstock

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

production for advanced biofuels on underutilized land in Europe. 25th European Biomass Conference and Exhibition. Stockholm. pp. 125-130.

9. Volodko, O., Ivanova, T., Kulichkova, G., Lukashevych, K., Blume, Ya., Tsygankov, S. (2020) Fermentation of sweet sorghum syrup under reduced pressure for bioethanol production. *Open Agric J*; 14: 235-245.

<http://dx.doi.org/10.2174/1874331502014010235>

10. Using by-products of bioethanol production to obtain energy / S. P. Tsygankov, A. G. Novak, A. I. Kulichkova // *Rev. energy* - 2009. - No. 2. - P. 74-80.

11. Rakhmetova, S., Vergun, O., Blume, R., Bondarchuk, O., Shymanska, O., Tsygankov, S., Yemets, A., Blume, Ya., Rakhmetov, D. (2020). Ethanol Production Potential of Sweet Sorghum in North and Central Ukraine. *The Open Agriculture J.* 14. 321-338. [10.2174/1874331502014010321](https://doi.org/10.2174/1874331502014010321).

12. Dubrovin V.O., Melnychuk M.D., Melnyk Yu.F. (2009). Bioenergy in Ukraine - development of rural areas and opportunities for individual communities: [scientific and methodological recommendations] K: NUBiP of Ukraine, 122 p.

13. Wannasek, L., Ortner, M., Amon, B., Amon, T. (2017). Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield. *Biomass and Bioenerg.* 106. 137-145. [10.1016/j.biombioe.2017.08.03](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.03).

14. Sawatdeenarunat, C., Surendra, K., Takara, D., Oechsner, H., Khanal, S. (2014). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresour technol.* 178. [10.1016/j.biortech.2014.09.103](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.103).

15. Rakhmetov, D., Korablyova, O., Stadnichuk, N. and others. (2015). Catalog of the Department of New Cultures. NAS of Ukraine, National herd garden. named after M.M. Grishka Kyiv: Phytosocial Center.

16. Nechaev, A., Trautenberg, S., Kochetkova, A. (2007). Food chemistry. St. Petersburg: GIORD.

17. Kostenko V.M., Panko V.V., Syrovatko K.M., Workshop on feeding agricultural animals. Part I "Chemical composition, assessment of nutrition and

quality of fodder". – Vinnytsia: State University of the Russian Academy of Sciences, 2008.-141 p.

18. Kulichkova, G., Ivanova, T., Köttner, M., Volodko, O., Spivak, S., Tsygankov, S., Blume, Ya. (2020). Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials. *The Open Agriculture J.* 14: 219-234. <http://dx.doi.org/10.2174/1874331502014010219>

19. Braun, R. (2007). Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development. In: RANALLI, P. (eds) *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5486-0_13

20. Sun H., Cui X., Li R., Guo J., Dong R. Ensiling process for efficient biogas production from lignocellulosic substrates: Methods, mechanisms, and measures, *Bioresour Technol*, Volume 342, 2021, 125928, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125928>

21. Pasteris A.M., Heiermann M., Theuerl S., Plogsties V., Jost C., Prochnow A., Herrmann Ch. Multi-advantageous sorghum as feedstock for biogas production: A comparison between single-stage and two-stage anaerobic digestion systems, *Journal of Cleaner Production*, Volume 358, 2022, 131985, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131985>.

22. Chunlan, M., Yongzhong, F., Xiaojiao, W., Guangxin, R. (2015) Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 45. P. 540-555.

23. Reda, T., Plugge, C.M., Abram, N.J., Hirst, J. (2008) Reversible interconversion of carbon dioxide and formate by an electroactive enzyme. *Proc. Natl. Acad. Sci.* Vol. 105. 10654-10658.

24. Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore, V. (2000) State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable Sustainable Energy Rev.* – Vol. 4. – P. 135-156.

25. Herrmann, C., Idler, C., Heiermann, M. (2016). Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics.

Кулічкова Г. І., Савицька Н. А., Володько О. І., Іванова Т. С., Циганков С. П.

Bioresource Technol. 206.
10.1016/j.biortech.2016.01.058.26. Pinnamaneni, S., Kumar, C., Reddy,
B. (2013). Sweet Sorghum: From Theory to
Practice. In: Rao P., Kumar C. (eds)Characterization of Improved Sweet Sorghum
Cultivars. SpringerBriefs in Agriculture.
Springer, India. 10.1007/978-81-322-0783-
2_1.

PROSPECTS OF BIOGAS OBTAINING FROM SWEET SORGHUM IN UKRAINE

G. I. Kulichkova, N. A. Savytska, O. I. Volodko, T. S. Ivanova, S. P. Tsygankov

Abstract: *The development of energy has a decisive influence on the state of the economy in the country and the standard of living of the population. With the help of biogas technologies, it is possible to increase the share of energy from renewable sources in the national energy balance, reduce the volume of waste generation and increase the volume of their processing and reuse based on innovative technologies and productions, as well as limit greenhouse gas emissions. It is possible to regulate the performance of anaerobic fermentation using macronutrients and micronutrients. They are stimulants, as well as more economically and environmentally safe catalysts compared to chemical reagents, which often require significant energy costs.*

It has been shown that sweet sorghum bagasse of the Botanical grade has a high content of organic dry matter (87.85%), is rich in trace elements, therefore it is definitely a promising raw material for anaerobic fermentation. The theoretical yield of biogas from sorghum bagasse is 476.38 l/kg of dry matter, with a methane content of 52.90%. The expected energy value of methane is 9.02 MJ/kg dry matter of sorghum bagasse. Sorghum is one of the crops with the highest C/N ratio, which determines the prospect of co-fermentation with a substrate that has a low value of this parameter (sugar beet vinasse). Sugar sorghum is a promising candidate for biogas production due to its good chemical composition, relatively high methane yield and the possibility of exploiting marginal lands in Ukraine for its cultivation.

Key words: *biogas, anaerobic fermentation, sweet sorghum, bagasse, microelements, energy value*