УДК 62.404 DOI 10.31548/energiya2020.06.005

# ВПЛИВ ПОДРІБНЕННЯ СОЛОМИ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИХОДУ БІОГАЗУ

***М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор***

***Національний університет біоресурсів і природокористування України***

***П. Б. Клендій, кандидат технічних наук, доцент***

***Г. Я. Клендій, старший викладач***

***ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»***

*E-mail: pklen_@i.ua*

**Анотація.** *Солома має високу енергетичну місткість, але вона не є ідеальною для роботи біогазових станцій, оскільки містить велику кількість безазотистих речовин, і всього 4–6 % азоту та мінеральних солей, але за умови її відповідної попередньої підготовки можна скоротити час зброджування і збільшити вихід біогазу.*

*Позитивними результатами попередньої обробки біологічної сировини є висока ступінь подрібнення і гомогенізації сировини; зменшення періоду зброджування біомаси; вивільнення природних ензимів, які є біологічними каталізаторами процесу зброджування біомаси; стабілізація біологічних процесів, що призводить до відсутності піноутворення і плаваючою кірки у верхній частині біореактора; процентний вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 %.*

*Мета дослідження – визначення інтенсивності метанового бродіння подрібнених гречаної, ріпакової, соєвої соломи та кукурудзяних стебел в залежності від розміру подрібнених частинок та способу подрібнення.*

*В статті розглядається питання визначення динаміки виходу біогазу в залежності від способу та геометричних розмірів подрібнення соломи гречки, сої, ріпаку та кукурудзяної січки при мезофільному режимі зброджування. Для підготовки соломи використовували такі пристрої: ножиці, молоткову дробарку, кормовий подрібнювач та екструдер. Додатково проводилось замочування у воді при певній температурі. Підготовлену біомасу разом із затравкою в пропорції 1:4 закладали в лабораторні ферментер-пакети та термостат. Вимірювання виходу біогазу проводили протягом 42 діб за спеціальними методиками, які запатентовані в Україні. За результатами вимірювань побудовані графіки, що характеризують динаміку виходу біогазу.*

**Ключові слова:** ***солома зернових і зернобобових культур, спосіб подрібнення, біогаз, субстрат, метаногенез***

**Актуальність.** Солома є побічним продуктом вирощування різних сільгоспкультур, насамперед — зернових і зернобобових. Площа в Україні під

зерновими і зернобобовиими культурами в 2020 році за даними Держстату склала 15,4 млн га. У кінцевому результаті їхнього вирощування, окрім основної продукції, щороку отримують 78–95 млн т соломи і ця кількість із підвищенням урожайності різних культур із року в рік зростає.

Солома зернових і зернобобових культур у вигляді солом'яних тюків, різки або гранул (пелет) є хорошим енергоносієм. За своєю теплотворною здатністю спалювання 2,34 кг соломи рівнозначне спалюванню 1 кубічного метру природного газу, тому її використання для задоволення енергетичних потреб промислових підприємств, ферм або елеваторів обійдеться утричі дешевше порівняно з природним газом. Солома – це нейтральне паливо щодо утворення $CO_2$, і саме тому вона може відігравати важливу роль у ланцюжку вироблення й постачання «зеленої», тобто екологічно безпечної енергії. До того ж солома – це поновлюваний ресурс, адже поки вирощують зернові культури – буде й солома.

Важливу роль у регулюванні гумусового балансу відіграє внесення гною. Однак через скорочення поголів'я великої рогатої худоби в Україні знизилися обсяги виробництва гною і зменшилося його внесення з 6,5 т/га в 1990 р. до 0,5 т/га в 2020 р. Гідною альтернативою інтенсивному використанню ґрунту може стати розробка екологічно безпечних систем землеробства, які дають змогу вирощувати екологічно чисту продукцію одночасно підвищуючи ґрунтову родючість.

Застосування соломи як альтернативи традиційним органічним добривам вивчали багато вітчизняних та зарубіжних учених. У країнах із розвиненим сільськогосподарським виробництвом основну масу післяжнивних решток застосовують як добриво і лише незначну частку спалюють. Приміром, у Німеччині спалюють лише 5 % соломи, а 4 5% використовують як органічне добриво. У Франції спалюють 12 %, решту застосовують у тваринництві або загортають у ґрунт як добриво. Такою ж є тенденція в Бельгії, Великій Британії, Нідерландах, Люксембурзі. У Великій Британії використання соломи порівняно з попередніми роками зросло у 18 разів.

Солома гуміфікується гірше за кореневі рештки за розкладання кореневих та післяжнивних решток зернових культур. Через відносно низький вміст в їхньому складі азоту процеси мінералізації переважають над процесами гуміфікації, оскільки безазотисті гумусові сполуки нестійкі і досить швидко мінералізуються. Встановлено, що для кореневих решток озимої пшениці коефіцієнт гуміфікації знаходиться в межах 0,15 – 0,18, а для соломи – близько 0,10.

До негативних властивостей соломи слід віднести її депресивну дію на культуру, під яку вона вносилась як добриво. Встановлено, що крім широкого співвідношення C:N, інгібувальна дія пов'язана з присутністю у соломі розчинних форм органічних сполук. Водна витяжка зі свіжої соломи затримує розвиток рослин. У соломі і продуктах її розкладання виявлено ряд похідних фенолу, які мають токсичний вплив на рослини. У ґрунті продукти розкладання соломи – ванілінова, кумарова і бензойна кислоти помітно інгібують ріст рослин. Фітотоксичний ефект продуктів розкладання соломи проявляється у затримці росту коріння, порушенні обміну речовин, хлорозі. Крім фенольних сполук, за розкладання соломи утворюється низка органічних кислот: мурашина, оцтова, молочна, масляна, щавлева, бурштинова, валеріанова та інші,  які шкідливо впливають на розвиток кореневої системи рослин.

Цих негативних впливів можна уникнути і одночасно підвищити ефективнність, якщо солому переробляти в біогазовій установці, оскільки окрім високоякісного  органічного добрива виробляється також біометан.

Попри свою високу енергетичну місткість, солома, як сировина, не є ідеальною для роботи біогазових станцій, оскільки вона містить велику кількість безазотистих речовин, зокрема 33–35 % целюлози, 21–22 % геміцелюлози, 18–22 % лігніну, 3–5 % білків і всього 4–6 % азоту та мінеральних солей, але за умови її відповідної попередньої підготовки можна скоротити час зброджування і збільшити вихід біогазу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Процес зброджування напряму залежить від складу субстрату і відображається на кількість отриманого біогазу. Чим складніша структура субстрату, тим довше проходить процес зброджування.

Зазвичай величина його знаходиться в межах від 30-70 %, а для осередненого періоду складає до 60 % [1].

Целюлоза і геміцелюлоза мають широко розгалужену структуру і розкладаються повільно. Лігнін, одеревінівша речовина в рослинах, кількість якої збільшується з віком рослин і розкладається бактеріями дуже погано, оскільки лігнін стійкий навіть до кислот. На ефективність роботи БГУ великий вплив робить попередня підготовка вихідного субстрату. Чим менше розміри частинок органічних компонентів вихідної сировини, тим більше їх питома поверхня і відповідно інтенсивніше відбуваються процеси зброджування.

Позитивними результатами попередньої обробки біологічної сировини є висока ступінь подрібнення і гомогенізації сировини; зменшення періоду зброджування біомаси та, як наслідок, можливість будівництва БГУ менших розмірів, що призводить до значної економії капітальних витрат; вивільнення природних ензимів, які є біологічними каталізаторами процесу зброджування біомаси; стабілізація біологічних процесів, що призводить до відсутності піноутворення і плаваючою кірки у верхній частині біореактора; процентний вміст метану в біогазі збільшується до 70-75 % [2].

Оскільки розклад органічної речовини обумовлений розвитком мікроорганізмів, ріст яких описується кінетичними рівняннями [3], а також вважаючи, що швидкість розкладу органічної речовини під час біогазової ферментації пропорційна кількості нерозкладеної органічної речовини [4], що ще може бути розкладена, кінетичне рівняння анаеробної ферментації органічної біомаси в диференційній формі буде мати вигляд:

$$\frac{dQ}{dt} = -k(Q - Q^*)$$

де $Q$ − вміст органічної речовини біомаси, що не розклалася на поточний момент часу біогазової ферментації, кг; $Q^*$ − уміст органічної речовини біомаси, яка не розкладається під час біогазової ферментації, кг; $k$ − параметр процесу біогазової ферментації, який характеризує її швидкість, 1/діб; $t$ − час біогазової ферментації, діб.

Розв'язок диференціального рівняння визначає вміст органічної речовини, що не розклалася на поточний момент часу [5]:

$$Q = Q^* + (Q_0 - Q^*)\exp(-kt)$$

де $Q_0$ – загальний уміст органічної речовини біомаси на початок біогазової ферментації, кг.

А кількість органічної речовини біомаси, яка розклалася на поточний момент часу, становить:

$$Q_0 - Q = \left(Q_0 - Q^*\right)[1 - \exp(-kt)].$$

Привівши кількість органічної речовини, що розклалася на поточний момент часу, до загального вмісту органічної речовини на початок біогазової ферментації, одержимо формулу для визначення рівня розкладу органічної речовини на поточний момент часу

$$g = g_0[1 - \exp(-k\tau)],$$

де $g_0 = \frac{Q_0 - Q^*}{Q_0}$ – максимальний рівень розкладу органічної речовини в процесі анаеробної ферментації у відносних одиницях.

**Мета дослідження** – визначення інтенсивності метанового бродіння подрібнених гречаної, ріпакової, соєвої соломи та кукурудзяних стебел в залежності від розміру подрібнених частинок та способу подрібнення.

**Матеріали та методи дослідження.** Як вихідний матеріал для приготування субстрату використовували солому гречки (wCP=90,89 %, wOCP=93 %), ріпакову солому (wCP=89,56 %, wOCP=92 %), солому сої (wCP=89,56 %, wOCP=99 %), кукурудзяні стебла (wCP=89,11 %, wOCP=92,4 %), які були взяті з індивідуальних господарств Тернопільської області. Підготовку соломи до бродіння проводили так: подрібнювали за допомогою ножниць, молоткової дробарки, кормового подрібнювача та екструдера, для замочування брали солому до води у співвідношенні 1: (1-1,3). Солому витримували у воді за певної температури у сушильній шафі.

Визначення величин CP, OCP, фракційного складу та pH середовища проводилися за відповідними стандартами.

Як джерело метанових бактерій (затравка) використовували перебродженy гноївку ВРХ з ферментера біогазової установки інституту, %; wCP = 1,7 %; pH=7,7.

Для вимірювання об'єму біогазу використовували методику В. В. Криворучко, запатентовану в Україні. У ферментер–пакет, який виготовлений з газонепроникного полімерного матеріалу у вигляді прямокутника 250 мм×400 мм (виробництва Австрії), завантажили випробувану біомасу і затравку в пропорції 1:4, після чого витісняли повітря із ферментер–пакета шляхом опускання його в рідину і термічно заклеювали за допомогою спеціального приладу. До запаяного пакета підвішували гирю, а пакет опускали у вимірювальний циліндр. У результаті визначено початковий об'єм досліджуваного варіанта. Далі ферментер–пакети підвішували у термостат і витримували 42 доби за температури 37,5 °С. Вимірювання об'єму пакетів проводили кожні сім днів.

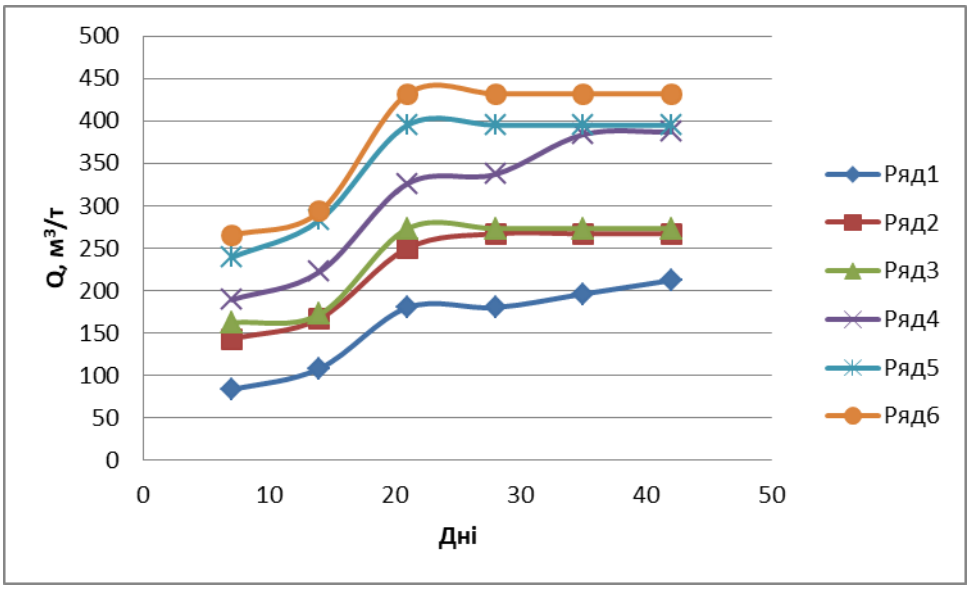


**Рис. 1. Динаміка виходу біогазу з гречаної соломи та кукурудзяних стебел:** 1 – січка гречаної соломи (*L*=30 мм); 2 – екструдована гречана солома (1-р, середній розмір 19,6мм х 1,8 мм); 3 – екструдована гречана солома (2-р, середній розмір 13,4мм х 1,8 мм); 4 – січка кукурудзяних стебел (середній розмір 28,5 мм х 8,0 мм); 5 – екструдована січка кукурудзяних стебел (1-р, середній розмір 13,5мм х 2,7мм); 6 - екструдована січка кукурудзяних стебел (2-р, середній розмір 9,3мм х 1,7мм)

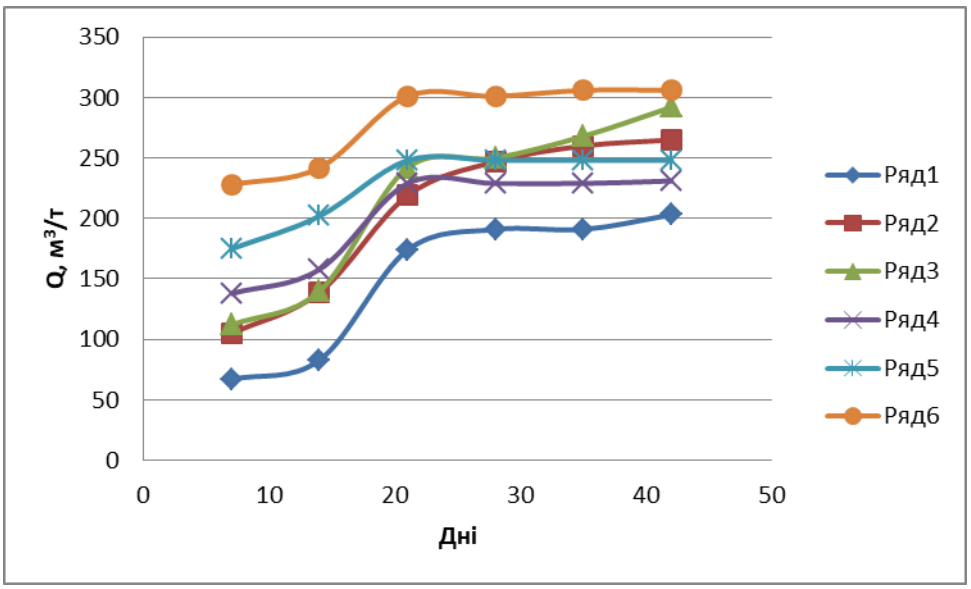


**Рис. 2. Динаміка виходу біогазу з ріпакової та соєвої соломи:**

1 – січка ріпакової соломи (середній розмір 28,5 мм х 1,5мм); 2 – екструдована січка ріпакової соломи (1-р, середній розмір 15,1мм х 1,1 мм); 3 – екструдована січка ріпакової соломи (2-р, середній розмір 10,6мм х 1,0 мм); 4 – січка соєвої соломи (довжина 30 мм); 5 – екструдована солома сої (1-р, середній розмір 13,2мм х 1,2 мм); 6 – екструдована солома сої (2-р, середній розмір 11,2х 1,0 мм).

**Результати досліджень та їх обговорення.** Результати проведених досліджень показали, що попередня підготовка соломи гречки, ріпаку, сої та кукурудзяних стебел підвищує доступність гідролітичних ферментів до полімерних вуглеводів, що призводить до розщеплення лігніноцелюлози і збільшення виходу біогазу. Для порівняння залежності виходу біогазу від способу подрібнення використовували лабораторний ножовий подрібнювач та екструдер. Після першого методу обробки отримано середній розмір січки 28,5 мм, а після другого – солома гречки - 19×1,8 мм, кукурудзяних стебел – 13,4х1,8 мм, ріпакової соломи 10,6х1,1 мм, соломи сої – 13,2х1,2 мм. Встановлено, що після екструзії довжина стебла зменшилась майже у 2 рази, а вихід біогазу із соломи гречки становив 212 м$^3$/т. При використанні екструдованої січки виділено 267 м$^3$/т біогазу протягом 42 діб метанового бродіння, відповідно, кукурудзяних стебел – 387 м$^3$/т і 395 м$^3$/т, ріпакової соломи – 203 м$^3$/т і 265 м$^3$/т, соломи сої – 231 м$^3$/т і 248 м$^3$/т. На основі отриманих даних побудовані графіки динаміки виходу біогазу в різні періоди ферментації (рис. 1 і рис. 2).

Проаналізувавши результати лабораторного дослідження отримання біогазу з соломи, можна стверджувати, що його вихід залежить не лише від довжини стебла, а й від способу подрібнення та різниці між найбільшими і найменшими частинками січки, оскільки менші параметри стебла були отримані після екструзії, в результаті чого одержано більший вихід біогазу.

**Висновки і перспективи.** При використанні подрібненної соломи вихід біогазу зростає в середньому на 30-35 %, а тривалість зброджування скорочується майже в 2 рази.

Проведені експерименти показують, що попередня підготовка соломи до ферментації дозволяє переробити більшу кількість субстрату при одностадійному зброджувані і покращує техніко-економічні показники біогазової установки.

## Список використаних джерел

1. Предварительная подготовка субстрата для биогазових установок [Електронний ресурс]. Режим доступу URL https: //nomitech.ru/articles-and-blog/predvaritelnaya_ podgotovka_substrata_lya biogazovykh_ustanovok/

2. Шацький В. В. Вплив структури субстрату на вихід біогазу при метановому зброджуванні / В. В. Шацький, О. Г. Скляр, Р. В. Скляр, О. О. Солодка // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 13, том 3. – С. 3 – 12.

3.Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торнли: пер. с англ. А. С. Калянского. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

4. Огороднік А. І. Кінетична модель процесу компостування субстрату у рибництві / А. І. Огороднік, Г. А. Голуб // Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Механізація та електрифікація сільського господарства». – 1997. – Вип. 82. – С. 67–70.

5. Біогаз [Електронний ресурс] – Режим доступу URL https: http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/5144/1/Biogaz_TM7.pdf

## References

1. Predvaritel’naya podgotovka substrata dlya biogazovikh ustanovok [Preliminary preparation of the substrate for biogas plants]. Avalaible at: URL https: //nomitech.ru/articles-and-blog/predvaritelnaya_ podgotovka_substrata_lya biogazovykh_ustanovok /

2. Shatskiy, V. V., Sklyar, O. G., Sklyar, R.V., Licorice, O.O. (2013). Vplyv struktury substratu na vykhid biohazu pry metanovomu zbrodzhuvanni [Injection of the structure to the substrate on the output of biogas in case of methane zbrodzhuvanny]. Pratsi Taurian sovereign agro-technological university, 13 (3), 3 - 12.

3.France, J., Thornley, J. H. M. (1987). Matematicheskiye modeli v sel'skom khozyaystve [Mathematical models in agriculture]. Moskow: Agropromizdat, 400.

4. Ogorodnik, A. I., Golub G.A. (1997). Kinetychna model protsesu kompostuvannia substratu u rybnytstvi [Kinetic model of the process of composting the substrate in ribs]. Interdisciplinary thematic science book "Mechanism and electrification of the Silskoy Gospodarstva", 82, 67–70.

5. Biohaz [Biogaz]. Avalaible at: URL https: http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/5144/1/Biogaz_TM7.pdf

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СОЛОМЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫХОДА БИОГАЗА

***Н. Н. Заблодский, П. Б. Клендий, Г. Я. Клендий***

**Аннотация.** *Солома имеет высокую энергетическую емкость, но она не является идеальной для работы биогазовых станций, поскольку содержит большое количество безазотистых веществ и всего 4-6% азота и минеральных солей, но при условии ее соответствующей предварительной подготовки можно сократить время сбраживания и увеличить выход биогаза.*

*Положительными результатами предварительной обработки биологического сырья является высокая степень измельчения и гомогенизации сырья; уменьшение периода сбраживания биомассы; высвобождение природных энзимов, которые являются биологическими катализаторами процесса сбраживания биомассы; стабилизация биологических процессов, что приводит к отсутствию пены и плавающей корки в верхней части биореактора; процентное содержание метана в биогазе увеличивается до 70-75 %.*

*Цель исследования - определение интенсивности метанового брожения измельченных гречневой, рапсовой, соевой соломы и кукурузных стеблей в зависимости от размера измельченных частиц и способа измельчения.*

*В статье рассматривается вопрос определения динамики выхода биогаза в зависимости от способа и геометрических размеров измельчения соломы гречихи, сои, рапса и кукурузной сечки при мезофильном режиме сбраживания. Для подготовки соломы использовали следующие устройства: ножницы, молотковую дробилку, кормовой измельчитель и экструдер. Дополнительно проводилось замачивание в воде при определенной температуре. Подготовленную биомассу вместе с затравкой в пропорции 1: 4 закладывали в лабораторные ферментер-пакеты и термостат. Измерение выхода биогаза проводили в течение 42 суток по специальным методикам, которые запатентованы в Украине. По результатам измерений построены графики, характеризующие динамику выхода биогаза.*

**Ключевые слова:** ***солома зерновых и зернобобовых культур, способ измельчения, биогаз, субстрат, метаногенез***

## EFFECT OF CHOPPING STRAW ON THE INTENSITY OF BIOGAS OUTPUT

***M. Zablodsky, P. Klendiy, G. Klendiy***

**Abstract.** *Straw has a high energy capacity, but it is not ideal for the operation of biogas plants, since it contains a large amount of nitrogen-free substances, and only 4-6%*

*nitrogen and mineral salts, but if it is properly pretreated, it is possible to reduce the fermentation time and increase the biogas yield.*

*The positive results of pretreatment of biological raw materials are a high degree of grinding and homogenization of raw materials; reduction of the biomass fermentation period; the release of natural enzymes that are biological catalysts for the fermentation of biomass; stabilization of biological processes, which leads to the absence of foam and floating crust in the upper part of the bioreactor; the percentage of methane in biogas increases to 70-75 %.*

*The aim of the study is to determine the intensity of methane fermentation of crushed buckwheat, rapeseed, soybean straw and corn stalks, depending on the size of crushed particles and the method of grinding.*

*The article discusses the issue of determining the dynamics of biogas output depending on the method and geometric dimensions of grinding buckwheat straw, soybeans, rapeseed and corn chaff in a mesophilic mode of fermentation. The following devices were used to prepare the straw: shears, hammer mill, feed chopper and extruder. Additionally, soaking was carried out in water at a certain temperature. The prepared biomass together with the seed in a ratio of 1: 4 was put into laboratory fermenter bags and a thermostat. The biogas yield was measured for 42 days using special methods, which are patented in Ukraine. Based on the measurement results, graphs were built that characterize the dynamics of biogas output.*

**Key words:** ***straw of grain and leguminous crops, grinding method, biogas, substrate, methanogenesis***