

УДК 662.569:631.816:631.
816.35
© 2020

ВПЛИВ АНАЕРОБНОГО ЗБРОДЖУВАННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ НА ЗМІНУ ВМІСТУ БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ЕФЛЮЕНТІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Є.В. Скрильник¹, А.М. Кутова², В.А. Гетманенко³

¹доктор сільськогосподарських наук

^{2,3}кандидати сільськогосподарських наук

ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського»
вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, Україна

e-mail: ¹orgminlab@gmail.com, ²kutova.ang@gmail.com, ³vg.issar@gmail.com

ORCID: ¹0000-0002-8642-8547, ²0000-0003-2680-566X, ³0000-0001-9021-3373

Надійшла 29.01.2020

Мета. Установити вплив анаеробного збродження сировини рослинного і тваринного походжень на зміну вмісту біогенних елементів у рідкій і твердій фракціях ефлюенту після отримання біогазу. **Методи.** Аналітичні, розрахунково-порівняльні, математико-статистичні. **Результати.** Установлено, що перетворення органічних сполук у процесі анаеробного збродження зумовлює лужну реакцію біогазового ефлюенту. Порівнюючи зразки рідкої фракції (фугату) та твердої фракції (дігестату) відходу виробництва біогазу з різної сировини (жому, кукурудзяного та соргового силосу), встановлено, що вміст азоту та калію в зразках фугату перевищує відповідні показники дігестату, але вміст фосфору є вищим у дігестаті (майже удвічі). За вмістом біогенних елементів ефлюент після анаеробного збродження силосу переважає відходи після переробки жому. Рідка і тверда фракції відходів біогазової установки збагачені амонійним азотом порівняно з вихідною сировиною більше на 40 – 60% залежно від виду сировини. Фугат містить менше 5% сухої речовини і основну кількість калію. До 80% масової частки азоту в фугаті становить його амонійна форма. На фоні низької зольності дігестату вміст загального вуглецю високий (понад 30%). **Висновки.** Досліджувані відходи біогазових установок, що працюють на сировині рослинного та тваринного походжень за агрохімічними показниками не поступаються іншим сировинним ресурсам і мають високий удобрювальний потенціал, особливо на кислих ґрунтах, з огляду на їх лужну реакцію. Відходи біогазових установок характеризуються низькою зольністю та високим умістом загального вуглецю, що підтверджує їхню цінність для потенційного гумусоутворення в ґрунтах.

Ключові слова: вихідна сировина, загальний вуглець, гумусоутворення, дігестат, фугат.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202003-10>

Нині в умовах гострої енергетичної кризи відновлюваних джерел енергії. У багатьох перспективним напрямом є застосування країн світу енергетика на біомасі зайняла

важливе місце в енергобалансі. Загалом в ЄС щороку із біомаси отримують 14% загальної потреби в енергії. Анаеробне зброджування — ефективний спосіб переробки біомаси, оскільки більша частина енергії сировини конвертується в метан і лише мала її частина поглинається мікроорганізмами. До біомаси, придатної до анаеробного зброджування, входять відходи сільського господарства, муніципальної сектору з високим вмістом лігноцелюлози та ін. Провідними країнами в галузі застосування біогазових технологій є Китай, Індія, Непал і Японія. В Україні біогазові технології впроваджуються значно повільніше. Слід зазначити, що загальноприйнятої назви у відходів біогазових установок (БГУ) немає. У вітчизняній і зарубіжній літературі їх позначають різними термінами: відходи БГУ — тверда та рідка фракції разом (ефлюент), дігестат, біогазовий осад, біошлам, рідкий продукт центрифугування, що виділяється під час зневоднення сипкого матеріалу (фугат) та ін. За сепарації ефлюенту утворюється тверда і рідка фракції. Якість ефлюенту безпосередньо залежить від температурного режиму зброджування біомаси: термофільний режим забезпечує повну нейтралізацію патогенних мікроорганізмів і повну втрату схожості насіння бур'янів.

Відходи, що залишаються після анаеробного зброджування сировини, застосовують як добриво [1, 2]. Зброджений рідкий залишок вирізняється високою екологічністю, оскільки під час анаеробного зброджування органічної сировини знищується патогенна мікрофлора, що знаходиться в гної, нейтралізується неприємний запах [3].

Оцінку потенційних добрив з ефлюенту проведено в багатьох роботах [4–11], але через велику різноманітність вихідної сировини, що застосовували під час виробництва біогазу, вміст азоту істотно відрізнявся [12].

У дослідженнях G. Qi, Z. Pan, Y. Sugawa та ін. проведено порівняння властивостей добрив з гною великої рогатої худоби (ВРХ), одержаних за умов мезофільного та термофільного зброджувань [13]. Установлено, що властивості ефлюенту залежать від вихідної сировини й умов анаеробного зброджування.

Доведено, що застосування ефлюенту є альтернативою гною [14]. Зразки ефлюенту і гною піддавали скринінгу на бактерії, що сприяють росту рослин, на вміст поживних речовин і важких металів. Гній містив вищі концентрації важких металів, фосфору і калію. Наявність великої кількості азоту, менший вміст важких металів порівняно з гноєм ВРХ, а також значна кількість бактерій, що стимулюють ріст рослин, підтверджують потенційну здатність ефлюенту підвищувати родючість ґрунтів.

С.І. Тарасовим, Д.А. Ковальовим, Ю.В. Карасвим проведено дослідження впливу термофільного і мезофільного режимів роботи БГУ за використання субстратів різних типів (напіврідкого гною ВРХ, рідкого свиначого гною, рідкого пташиного посліду) на агрохімічну характеристику ефлюенту [15]. Установлено, що основні гумусоутворювальні речовини і біогенні елементи живлення рослин зберігалися, незважаючи на зниження вмісту органічної речовини. Впливу температурного режиму анаеробного зброджування на зміну властивостей субстратів не виявлено.

Установлено, що знезаражувальний ефект тим кращий, чим вища температура і триваліше перебування субстрату в реакторі. Отже, загибель збудників хвороб і паразитів починається вже під час мезофільного режиму бродіння (33–38°C) і досягає максимуму за термофільного режиму (53–55°C) [16]. Тому відходи БГУ мають значну перевагу як сировина для отримання органічного добрива порівняно з компостом, гноєм і свіжим послідом.

Визначення впливу анаеробного зброджування на зміну вмісту біогенних елементів у рідкій і твердій фракціях ефлюенту з відходів рослинництва та тваринництва є важливим питанням у сільськогосподарському виробництві з метою подальшого його застосування в землеробстві.

Мета досліджень — установити вплив анаеробного зброджування сировини рослинного і тваринного походжень на зміну вмісту біогенних елементів у рідкій і твердій фракціях ефлюенту після отримання біогазу.

Методика досліджень. Аналітичні роботи проводили зі зразками твердої (дігестат)

і рідкої (фугат) фракцій відходів БГУ, що працюють на жомі (1-ша БГУ), кукурудзяному силосі (2-га БГУ) та сорговому силосі з домішкою курячого посліду і шламу (3-тя БГУ) та відходах тваринництва (рідкому гної свиней та підстилковому гної ВРХ):

- жом кислий, рідка фракція після сепарації, тверда фракція після сепарації (1-ша БГУ, переробка відходів цукрового виробництва);
- кукурудзяний силос, рідка фракція після сепарації, тверда фракція після сепарації (2-га БГУ);
- суміш шламу дегідрованого, силосу соргового, курячого посліду з підстилкою, рідка фракція, тверда фракція (3-тя БГУ);
- гній свиней та підстилковий гній ВРХ у співвідношенні 1:4 до та після сепарації;
- гній свиней та рідкий гній ВРХ у співвідношенні 1:10 до та після сепарації.

Зразки органічної сировини до та після анаеробного зброджування аналізували в компетентній лабораторії в 3-разовій повторності (свідцтво про відповідність системи вимірювань вимогам ДСТУ ISO 10012:2005, № 01-0104/2017) за чинними нормативно-методичними документами: визначення вологи та сухого залишку за ДСТУ EN 13040; визначення золи за ДСТУ EN 13039; визначення рН за ДСТУ EN 13037; визначення сумарної масової частки азоту та масової частки амонійного азоту за ДСТУ 7911; визначення загального фосфору за ДСТУ ISO 5316; визначення загального калію за ДСТУ 7949; визначення загального вуглецю за ДСТУ 4289.

Під час обробки аналітичних даних застосовували математико-статистичні методи та дисперсійний аналіз для обрахування достовірності результатів досліджень.

Результати досліджень. Біогазовий ефлюент — органічна маса вологістю 63,5–99% з лужною реакцією, майже без запаху. Водний показник рН зразків ефлюенту з різної сировини — у лужному діапазоні: фугат — рН 7,6–8,4, дігестат — 8,7–9,1 (таблиця). Зміна значень показника рН у відходах БГУ пов'язана з перетворенням органічних сполук і визначається балансом органічних кислот, аміаку, вуглекислоти.

Рідка фракція (фугат) містить менше 10% сухої речовини й основну кількість калію. Азот у фугаті міститься переважно

в амонійній формі (до 80% від масової частки загального азоту). Рідка фракція БГУ, що працюють на силосі кукурудзи, має у своєму складі найбільшу кількість макроелементів порівняно з іншою досліджуваною сировиною. Фугат з кукурудзяного силосу містив у 6 разів більше загального азоту, у 3,2 раза більше фосфору та 2,9 раза більше калію порівняно з вихідною сировиною. Фугат БГУ, що працює на жомі, містив у своєму складі удвічі більше калію порівняно з вихідною сировиною.

Утилізація органічних відходів методом анаеробного зброджування дає змогу виключити стічні води тваринницьких комплексів з категорії небезпечних і отримати вторинну сировину у вигляді рідкого органічного добрива. Фугат гною свиней та рідкого гною ВРХ характеризується низьким умістом загального азоту, фосфору та калію. Фугат гною свиней та підстилкового гною ВРХ, порівняно з рідким, містить у своєму складі втричі більше азоту та фосфору.

Тверда фракція після сепарації ефлюенту містить близько 30% вологи та характеризується підвищеним рН (8,7–9,1) і низькою зольністю (7,5–12,5%). Уміст азоту у зразках дігестату після переробки різної сировини майже однаковий — на рівні 1,5% на суху речовину, причому амонійна форма становить близько половини від загального азоту.

Уміст загального фосфору варіює від 0,54% на суху речовину у дігестаті після анаеробного зброджування жому та до 1,08% у дігестаті з кукурудзяного силосу. Уміст фосфору в дігестаті з соргового силосу з додаванням шламу та курячого посліду — 0,63% на суху речовину.

Тверда фракція відходу з БГУ збіднена на калій порівняно з рідкою фракцією. Дігестат з жому характеризується найменшим умістом калію (0,49% на суху речовину). Близько 1% загального азоту, фосфору та калію міститься в дігестаті після анаеробного зброджування силосу кукурудзи, у дігестаті жому найменше загального фосфору та калію. У твердій фракції з БГУ, що працює на суміші шламу дегідрованого, силосі сорговому, курячому посліду з підстилкою, найбільший уміст загального азоту та фосфору.

Агрохімічний склад органічної сировини, твердого та рідкого залишків після анаеробного процесу бродіння

Сировина	Суха речовина/ сухий залишок, %	pH	Зольність, %	C _{зар} , %	Масова частка загальних сполук, %		
					N _{зар}	P ₂ O ₅	K ₂ O
Жом (1-ша БГУ)	15,9	3,4	12,0	30,8	<u>0,06</u> 0,35	<u>0,13</u> 0,82	<u>0,07</u> 0,44
Рідка фракція	2,3	7,6	16,6	11,5	0,08	0,05	0,14
Тверда фракція	24,2	8,7	12,5	32,3	<u>0,36</u> 1,50	<u>0,13</u> 0,54	<u>0,12</u> 0,49
NIP ₀₅	0,33	0,08	0,20	0,15	<u>0,01</u> 0,04	<u>0,02</u> 0,01	<u>0,01</u> 0,01
Кукурудзяний силос (2-га БГУ)	23,9	3,5	5,5	36,5	<u>0,06</u> 0,23	<u>0,05</u> 0,21	<u>0,10</u> 0,42
Рідка фракція	5,3	7,8	18,5	20,4	0,36	0,16	0,29
Тверда фракція	21,3	8,8	7,5	31,5	<u>0,25</u> 1,18	<u>0,23</u> 1,08	<u>0,26</u> 1,22
NIP ₀₅	0,26	0,15	0,19	0,26	<u>0,02</u> 0,01	<u>0,01</u> 0,01	<u>0,02</u> 0,02
Суміш (шлам дегідрований, силос сорговий, курячий послід) (3-тя БГУ)	31,5	5,3	8,7	39,0	<u>0,83</u> 2,18	<u>0,49</u> 1,28	<u>0,60</u> 1,68
Рідка фракція	3,7	8,4	14,3	6,8	0,70	0,23	0,42
Тверда фракція	36,5	9,1	8,0	33,5	<u>0,56</u> 1,53	<u>2,43</u> 6,65	<u>0,38</u> 1,04
NIP ₀₅	0,59	0,19	0,24	0,13	<u>0,02</u> 0,02	<u>0,02</u> 0,03	<u>0,01</u> 0,01
Гній свиней та підстилковий гній ВРХ (1:4)	23,9	9,1	34,3	30,0	<u>0,53</u> 2,22	<u>0,34</u> 1,42	<u>0,90</u> 3,74
Рідка фракція	10,0	8,1	22,5	37,8	0,20	0,11	0,16
NIP ₀₅	0,38	0,14	0,43	0,29	0,01	0,02	0,01
Гній свиней та рідкий гній ВРХ (1:10)	7,3	7,3	35,6	—	0,22	0,18	0,28
Рідка фракція	1,0	7,6	37,5	—	0,06	0,04	0,12
NIP ₀₅	0,29	0,29	0,76	—	0,03	0,01	0,03

Примітка: Над ризикою — на сиру речовину, під ризикою — на суху речовину.

На фоні низької зольності дігестату виявлено високий вміст загального вуглецю (понад 30%). У рідкій фракції ефлюенту після переробки жому міститься C_{зар} 11%, після зброджування кукурудзяного силосу — 20%. Рідка фракція гною свиней та підстилкового гною ВРХ і тверда фракція суміші (шлам дегідрований, силос сорговий, курячий послід з підстилкою) (3-тя БГУ) у своєму складі містять найбільшу кількість загального вуглецю із дослідженої сировини.

Установлено, що після анаеробного зброджування рідка та тверда фракції, що утворилися після сепарації, набагато більше збагачені амонійним азотом (найдоступнішою для рослин формою азоту), ніж вихідна сировина.

Так, рідка та тверда фракції жому та кукурудзяного силосу містять у своєму складі 0,13–0,2% амонійного азоту (на сиру речовину), тоді як вихідна сировина — не більше 0,02–0,03%. Амонійна форма азоту

утворюється в результаті процесу розкладу азотистих органічних сполук вихідної сировини. Рідка та тверда фракції суміші (шлам дегідрований, силос сорговий, курячий послід з підстилкою) після сепарації теж характеризуються збільшенням умісту амонійного азоту порівняно з вихідною сировиною на 42,9–60%.

На основі узагальнення результатів досліджень щодо агрохімічного складу рідкої та твердої фракцій БГУ доведено можливість їх ефективного застосування у виробництві органічних добрив. 1 т фугату містить: азоту — 0,6–7 кг, фосфору — 0,4–2,3, калію — 1,2–4,2, вуглецю — 68–204 кг. З 1 т дігестату до ґрунту надходить: азоту — 11,8–15,3 кг, фосфору — 5,4–66,5, калію — 4,9–12,2, вуглецю — 315–335 кг.

Відпрацьовану біомасу з БГУ рекомендовано застосовувати як органічне добриво способом поєднання фугату або дігестату

з органічними компонентами. Додатковими компонентами можуть бути глинисті мінерали (бентоніт), тверді або рідкі відходи тваринництва (гній, послід), за потреби вологопоглинальний матеріал (торф, солома) та додавання мікроорганізмів за певного температурного режиму (не більше 60°C) для захисту біологічно активних речовин від теплового руйнування. За потреби тверді частинки відпрацьованої біомаси та органічної сировини подрібнюють на молоткових дробарках, проводять кероване аерокондиціонування. Під час виготовлення органічних добрив потрібно дотримуватися співвідношення рідкої/твердої фракції відходів БГУ на рівні 1–1,5.

Органічні добрива на основі відходів БГУ мають істотний удобрювальний потенціал і будуть ефективні за умов внесення на середньо- та слабокислих ґрунтах (з рН 4,6–5,0 та 5,1–5,5) під пшеницю озиму, гречку, сою та овочеві культури (капусту, цибулю, огірки, моркву, помідори).

Висновки

Досліджувані відходи біогазових установок, що працюють на різній сировині (жомі, кукурудзяному та сорговому силосах, гної свиней та підстилковому гної ВРХ, курячому посліді), за агрохімічними показниками не поступаються іншим сировинним ресурсам і мають істотний удобрювальний потенціал, особливо на кислих ґрунтах з огляду на їхню лужну реакцію. Установлено, що вміст азоту та калію в зразках фугату перевищує

відповідні показники дігестату, але вміст фосфору є вищим у твердій фракції (майже удвічі). За вмістом основних елементів живлення рослин ефлюент після анаеробного збродження силосу переважає відходи після переробки жому. Відходи БГУ характеризуються низькою зольністю та високим умістом загального вуглецю (до 37,8%), що підтверджує їхню цінність для потенційного гумусоутворення в ґрунтах.

Skrylnyk Ye.¹, Kutova A.², Hetmanenko V.³

National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemical Researches named after O.N. Sokolovsky», 4 Chaikivska Str., Kharkiv, 61024, Ukraine; e-mail: ¹orgminlab@gmail.com, ²kutova.ang@gmail.com, ³vg.issar@gmail.com; ¹ORCID: ¹0000-0002-8642-8547, ²0000-0003-2680-566X, ³0000-0001-9021-3373

Influence of anaerobic fermentation of organic waste to change the content of biogenic elements in the effluent biogas plant

Goal. To establish the influence of anaerobic fermentation of plant and animal origin on changes in the content of biogenic elements in the liquid and

solid fractions of effluent after the production of biogas.

Methods. Analytical, calculation, mathematical-statistical. **Results.** It is established that the transformation of organic compounds in anaerobic fermentation process causes an alkaline reaction of biogas effluent. Comparing samples of the liquid fraction (fugate) and the solid fraction (digestat) of waste biogas production from different raw materials (bagasse, corn, and sorghum silage), it is determined that the content of nitrogen and potassium in the samples of discharge exceeds the corresponding figures of digestat, but the phosphorus content is higher in digestat (almost double). As to the content of biogenic elements the effluent after anaerobic fermentation of silo is better than the waste after

processing the pulp. Liquid and solid fractions of the waste of biogas plant are enriched with ammonium nitrogen compared with the raw material more than on 40–60% (depending on raw material). Fugate contains less than 5% of solids and a major amount of potassium. Up to 80% of the mass fraction of nitrogen in fugate is in its ammonium form. On the background of low ash content of digestat the content of total carbon is high (over 30%). **Conclusions.** The studied wastes of biogas plants which work on raw materials

of plant and animal origin on agrochemical indicators are not worse than other raw materials and have a high fertilizing potential, especially in acidic soils, because of their alkaline reaction. Waste of biogas plants is characterized by low ash content and high content of total carbon, which confirms their value to potential humus creation ability in soils.

Key words: raw materials, total carbon, humus, digestat, fugate.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202003-10>

Бібліографія

1. Arthurson V. Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land — potential benefits and drawbacks. *Energies*. 2009. V. 2. P. 226–242. doi: 10.3390/en20200226
2. Seadi T.A.I., Lukehurst C.T. Quality management of digestate from biogas plants used as fertilizer. *IEA Bioenergy*. 2012. 38 p.
3. Садчиков А.В. Применение метанового эфлюента для восстановления естественного цикла агрогеосистем. *Успехи современного естествознания*. 2017. № 1. С. 72–76.
4. Kuszal M., Lorencowicz E. Agricultural use biogas digestate as a replacement fertilizers. *Agricultural and Agricultural Science Procedia*. 2015. V. 7. P. 119–124.
5. Cavalli D., Cabassi G., Borrelli L. et al. Nitrogen fertilizer replacement value of undigested liquid cattle manure and digestates. *European J. of Agronomy*. 2016. V. 73. P. 34–41. doi: 10.1016/j.eja.2015.10.007
6. Riva C., Orzi V., Carozzi M. et al. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of The Total Environment*. 2016. V. 547. P. 206–214. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.156
7. Kumar S., Malav L.C., Malav M.K. et al. Biogas Slurry: Source of Nutrients for Eco-friendly Agricultural. *International J. of Extensive Research*. 2015. V. 2. P. 42–46.
8. Helias A., Brockmann D. Use of fertilizing residues by agricultural activities in LCA studies. Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector. 2014. P. 523–532.
9. Alfa M.I., Adie D.B., Igboro S.B. et al. Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renewable Energy*. 2014. V. 63. P. 681–686. doi: 10.1016/j.renene.2013.09.049
10. Comparetti A., Febo P., Greco C. Current state and future of biogas and digestate production. *Bulgarian J. of Agricultural Science*. 2013. V. 19. № 1. P. 1–14.
11. Eickenscheidt T., Freibauer A., Heinichen J. et al. Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions affected by N availability from grasslands on drained fen peatlands and associated organic soil. *Biogeosciences*. 2014. V. 11. Is. 12. P. 6187–6207. doi: 10.5194/bg-11-6187-2014
12. Song T.A., Dragicevic I., Linjordet R. et al. Recycling of biogas digestates in plant production: NPK fertilizer value and risk of leaching. *International J. of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2018. V. 7. Is. 1. P. 49–58. doi: 10.1007/s40093-017-0188-0
13. Qi G., Pan Z., Sugawa Y. et al. Comparative fertilizer properties of digestates from mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of manure: focusing on plant growth promoting bacteria (PGPB) and environmental risk. *J. of Material Cycles and Waste Management*. 2018. № 20. Is. 3. P. 1448–1457. doi: 10.1007/s10163-018-07087
14. Mukhuba M., Roopnarain A., Adeleke R. et al. Comparative assessment of bio-fertilizer quality of cow dung and anaerobic digestion effluent. *Cogent Food&Agriculture*. 2018. V. 4. P. 14–35.
15. Тарасов С.И., Ковалев Д.А., Караева Ю.В. Применение эфлюента биогазовой установки в качестве удобрения для органического земледелия. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 1. С. 91–97. doi: 10.18286-1816-4501-2018-3-91-97
16. Macadi M., Tomocsik A., Orocz V. Digestate: A New Nutrient Source — Review. *Biogas. Croatia: In Tech*, 2012. P. 295–310. doi: 10.5772/31355