

УДК 662.767.2; 631.572

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ВИХОДУ БІОГАЗУ В ПРОЦЕСІ ПЕРІОДИЧНОГО МЕТАНОВОГО БРОДІННЯ СОЛОМИ

П.П. Кучерук¹, кандидат технічних наук,

Ю.Б. Матвєєв¹, кандидат фізико-математичних наук, В.О. Рудська², студент.

¹Інститут технічної теплофізики НАН України

03057 м. Київ, вул. Желябова 2А.

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»

03056 м. Київ, пр-т Перемоги 37.

Визначено потенціал виходу біогазу зі зразків гранул соломи пшениці, сої та ріпаку. Проаналізовано вплив механічного подрібнення, а також екструзії соломи пшениці на потенціал та швидкість утворення біогазу. Для аналізу констант швидкості виходу біогазу було використано рівняння розпаду першого порядку. Бібл. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: метанове бродіння, біогаз, константа швидкості виходу біогазу, потенціал виходу біогазу, солома, гранули.

EXPERIMENTAL STUDY OF BIOGAS OUTPUT PARAMETERS IN THE BATCH ANAEROBIC DIGESTION OF STRAW

P. Kucheruk¹, candidate of technical sciences, Yu. Matveev¹, candidate of physics and mathematics, V. Rudska², student.

¹Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine

03057, 2A Zhelyabova Street, Kyiv, Ukraine.

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

03056, 37 Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine.

The paper determines the potential of biogas yield from pellets of wheat straw, soybean straw and rape straw. The influence of mechanical grinding and extrusion of wheat straw on the potential and kinetics of biogas yield is analyzed. To analyze the rate constants of biogas generation, the first-order decay equation was used. References 15, tables 2, fig. 3.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, biogas generation rate constant, biogas yield potential, straw, pellets.



П.П. Кучерук
P. Kucheruk

Відомості про автора: старший науковий співробітник відділу теплофізичних проблем біоенергетики Інституту технічної теплофізики НАН України

Освіта: Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна. Магістр за спеціальністю «Водопостачання, водовідведення, раціональне використання та охорона водних ресурсів». Інститут технічної теплофізики НАН України.

Кандидат технічних наук (PhD) за спеціальністю «Перетворювання відновлюваних джерел енергії» (2016).

Наукова діяльність: технології та економіка виробництва та енергетичної утилізації біогазу, технології очистки стічних вод, оцінка викидів парникових газів в сфері поводження з відходами та побічною продукцією АПК та комунального господарства.

Position and place of work: Senior Scientist, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine

Education: National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne, Ukraine. Has a master's degree on water supply, sewerage, rational use and protection of water resources (2000). Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. PhD in renewable energy conversion.

Research area: technological and economical aspects of production and utilization of biogas as energy source, wastewater treatment technologies, estimation of greenhouse gas emissions when handling waste /by-products of agro-industrial complex and municipal economy.

Publications: 29.

Patents: 2.



Ю.Б. Матвєєв
Yu. Matveev

Публікації: 29.
Патенти: 2.
ORCID: 0000-0003-1888-0774
Контакти: тел.+38 (044) 456-62-82
факс +38 (044) 456-60-91
e-mail: admin@ittf.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-1888-0774
Contacts: phone +38 (044) 456-62-82
fax +38 (044) 456-60-91
e-mail: admin@ittf.kiev.ua

Відомості про автора: провідний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної Академії наук України.

Освіта: фізичний факультет Державного університету ім. Т.Г. Шевченка.

Наукова діяльність: поновлювані джерела енергії, отримання енергії з біомаси, анаеробне зброджування, збір та утилізація біогазу на полігонах і звалищах твердих побутових відходів (ТПВ), система управління ТПВ, енергозберігаючі технології та проблема зміни клімату.

Публікації: 85.
Патенти: 2.
ORCID: 0000-0003-2725-5612

Information about the author: research fellow in Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: Kiev State University, Physics Department.

Research area: renewable energy sources, energy from biomass, anaerobic digestion, landfill gas collecting and utilization, municipal solid waste management, energy conservation technologies, environmental protection and climate change.

Publications: 85.
Patents: 2.
ORCID: 0000-0003-2725-5612



В.О. Рудська
V. Rudska

Відомості про автора: студент магістратури в Університеті ім. Адама Міцкевича, м. Познань, Польща.

Освіта: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського». Бакалавр зі спеціальності «Біотехнологія».

Наукова діяльність: біотехнології очистки стічних вод та анаеробного зброджування.

Публікації: 4.
ORCID: 0000-0001-8639-0342

Information about the author: student of Master courses in University named after Adam Mickiewicz, Poznan, Poland.

Education: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. Bachelor in «Biotechnology».

Research area: biotechnologies of wastewater treatment and anaerobic digestion.

Publications: 4.
ORCID: 0000-0001-8639-0342

Вступ. Ефективна технологія виробництва біогазу з гноївки та посліду передбачає використання додаткових видів сировини, що дозволяє оптимізувати склад суміші, збільшувати потужність окремих біогазових заводів та загальне виробництво енергії з біогазу. Одним з найбільш поширених видів такої сировини на сьогоднішній день є силос кукурудзи. Перспективними видами сировини для виробництва біогазу, з огляду на масштаби утворення та поширеність, а також з урахуванням дотримання комплексу критеріїв сталого розвитку у виробництві енергії з відновлюваних джерел, в умовах України можуть бути також пожнивні рештки зернових та технічних культур (солома, стебла, тощо). Солому викорис-

товують як органічне добриво, підстилковий матеріал у тваринництві та в ряді інших сфер господарської діяльності. Використовують солому і як тверде паливо, переважно для безпосереднього спалювання з виробництвом теплової та /або електричної енергії. Втім, солома може бути також цінним енергетичним ресурсом для виробництва з неї біогазу шляхом метанового бродіння. Так, наприклад, професор Гізбуллін Н.Г. вважає найкращим варіантом використання соломи як палива – виробництво з неї біогазу [1].

Втім, на відміну від найбільш поширених видів сировини для виробництва біогазу (гноївка, силос кукурудзи, жом цукрових буряків тощо), попередньо не оброблена солома як сировина для

виробництва біогазу має ряд особливостей, що обумовлюють її обмежене використання. Солома пшениці, наприклад, містить в середньому 30–45% целюлози, 20–25% геміцелюлози, 15–20% лігніну, 1,5% жирів та 4,7% білків [2]. Очевидно, що основний потенціал перетворення органічної речовини соломи в біогаз пов'язаний зі споживанням (гемі-)целюлози, біодоступність якої обмежена нативною структурою лігно-целюлозних комплексів. В процесі метанового бродіння гідроліз лігно-целюлозних комплексів є лімітуючою стадією [3,4], що визначає загальну швидкість розпаду органічної речовини в біореакторі. Тому використання не обробленої соломи може суттєво позначитись на загальній кінетиці процесу та

призводити до збільшення необхідної тривалості бродіння. Окрім того, потрапляння такої соломи в технологічні ємності біогазової станції, що працює в найбільш поширеному квазі-проточному режимі, призводить до утворення щільного плаваючого прошарку, що важко піддається перемішуванню [5], а відтак створює технічні проблеми з завантаженням /вивантаженням сировини.

Попри це, використання соломи для виробництва біогазу може бути доцільним після її попередньої обробки. Існує цілий ряд досліджень впливу різних методів попередньої обробки лігно-целюлозної агро-біомаси на показники виходу біогазу (табл. 1).

Таблиця 1. Вихід CH_4 з соломи без обробки та при обробці різними методами

Table 1. Methane yields from untreated straw and straw treated by different methods

Тип соломи	Спосіб попередньої обробки	Вихід CH_4 , мл /гСОР	Посилання
Солома пшениці	Без обробки	189	[6]
– // –	Подрібнення (до розміру 0,5–1,0 мм)	275	[6]
– // –	Паро-вибуховий (15 хв при 180 °C, 1 кг соломи + 3 кг води)	331	[6]
– // –	Екструзія	245*	[7]
– // –	Екструзія з одночасним внесенням $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з розрахунку 150 кг CaO /т соломи	399*	[7]
– // –	Екструзія	224*	[8]
– // –	Екструзія, з додаванням 5% жому за масою	242*	[8]
Солома вівсяна	Вапнування	287	[9]
– // –	Паро-вибуховий	197	[9]
– // –	Обробка кислотою + паро-вибуховий	201	[9]
Солома рисова	Без обробки (частки 3–5 мм)	240	[10]
– // –	З додаванням фосфату, 155 мг P /л	250	[10]
Стебла кукурудзи	Без обробки	78	[11]
– // –	Витримування 20 діб в розчині з 8% NaOH + 5% аміаку + 4% карбонату (сечовини)	240	[11]
– // –	Без обробки	100	[12]
– // –	Обробка кислотами: 2% $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow$	176	[12]
	2% $\text{HCl} \rightarrow$	163	
	4% $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow$	145	
	3% $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow$	217	
– // –	Обробка лугом: 8% $\text{NaOH} \rightarrow$	164	[12]
	8% $\text{CaOH}_2 \rightarrow$	207	
	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow$	168	
Солома ріпакова	Без обробки	267	[13]
– // –	Обробка лугом NaOH (при 38 °C, 18 год)	316	[13]
– // –	Пророщування грибів (7 діб при 18 °C, з внесенням розчину: 1% KH_2PO_4 , 1% NH_4Cl , 0,2% карбонату, 1% NaHCO_3)	222	[13]

* – мл біогазу на 1 г СР

Усі методи (хімічні, фізичні, біологічні) направлені на підвищення біодоступності целюлози внаслідок руйнування лігно-целюлозних комплексів, збільшення питомої поверхні контакту та пористості матеріалу, зниження кристалічності целюлози. З наведених даних видно, що переважна більшість методів попередньої обробки лігно-целюлозної агро-біомаси в різній мірі дозволяє збільшити потенціал виходу біогазу.

Ідея використання значних обсягів соломи зернових культур для виробництва біогазу останнім часом все частіше застосовується на практиці. Так, в с. Черноземен (Болгарія) на БГУ потужністю 1,5 МВт_{ел}, біогаз виробляється з суміші гною ВРХ, силосу кукурудзи та соломи (сумарно 50 тис. т/рік суміші) [14]. Особливістю даної БГУ є система підготовки та завантаження соломи. Солома в тюкованій формі подається на конвеєрну лінію, що далі транспортує її до попереднього подрібнювача тюків, а вже звідти до молоткової дробарки. Молоткова дробарка дозволяє досить ефективно руйнувати трубчасту структуру соломи, що, в свою чергу, дозволяє запобігати утворенню щільного флотаційного шару в реакторі. З цією метою, в реакторах змонтовано спеціальні міксери лопатевого типу, що працюють в комбінації з міксерами пропелерного типу.

Прикладом успішного використання соломи пшениці у виробництві біогазу є також пілотний демонстраційний проект у м. Фоулум (Данія) [5]. Особливістю цього проекту є сумісне зброджування рідкої гноївки свиней та брикетованої соломи пшениці. Показано, що брикетування соломи дозволяє знижувати в'язкість зброджуваної маси в реакторі, а відтак більш повно та рівномірно змішувати вміст біореактора. Автори проекту відмічають, що проблем з перемішуванням вмісту реактора та утворенням щільного флотаційного шару не виникало навіть при доведенні концентрації сухих речовин в ньому до 14%. Окрім цього, брикетування соломи призводить до збільшення на 35% показника питомого виходу CH_4 ($0,277 \text{ нм}^3 \text{CH}_4 / \text{кг}$ сухої органічної речовини (COP) або $235 \text{ нм}^3 \text{CH}_4 / \text{т}$ соломи), у порівнянні з не обробленою соломой. Додавання соломи до гноївки дозволило суттєво знизити концентрацію H_2S в біогазі – з 1900 до 365 ppm, що є важ-

ливою перевагою у виробництві електроенергії з біогазу з використанням двигунів внутрішнього згоряння.

Найбільш інноваційною є технологія, запропонована в проекті VERBIO в м. Шведт (Німеччина) [15]. Цим проектом передбачається виробництво біогазу на основі моно-зброджування соломи без додавання інших ко-субстратів з подальшим виробництвом біометану та подачею його в мережу ПГ. В проекті передбачено спеціалізовану лінію підготовки та подачі соломи в формі прямокутних тюків. Проектна потужність біогазової станції складатиме 16,5 МВт (136 ГВт·год /рік). Для цього буде використовуватися 40 тис. т соломи на рік.

Метою цієї роботи є визначення експериментальним шляхом показників виходу біогазу зі зразків не обробленої, механічно подрібненої та соломи, обробленої методом екструзії.

Матеріали та методи. В роботі досліджено такі зразки соломи: 1) СП_н/п – солома пшениці неподрібнена ($L=10\text{--}150 \text{ мм}$; сухі речовини (CP)=89,0%; COP=91,54%); 2) СП_п – солома пшениці подрібнена в млині Reutch SM100 ($L<2 \text{ мм}$); 3) ПСП – солома пшениці екструдована (гранули $D=6,4 \text{ мм}$; CP=91,9%; COP=94,25%); 4) СПС_п – суміш подрібненої соломи пшениці (75% за масою) та соломи сої (25% за масою) (частка фракцій з $L<2 \text{ мм}$ – 52,7%, $L=2\text{--}5 \text{ мм}$ – 43,4%, $L>5 \text{ мм}$ – 3,8%; CP=85,6%; COP=93,89%); 5) ПСПС – суміш подрібненої соломи пшениці (75% за масою) та соломи сої (25% за масою) екструдована (гранули $D=6,4 \text{ мм}$; CP=91,9%; COP=91,46%); 6) ПСР – солома ріпаку екструдована (гранули $D=6,4 \text{ мм}$; CP=90,0; COP=90,63%). Усі зразки соломи та гранул з неї (крім СП_п) було надано ТОВ «Він-Пелета» (м. Турбів, Вінницька обл.). Як інокулят використано масу, отриману шляхом метанового бродіння органічних матеріалів у лабораторних умовах (CP=2,3%; COP=72,27%).

Підготовлені суміші з відношенням маси COP зразків соломи до маси COP інокуляту 0,50–0,55 (початкова концентрація COP соломи в сумішах $C_{\text{VS},0}=25,1\pm0,4 \text{ г}\cdot\text{кг}^{-1}$) витримувалися в герметичних системах реактор-евдіометр (рис. 1) при температурі $36\pm1 \text{ }^\circ\text{C}$. Об'єм біогазу вимірю-

вався періодично по мірі накопичення в евідіометрі, загальне число фіксацій показників евідіометра склало 30 разів. Склад біогазу в евідіометрі вимірювався за допомогою портативного цифро-

вого газоаналізатора типу Landtec GEM-500. Загальна тривалість періоду спостережень за ходом процесу метанового бродіння склала 58 діб (52 доби для ПСР).

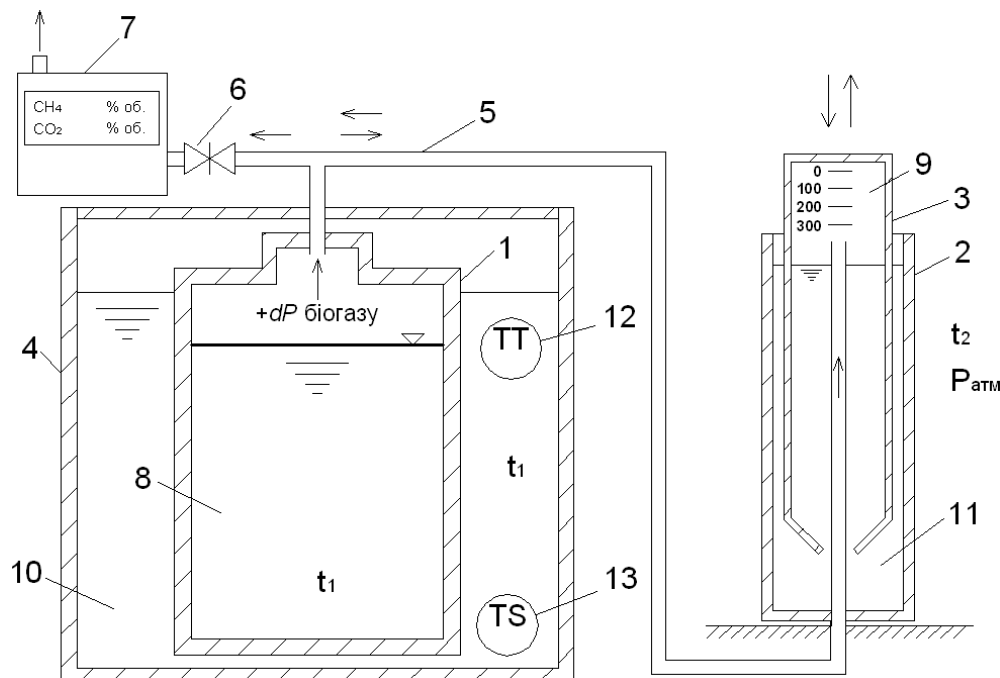


Рис. 1. Принципова схема дослідної установки для періодичного метанового бродіння: 1 – ємність біореактора ($V_{\text{роб}} = 2 \text{ дм}^3$); 2 – нерухома частина евідіометра; 3 – рухома частина евідіометра; 4 – ємність з теплоносієм; 5 – трубка з ПВХ; 6 – газовий запірний кран; 7 – газоаналізатор; 8 – робоче середовище біореактора; 9 – внутрішній простір евідіометра з біогазом; 10 – теплоносій (вода); 11 – 5% водний розчин NaCl; 12 – ртутний термометр; 13 – терморегулятор ($\Delta T = \pm 1^\circ \text{C}$).

Fig. 1. The principal scheme of experimental installation for batch anaerobic digestion: 1 - capacity of bioreactor ($V_{\text{rob}} = 2 \text{ dm}^3$); 2 - fixed part of eudiometer; 3 - moving part of eudiometer; 4 - capacity with coolant; 5 - PVC pipe; 6 - gas shut-off valve; 7 - gas analyzer; 8 - working environment of bioreactor; 9 - internal space of a biogas eudiometer; 10 - coolant (water); 11 - 5% aqueous solution NaCl; 12 - mercury thermometer; 13 - thermostat ($\Delta T = \pm 1^\circ \text{C}$).

Константи швидкості виходу біогазу k визначено методом узагальненого приведенного градієнту з використанням кінетичної моделі виходу біогазу 1-го порядку такого виду:

$$Q_{bg,VS,j} = Q_{bg,VS,T} \cdot (1 + 0.01\beta) \cdot (1 - \exp^{-k \cdot (\tau_j - T_{LAG})}),$$

де $Q_{bg,VS,j}$ – кумулятивний вихід біогазу на одиницю внесеної маси СОР власне субстратів на момент часу τ_j , л·кг⁻¹СОР; $Q_{bg,VS,T}$ – кумулятивний вихід біогазу на одиницю внесеної маси СОР власне субстратів на момент завершення періоду спостережень, л_н·CH₄·кг⁻¹СОР; β – частка залишкового виходу біогазу, % до $Q_{bg,VS,T}$; T_{LAG} – три-

валість лаг-фази, діб; k – константа швидкості виходу біогазу, доба⁻¹.

Результати досліджень та їх обговорення.

За результатами проведених досліджень встановлено, що зменшення лінійних розмірів фракцій соломи пшениці шляхом механічного подрібнення призводить до покращення кінетики виходу біогазу в періодичному процесі метанового бродіння, проте практично не позначається на величині біодоступного потенціалу виходу CH₄ на одиницю маси СОР (рис. 2). Разом з тим, екструзія соломи призводить як до покращення кінетики виходу біогазу, навіть у порівнянні з механічно подрібненою соломною, так і до збільшення величини біодоступного потенціалу виходу CH₄.

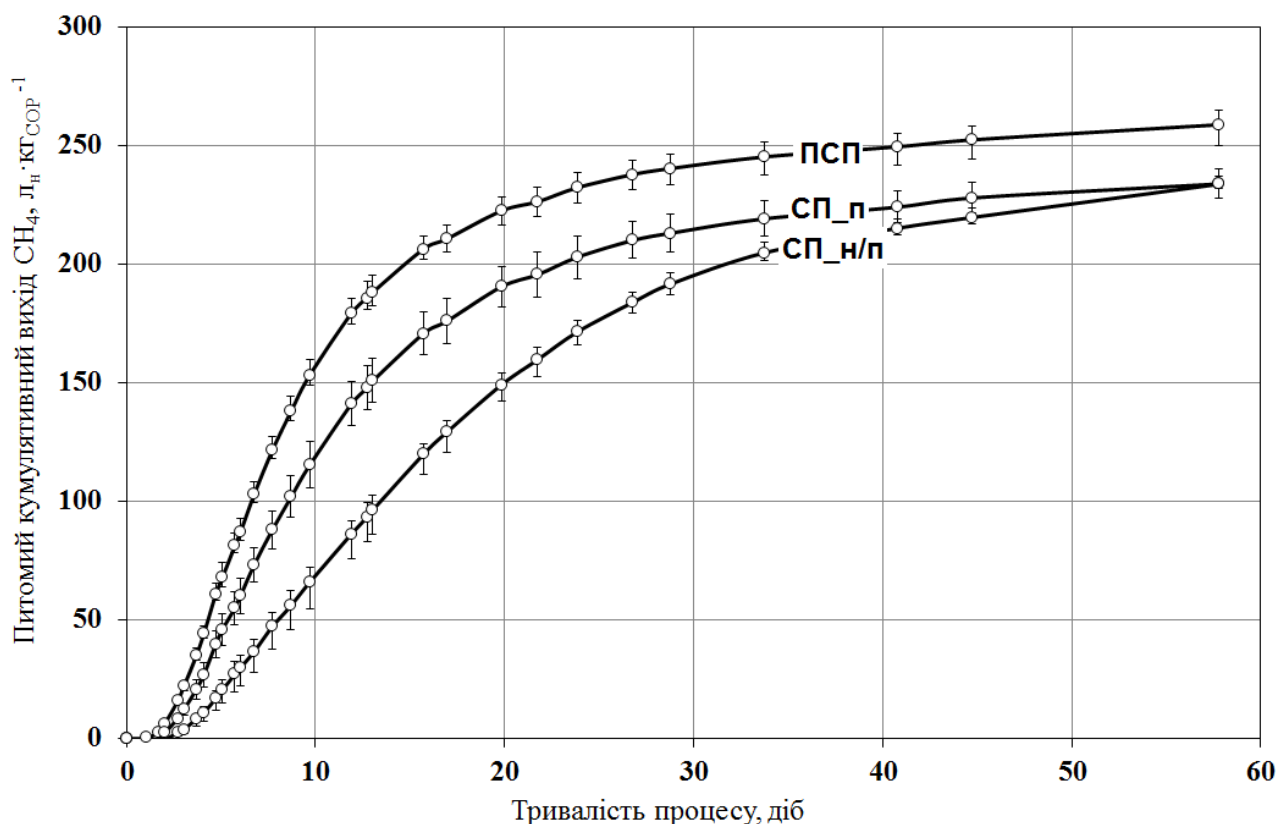


Рис. 2. Зміна питомого кумулятивного виходу CH_4 зі зразків соломи пшениці в часі.

Fig. 2. Specific cumulative methane yields from straw samples versus time.

З рис. 2 видно, що після завершення періоду лаг-фази процесу величина абсолютного приросту кумулятивного виходу CH_4 за рівні проміжки часу збільшується більш інтенсивно під час зброджування екструдованої соломи ПСП (в більшій мірі) та подрібнених зразків соломи СП_п (в меншій мірі), у порівнянні з не подрібненими зразками СП_н/п. Відповідно, досягається більш високе значення найвищої

кумулятивної швидкості виходу CH_4 при зброджуванні зразків ПСП ($0,130 \text{ Лн} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{доба}^{-1}$) та СП_п ($0,102 \text{ Лн} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{доба}^{-1}$), у порівнянні зі зразками СП_н/п ($0,066 \text{ Лн} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{доба}^{-1}$), і такі значення досягаються за порівняно менший проміжок часу, як видно з рис. 3. Подібні висновки можна зробити при порівнянні зразків екструдованої та механічно подрібненої суміші соломи пшениці та сої.

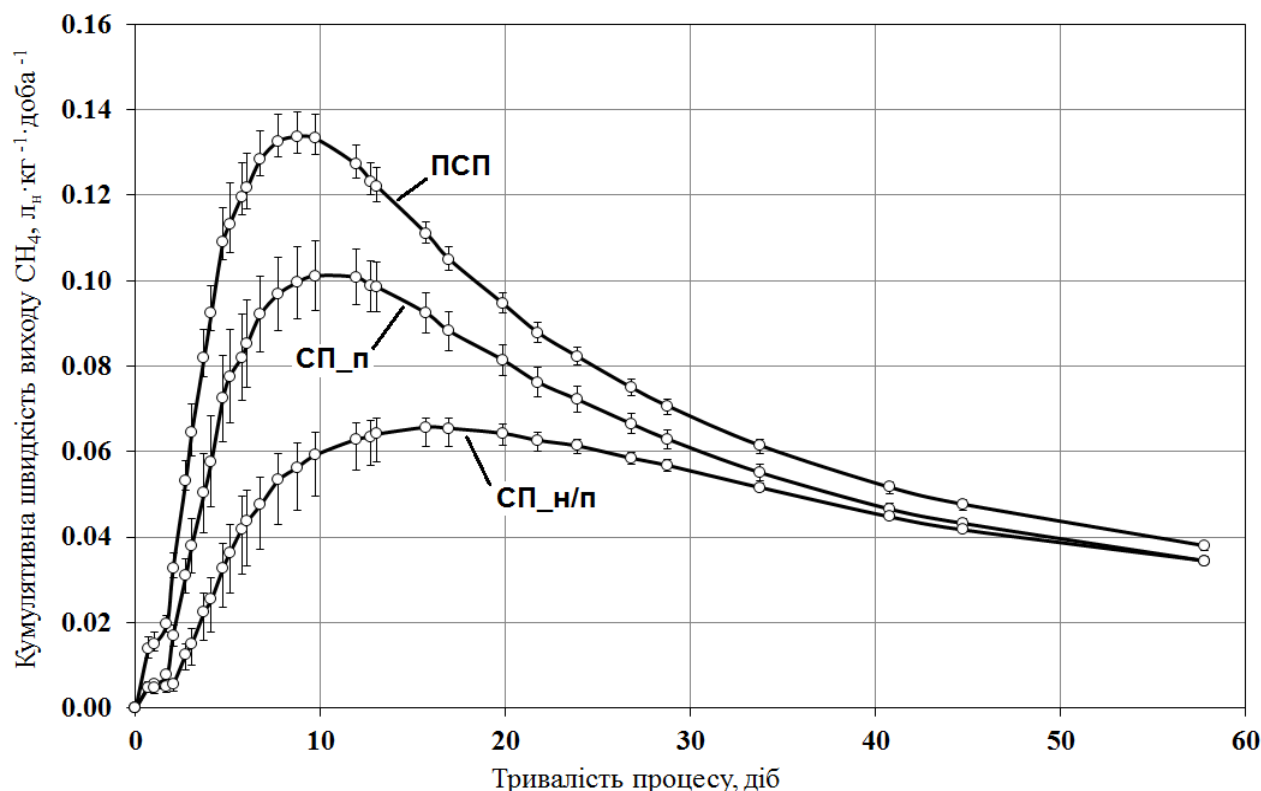


Рис. 3. Зміна кумулятивної швидкості виходу CH_4 в часі для зразків соломи пшениці.

Fig. 3. Cumulative rate of methane yields from straw samples versus time.

Серед досліджених, за показниками виходу біогазу /метану, найбільш результативним виявився зразок екструдованої соломи пшениці ПСП (табл. 2).

Таблиця 2. Показники виходу біогазу при періодичному метановому бродінні зразків соломи.

Table 2. Biogas output parameters under batch anaerobic digestion of straw samples.

Зразки соломи →	ПСП	СП_п	СП_н/п	ПСПС	СПС_п	ПСП
Показники ↓	n=5	n=2	n=3	n=3	n=3	n=2
Кумулятивний вихід біогазу (н.у.) на одиницю внесеної маси, $\text{л} \cdot \text{кг}^{-1}$	417 s=15	341 s=17	336 s=11	332 s=28	271 s=3	319 s=8
– // – на одиницю внесеної СОР, $\text{л} \cdot \text{кгСОР}^{-1}$	482 s=19	419 s=21	412 s=13	395 s=33	338 s=3	391 s=10
Кумулятивний вихід CH_4 на одиницю внесеної маси, $\text{л} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{кг}^{-1}$	228 s=8	191 s=7	191 s=2	184 s=22	146 s=5	177 s=0
– // – на одиницю внесеної маси СОР, $\text{л} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{кгСОР}^{-1}$	264 s=10	234 s=9	234 s=3	234 s=26	182 s=6	216 s=0
Ступінь конверсії СОР в біогаз, %	62,6 s=1,9	54,0 s=3,1	51,2 s=2,5	50,7 s=3,1	42,9 s=0,7	50,0 s=0,3
Середня концентрація CH_4 , % об.	54,8 s=1,0	55,9 s=0,6	56,7 s=1,3	55,1 s=2,2	53,8 s=1,5	55,3 s=1,4
Константа швидкості виходу біогазу k, доба^{-1}	0,122 s=0,005	0,101 s=0,006	0,060 s=0,007	0,131 s=0,025	0,102 s=0,005	0,121 s=0,007

Примітки: s – стандартне відхилення; n – число врахованих повторів; н.у. – об'єм за нормальних умов (273 К, 1013 hPa)

Екструзія соломи пшениці дозволяє збільшити величину питомого виходу CH_4 на 10–16%, екструзія суміші соломи пшениці (75%) та сої (25%) – на 25–33%. Помітно більший вплив екструзії суміші соломи та сої на величину потенціалу виходу CH_4 можна пояснити, імовірно, більш складною нативною структурою лігно-целюлозного комплексу соломи сої. При цьому, додавання 25% соломи сої призводить до зменшення, у порівнянні з соломою пшениці, величини біодоступного потенціалу виходу біогазу на 22–23%.

За величиною константи швидкості виходу біогазу k найбільш результативним виявився зразок екструдованої суміші соломи пшениці та сої ПСПС – $0,131 \text{ доба}^{-1}$, а для зразків гранул з соломи пшениці та з соломи ріпаку такий коефіцієнт встановлено фактично на тому ж рівні – $0,121\text{--}122 \text{ доба}^{-1}$.

Висновки. Одним з раціональних методів попередньої обробки соломи для виробництва з неї біогазу може бути екструзія. Зменшення лінійних розмірів фракцій соломи дозволяє покращити кінетику, проте не впливає на величину біодоступного потенціалу виходу біогазу. Попередня обробка соломи екструзією дозволяє покращити кінетику, навіть у порівнянні з тонким механічним подрібненням, і при цьому дозволяє помітно збільшити біодоступний потенціал виходу біогазу.

1. Гізбуллін Н.Г. Солома: паливо і добриво / Біоенергетика. – №2, 2013. – с. 22–24.

2. Bakker, R.R.C., Elbersen, H.W., Poppens, R.P., & Lesschen, J.P. (2013). Rice Straw and Wheat Straw-Potential Feedstocks For the Biobased Economy. NL Agency.

3. Lynd, L.R., Weimer, P.J., van Zyl, W.H. & Pretorius, I.S. (2002). Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 66(3), pp. 506–577.

4. Noike, T., Endo, G., Chang, J.-E., Yaguchi, J.-I. & Matsumoto, J.-I. (1985). Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion. Biotechnology and Bioengineering, 27(10), pp. 1482–1489.

5. Henrik B. Møller, Mogens Møller Hansen. Briquettes of straw and dry grass double biogas production / FiB no. 47, March 2014. – p. 3–5.

6. Bauer A. et al. Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. Journ. Biotech.; 2009; 142. p. 50–55.

7. Фльонц, І.В., Підховна, С.М., Голяш, Н.М. (2014). Попередня обробка екструдованої соломи пшениці розчином $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з метою підвищення виходу біогазу. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК, (194).

8. Голуб, Г.А., & Гох, В.В. (2012). Використання жому і меляси в суміші з соломою для виробництва біогазу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК, (170 (2)), 74–80.

9. Dererie, D.Y., et. Al. (2011) Improved bio-energy yields via sequential ethanol fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw, Bioresource Technology 102, 4449–4455.

10. Lei, Z., et al. (2010) Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation. Bioresource Technology 101, 4343–4348.

11. Zhong, W., et al. (2011) Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion, Renewable Energy 36, 1875–1879.

12. Song, Z., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y. (2014). Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. PLoS one, 9(4), e93801.

13. Laurinovic, L., Jasko, J., Skripsts, E., & Dubrovskis, V. (2013). Biochemical methane potential of biologically and chemically pretreated sawdust and straw. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development (pp. 468–471).

14. Alan Sherrard. Breaking the straw to biogas conundrum. 2016. (Режим електронного доступу: <https://bioenergyinternational.com/feedstock/breaking-the-straw-to-biogas-conundrum>)

15. Biomethane from straw. (Режим електронного доступу: <http://www.verbio.de/en/products/verbiogas/biomethane-from-straw/>)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫХОДА БИОГАЗА В ПРОЦЕССЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО МЕТАНОВОГО БРОЖЕНИЯ СОЛОМЫ

П.П. Кучерук¹, кандидат технических наук,

Ю.Б. Матвеев¹, кандидат физико-математических наук,
В.О. Рудская², студент.

¹Институт технической теплофизики НАН Украины
03057 г. Киев, ул. Желябова 2А.

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»
03056 г. Киев, пр-т Победы 37.

Определено потенциал выхода биогаза из образцов гранул соломы пшеницы, сои и рапса. Проанализировано влияние механического измельчения, а также экструзии соломы пшеницы на потенциал и скорость образования биогаза. Для анализа констант скорости выхода биогаза было использовано уравнение распада первого порядка. Библ. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: метановое брожение, биогаз, константа скорости выхода биогаза, потенциал выхода биогаза, солома, гранулы.

REFERENCES

1. Gizbullin N.G. Straw: fuel and fertilizer / *Bioenergy*. – №2, 2013. – p. 22–24.
2. Bakker, R.R.C., Elbersen, H.W., Poppens, R.P., & Lesschen, J.P. (2013). Rice Straw and Wheat Straw-Potential feedstocks for the Biobased Economy. NL Agency.
3. Lynd, L.R., Weimer, P.J., van Zyl, W.H. & Pretorius, I.S. (2002). Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66(3), pp. 506–577.
4. Noike, T., Endo, G., Chang, J.-E., Yaguchi, J.-I. & Matsumoto, J.-I. (1985). Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion. *Biotechnology and Bioengineering*, 27(10), pp. 1482–1489.
5. Henrik B. Møller, Mogens Møller Hansen. Briquettes of straw and dry grass double biogas production / *FiB* no. 47, March 2014. – p. 3–5.
6. Bauer A. et al. Analysis of methane potentials of steam-exploded wheat straw and estimation of energy yields of combined ethanol and methane production. *Journ. Biotech.*; 2009;142. p. 50–55.
7. Fliontz, I.V., Pidkhovna, S.M., Goliash, N. M. (2014). Preliminary treatment of extruded wheat straw with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution to increase biogas output. *Scientific Herald of the National University of bioresources and nature use of Ukraine. Series: Machinery and Power Engineering in agro-industrial complex*, (194).
8. Golub, G.A., Ghoh, V.V. (2012). Use of SBP and molasses in a mixture with straw for biogas production. *Scientific Herald of the National University of bioresources and nature use of Ukraine. Series: Machinery and Power Engineering in agro-industrial complex*, (170 (2)), 74–80.
9. Dererie, D.Y., et. Al. (2011) Improved bio-energy yields via sequential ethanol fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw, *Bioresource Technology* 102, 4449–4455.
10. Lei, Z., et al. (2010) Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation. *Bioresource Technology* 101, 4343–4348.
11. Zhong, W., et al. (2011) Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion, *Renewable Energy* 36, 1875–1879.
12. Song, Z., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y. (2014). Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PloS one*, 9(4), e93801.
13. Laurinovic, L., Jasko, J., Skripsts, E., & Dubrovskis, V. (2013). Biochemical methane potential of biologically and chemically pretreated sawdust and straw. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development* (pp. 468–471).
14. Alan Sherrard. Breaking the straw to biogas conundrum. 2016. (Режим электронного доступа: <https://bioenergyinternational.com/feedstock/breaking-the-straw-to-biogas-conundrum>)
15. Biomethane from straw. (Режим электронного доступа: <http://www.verbio.de/en/products/verbioogas/biomethane-from-straw/>)

SYNOPSIS

Given the scale of the formation and prevalence, as well as taking into account compliance with the set of criteria for sustainable development in the production of energy from renewable sources, the production of biogas from straw looks promising in Ukraine.

The effective production of biogas from straw in CSTR reactors requires its pretreatment. The main purposes of this pretreatment are to increase bioavailability of cellulose as a result of destruction of ligno-cellulosic complexes, increase of the specific surface and porosity of the material, decrease of crystallinity of cellulose. Such pretreatment should lead to an increase in the rate of hydrolysis of organic compounds of straw, the bioavailable biogas yield potential, and the reduction of hydrophobic properties. The promising method in regard to biogas production is the straw extrusion (straw pellets production), which combines fine mechanical grinding and thermal effect.

In this study the biogas yield potential from wheat straw samples with a linear particle size $L=10\text{--}150$ mm, mechanically milled wheat straw with a linear particle size $L<2$ mm and wheat straw processed by extrusion (in the form of pellets with a diameter $D=6,4$ mm) was experimentally investigated in batch reactors at a temperature of $36\pm1^\circ\text{C}$. Also samples pellets of wheat straw (75%) and soybean (25%), as well as rape straw pellets were studied. All samples were inoculated at the straw VS to inoculum VS ratio 0,50–0,55 and initial concentration of the samples $25,1\pm0,4$ gVS·kg⁻¹.

It was found that reducing the linear sizes of wheat straw fractions leads to an increase in the first order rate constant of the biogas from $0,060\pm0,007$ day⁻¹ to $0,101\pm0,006$ day⁻¹, but practically does not affect the amount of bioavailable potential of the CH_4 yield which was estimated at 191 LNCH₄·kg⁻¹VS.

Wheat straw extrusion allows to increase the specific CH_4 yield by 10–16%, extrusion of mixture of wheat straw (75%) and soybean (25%) by 25–33%. By the first order rate constant, the most effective was the sample of extruded mixture of wheat straw and soybean $k=0,131$ day⁻¹, and for samples of wheat straw and rape straw, constant k was estimated at the same level 0,121–0,122 day⁻¹.

Thus, reducing the linear size of straw fractions can improve the kinetics, but does not affect the amount of bioavailable biogas yield potential. Pre treatment of straw by extrusion allows to improve the kinetics, even in comparison with fine mechanical shredding, and at the same time allows to significantly increase the bioavailable potential of biogas yield.

РЕФЕРАТ

З огляду на масштаби утворення та поширеність, а також з врахуванням відповідності критеріям сталого розвитку виробництва енергії з відновлюваних джерел, в Україні може бути перспективним виробництво біогазу з соломи.

Ефективне виробництво біогазу з соломи в реакторах типу CSTR вимагає її попередньої обробки. Основними задачами такої обробки є збільшення біодоступності целюлози внаслідок руйнування лігноцелюлозних комплексів, збільшення питомої поверхні та пористості матеріалу, зниження кристалічності целюлози. Така обробка повинна призвести до збільшення швидкості гідролізу органічних сполук соломи, біодоступного потенціалу виходу біогазу та зниження гідрофобних властивостей соломи. Перспективним методом обробки соломи для виробництва з неї біогазу, є її екструзія (виробництво гранул соломи), що поєднує в собі високий ступінь механічного подрібнення та термічний вплив.

У цій роботі було досліджено потенціал виходу біогазу зі зразків соломи пшениці з лінійним розміром часток $L=10-150$ мм, механічно подрібненої соломи пшениці з лінійним розміром часток $L<2$ мм та екструдованої соломи пшениці (у вигляді гранул з діаметром $D=6,4$ мм) в біореакторах періодичної дії при температурі $36\pm 1^\circ\text{C}$. Також було досліджено на потенціал виходу біогазу зразки гранул із суміші соломи пшениці (75%) та соломи сої (25%), а також гранули

з соломи ріпаку. Всі зразки соломи було початково змішано з інокулятом зі співвідношенням маси органічної речовини зразків до маси органічної речовини інокуляту $0,50-0,55$, при цьому початкова концентрація органічної речовини зразків соломи у сумішах складала $25,1\pm 0,4$ гСОР•кг⁻¹.

Виявлено, що зменшення лінійних розмірів фракцій соломи пшениці призводить до збільшення константи швидкості виходу біогазу 1-го порядку з $0,060\pm 0,007$ доба⁻¹ до $0,101\pm 0,006$ доба⁻¹, але практично не впливає на величину біодоступного потенціалу виходу CH_4 , яку встановлено на рівні 191 лн. CH_4 •кгСОР⁻¹.

Екструзія соломи пшениці дозволяє збільшити питомий вихід CH_4 на 10–16%, екструзія суміші соломи пшениці (75%) та соломи сої (25%) – на 25–33%. Найбільше значення константи швидкості виходу біогазу 1-го порядку $k=0,131$ доба⁻¹ встановлено для зразків екструдованої суміші пшеничної соломи та соломи сої, а для зразків соломи пшениці та соломи ріпаку, значення константи k оцінено на рівні $0,121-0,122$ доба⁻¹.

Таким чином, зменшення лінійного розміру фракцій соломи призводить до збільшення швидкості, але не впливає на величину біодоступного потенціалу виходу біогазу. Попередня обробка соломи екструзією дозволяє збільшити швидкість виходу біогазу, навіть у порівнянні з тонким механічним подрібненням, і в той же час дозволяє суттєво збільшити величину біодоступного потенціалу виходу біогазу.

Стаття надійшла до редакції 19.04.18

Остаточна версія 12.06.18

ХІ МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.
ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2018
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ,
АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕФЕКТИВНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

6-8
листопада

ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр
ЗА ПІДТРИМКИ:
Міністерства регіонального розвитку,
будівництва та житлово-комунального
господарства України
Державного агентства
з енергоефективності
та енергозбереження України
Технічний партнер: Rand Media

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, Київ, Броварський пр-т, 15
☎ "Лівобережна"
☎ (044) 201-11-66, 206-87-86
e-mail: energo@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua