

Енергетичні характеристики композитних біопалив на основі лушпиння соняшнику

Energy Characteristics of Composite BioFuel Based on Sunflower Husk

Євген Склярєнко¹, Леонід Воробйов¹

Yevhen Sklyarenko, Leonid Vorobiov

¹ *Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine*
2a Zhelyabov, Kyiv, 03057, Ukraine

DOI: [10.22178/pos.44-4](https://doi.org/10.22178/pos.44-4)

LCC Subject Category:
[QC81-114](#)

Received 20.02.2019
Accepted 25.03.2019
Published online 31.03.2019

Corresponding Author:
Leonid Vorobiov
teplomer@ukr.net

© 2019 The Authors. This article is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](#)



Анотація. Зазначена перспективність використання відновлюваних джерел енергії в паливному балансі країни. Важливим джерелом енергії є біомаса, для якої характерна відновлюваність, доступність, універсальність, мінімальний вплив на довкілля, можливість транспортування, накопичення та зберігання. В той же час для біомаси характерна низка недоліків – неоднорідна структура з широким фракційним складом, з низькою насипною і енергетичною щільністю та високою початковою вологістю, а часто і зольністю. Для покращення теплотехнічних характеристик і підвищення енергетичної ефективності використання біомасу попередньо піддають фізичній, біохімічній чи термохімічній конверсії. Ефективним способом підвищення теплотехнічних характеристик вихідної біомаси є її пресування в суміші з іншими горючими матеріалами, наприклад, органічними відходами сільськогосподарства, нафтопереробної, вугільної, паперової промисловості, що дозволяє, зокрема, вирішувати і екологічні проблеми.

Проведена оцінка можливості використання органічних відходів тваринництва та птахівництва в композиції з відходами біомаси рослинного походження. Представлено результати калориметричних досліджень теплотворної здатності зразків таких композитних палив на основі лушпиння соняшникового насіння.

На підставі проведених експериментальних досліджень та розрахунків запропоновані емпіричні формули для розрахунку теплоти згоряння композитних палив, які містять суміш лушпиння соняшнику, шламу полів зрошення, курячого посліду та гною.

Досліджено, залежність теплоти згоряння композитних палив з відходів біомаси сільськогосподарського виробництва від вологості. Оскільки брикетовані палива з таких відходів мають значну гігроскопічність, рекомендовано забезпечувати відповідні умови їх зберігання. Зроблено висновок, що під час довготривалого зберігання відходів птахівництва та тваринництва в них можливе протікання біохімічних процесів, які змінюють теплоту згоряння, що вказує на необхідність врахування терміну і умов зберігання вихідних компонентів.

Зроблено висновок, що композитні палива з відходів біомаси сільськогосподарського виробництва можуть бути вагомим компонентом паливного балансу країни, заощаджуючи традиційні викопні палива. Крім того, утилізація цих відходів сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища.

Ключові слова: біомаса; композитне паливо; теплотворна здатність; бомбова калориметрія.

Abstract. The paper considers the prospect of using renewable energy sources in the country's fuel balance. An important source of energy is biomass, which is characterized by renewability, accessibility, versatility, minimal impact on the environment, transportation, accumulation and storage. At the same time, biomass has a number of disadvantages: a heterogeneous structure with a broad fractional composition, with low bulk density and energy density, and high initial humidity, and often ash content. To improve the thermal characteristics and to increase the energy efficiency of using biomass, it is subjected to physical, biochemical or thermochemical conversion. An effective way to improve the thermal characteristics of the original biomass is to compress it in a mixture with other combustible materials, for example, organic waste from agriculture, oil refining, coal, paper industry, which allows, in particular, to solve environmental problems as well.

An estimation of the possibility of using organic waste from livestock and poultry farming in a composition with waste biomass of vegetable origin is conducted. The results of calorimetric studies of the calorific value of samples of such composite fuel, based on husk of sunflower seeds are presented.

Based on experimental research and calculations, empirical formulas were proposed to calculate the combustion heat of composite fuel, containing a mixture of sunflower husk, sludge, irrigation, chicken droppings and manure.

The dependence of the heat of combustion of composite fuel, produced from the waste of the biomass from agricultural production on humidity has been researched. Since briquetted fuel from such wastes has a significant hygroscopicity, it is recommended to provide appropriate conditions for its storage. It is concluded that during the long-term storage of poultry and livestock waste there may be biochemical processes that change the heat of combustion, indicating the need to take into account the terms and conditions of storage of the source components.

It is concluded that composite fuel from biomass waste from agricultural production can be a significant component of the country's fuel balance, saving traditional fossil fuel. In addition, the disposal of these wastes contributes to the reduction of environmental pollution.

Keywords: biomass; composite fuel; calorific value; bomb calorimetry.

ВСТУП

Ефективне використання всіх видів енергоресурсів є однією з найважливіших загальнодержавних задач в Україні, що викликано дефіцитом і постійним подорожчанням традиційних викопних палив та низькою ефективністю їх використання, а також міжнародними зобов'язаннями щодо екологічної безпеки.

Одним з дієвих шляхів вирішення цих проблем вбачається в комплексному енерготехнологічному використанні палив і у впровадженні нових технологій використання відновлюваних джерел енергії та альтернативних палив.

Серед відновлюваних джерел енергії біомаса є найбільш ємним і доступним паливним джерелом. За оцінками [1, 2] біомаса дає понад 2 млрд. т у. п. енергії на рік, що складає близько 14 % загального споживання первинних енергоносіїв у світі.

Зважаючи на перспективність використання відновлюваних джерел енергії в паливному балансі країни, серед основних причин такої уваги до біомаси необхідно відзначити: відновлюваність, доступність, універсальність, мінімальний вплив на довкілля, можливість транспортування, накопичення та зберігання.

Проте, часто основною перепоною до широкого використання біомаси в теплоенергетиці є сама біомаса, з її специфічними теплотехнічними характеристиками. Переважно це дрібна біомаса, з широким фракційним складом, з низькою насипною і енергетичною щільністю та високою вихідною вологістю, а часто і зольністю. Внаслідок дії цих факторів ефективність використання енергії біомаси є низькою і цілком зрозуміло, що по енергетичній ефективності вона не може конкурувати з традиційними викопними паливами.

Для покращення теплотехнічних характеристик і підвищення енергетичної ефективності використання, біомасу попередньо піддають

фізичній, біохімічній чи термохімічній конверсії (рисунок 1).

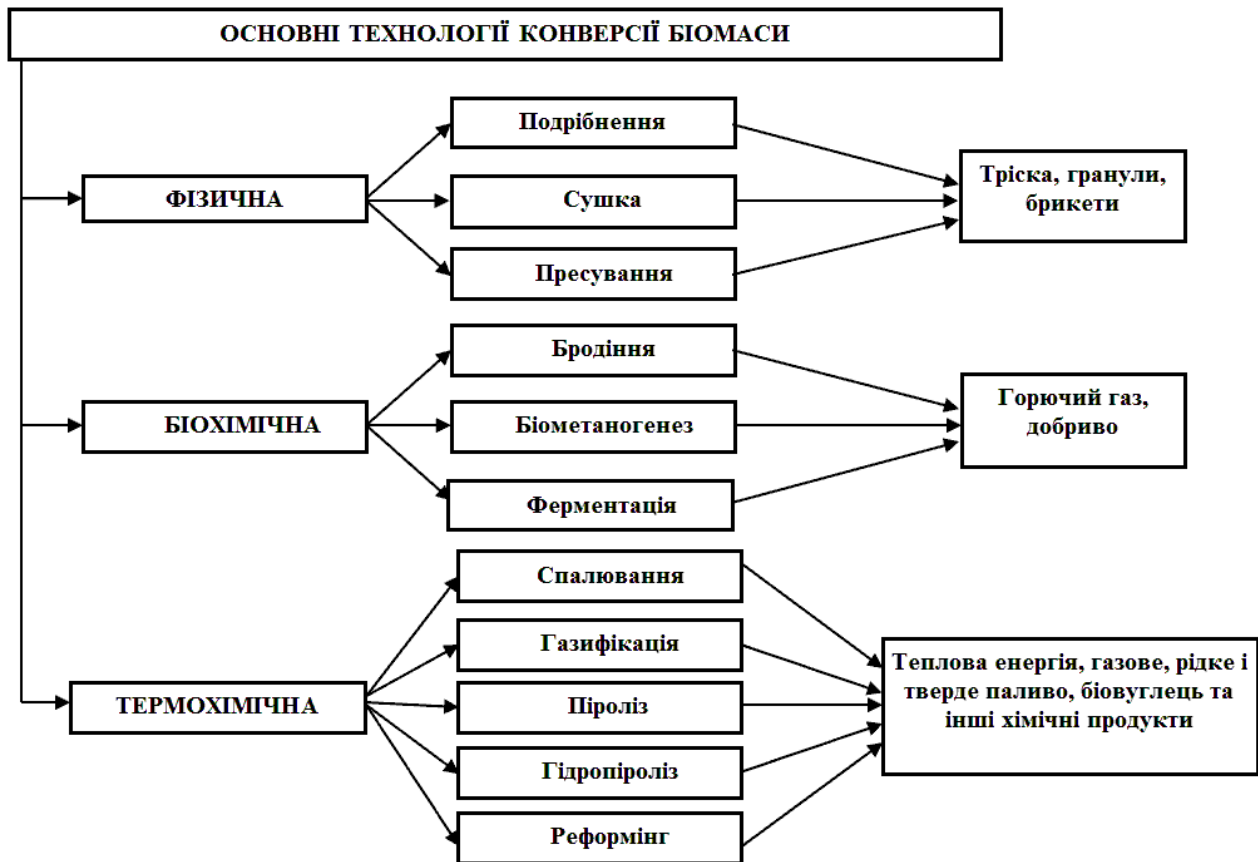


Рисунок 1 – Основні технології конверсії рослинної біомаси

Так, фізична конверсія дозволяє покращити теплотехнічні характеристики вихідної біомаси, шляхом її сушіння, подрібнення чи пресування. Наприклад, зрубані дерева (які мають вологість 55% і теплоту згоряння 6,9 МДж/кг) і складовані в штабелі, впродовж 1,5–2 років досягають вологості 25–15% і нижчої теплоти згоряння 13,2–15,3 МДж/кг.

Пресування біомаси в паливні брикети чи пелети також є ефективним способом покращення її теплотехнічних та експлуатаційних характеристик при використанні її для енергетичних цілей. При цьому, теплота згоряння вихідної біомаси може бути підвищена до 16–18 МДж/кг. Крім того, фізичні способи конверсії біомаси дозволяють суттєво зменшити витрати на її переміщення, зберігання, подальшу переробку та використання.

Одним з ефективних способів підвищення теплотехнічних характеристик вихідної біомаси є її пресування в суміші з іншими горючими матеріалами, наприклад, органічними

відходами сільського господарства, нафтопереробної, вугільної, паперової промисловості і ін. [3, 4, 5], що дозволяє, зокрема, вирішувати і екологічні проблеми.

Загалом, застосування тієї чи іншої технології конверсії біомаси обумовлюється пріоритетом поставлених задач: енергетичної, екологічної, економічної чи соціальної. Хоча, в певній мірі, кожна з цих технологій дозволяє досягти комплексного результату.

Основним критерієм визначення теплоцінності будь-якого палива є його теплотворна здатність (теплота згоряння), яка характеризує здатність палива до виділення теплоти при згорянні. Традиційно, теплоту згоряння палива визначають аналітично, за елементарним та компонентним складом палива, чи за даними технічного аналізу, а також при допомозі різного виду калориметричних систем, тобто вимірювальних приладів для прямого визначення теплоти згоряння палив [6].

Метою роботи є оцінка можливості використання органічних відходів тваринництва та птахівництва в композиції з відходами біомаси рослинного походження при виробництві паливних брикетів чи пелет.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика випробувань

Визначення теплотехнічних характеристик композитних палив і їх складових проводилось при допомозі калориметричного та технічного аналізу. Калориметричний аналіз включає визначення вищої та нижчої теплоти згоряння палива, а технічний – його вологість та зольність.

З наданих зразків відбираються проби для визначення вологості у стані поставки. З іншої частини зразка готується аналітична проба для подальших досліджень, для чого вона підсушується, подрібнюється та витримується в лабораторних умовах для досягнення рівноважної вологості.

Методика визначення вологості полягає у зважуванні зразка досліджуваного матеріалу, сушінні його при температурі $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ до постійної маси та у зважуванні сухого зразка. За знайденими масами вологого та абсолютно сухого зразка визначають відносну вологість. Методика загалом відповідає вимогам ДСТУ EN 14774-2:2012 [7].

Методика визначення теплоти згоряння композитних палив загалом відповідає стандартним методикам для твердих видів палива [8, 9]. Зразки насипних речовин брикетують за допомогою технологічного обладнання, або використовують, наприклад, паперову упаковку з відомою теплою згоряння. Зважують зразок, упаковку та спеціальний запальний дріт. Зразок з дротом запалу розміщують у тиглі калориметричної бомби, яку заповнюють киснем під тиском 2,5-3,0 МПа. Бомбу встановлюють в калориметр. Після досягнення необхідного теплового режиму, зразок досліджуваного палива підпалюють і вимірюють кількість теплоти, що виділяється при згорянні. В кінці дослідження проводять аналіз повноти згоряння і зважують залишки запального дроту. Згідно стандарту проводять щонайменше два дослідження вимірювання теплоти згоряння і якщо розбіжність результатів

перевищує визначений рівень, проводять третій дослід, а за результат приймають середнє по двом найближчим вимірюванням. В розрахунках значень вмісту водню, сірки та азоту для визначення поправок при обробці експериментальних даних, використовувалися дані з технічної літератури [10, 11, 12]. На підставі отриманих даних проводилися розрахунки питомих значень теплоти згоряння.

Питома теплота згоряння аналітичної проби палива в бомбі q_b (кДж/кг) розраховується за формулою (1):

$$q_b = \frac{Q_n - q_{dp}(m_1 - m_2) - q_{nn}m_{nn}}{m_{zp}}, \quad (1)$$

де Q_n – виміряна теплота згоряння проби палива, Дж;

q_{dp} – 2510 Дж/г – питома теплота згоряння запального дроту;

m_1, m_2 – маси запального дроту до та після згоряння;

q_{nn} – 15627 Дж/г – питома теплота згоряння паперової упаковки;

m_{nn} – маса упаковки з паперу;

m_{zp} – маса зразка палива.

Вищу теплоту згоряння аналітичної проби з врахуванням поправок на створення та розчинення кислот розраховують за формулою (2):

$$q_B^a = q_b - (94S + \alpha q_b), \quad (2)$$

де 94 – коефіцієнт враховує теплоту утворення сірчаної кислоти з діоксиду сірки та розчинення сірчаної кислоти у воді на 1 % сірки, що перейшла при згорянні палива в сірчану кислоту, кДж/кг;

S – масова доля сірки в паливі, %;

αq_b – добуток враховує теплоту утворення та розчинення в воді азотної кислоти, для біопалива приймаємо значення встановлене [6] для торфу $\alpha q_b = 29$ кДж / кг.

Нижча теплота згоряння аналітичної проби розраховується за формулою (3):

$$q_H^a = q_B^a - 24,42(8,94H_a + W_a), \quad (3)$$

В абсолютно сухому стані вища теплота згоряння складає (4):

$$q_B^c = q_B^a \times \frac{100}{100 - W_a}. \quad (4)$$

В абсолютно сухому стані нижча теплота згоряння складає:

$$q_H^c = q_B^c - 24,42 \cdot 8,94 \cdot H_c. \quad (5)$$

При довільній робочій вологості W_p , розрахунки проводяться за формулами (6)–(8):

- вища теплота згоряння, кДж/кг:

$$q_B^p = q_B^c \times \frac{100 - W_p}{100}, \quad (6)$$

- вміст водню, %:

$$H_p = H_c \times \frac{100 - W_p}{100}, \quad (7)$$

- нижча теплота згоряння, кДж/кг:

$$q_H^p = q_B^p - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H_p + W_p), \quad (8)$$

де 24,42 – теплота пароутворення при 25°C з розрахунку на 1 % води, що утворилася, кДж/кг;

8,94 – коефіцієнт перерахунку масової долі водню на воду;

H_a – масова доля водню у аналітичній пробі палива, %;

W_a – масова доля води в досліджуваній аналітичній пробі речовини, %.

Для розрахунку вищої та нижчої теплоти згоряння палив по формулам (2) та (3) необхідні

дані про вміст сірки, водню, вологи та азотних сполук, що утворюються при згорянні. Для різних матеріалів рослинного походження вміст водню на суху масу складає приблизно 6 %, а сірки – 0,05÷0,12 %. Для шламу вміст цих речовин прийнятий таким же. Для посліду та гною з вологістю 35% вміст водню складає приблизно 3,2 %, а сірки – 0,24 % [12], тобто на суху масу відповідно 4,9 % та 0,37 %. Розрахунок поправки на розчинення азотної кислоти за формулою (2) проведений за методикою, що рекомендована стандартом [8] для торфу, як для палива найбільш близького за походженням та структурою.

Прилади та апаратура

Теплоту згоряння зразків досліджено за допомогою бомбового анероїдного ізоперіболичного калориметра теплового потоку моделі КТС-4 з калориметричною бомбою БКУ-2 (розробка ІТТФ НАН України) [13].

Для визначення зольності та вологості зразків використовувалися ваги А500 фірми AXIS, та шафа сушільна лабораторна СНОЛ-3,5.

Масу зразків, паперової упаковки та запального дроту визначено за допомогою ваг ВЛР-20.

Результати вимірювань

Досліджено теплоту згоряння композитного палива на основі лушпиння соняшникового насіння в суміші з курячим послідом, гноем великої рогатої худоби (ВРХ) і шламом полів зрошення. Результати вимірювань теплотехнічних характеристик складових композитних палив наведені в таблиці 1.

Виходячи з даних, наведених у таблиці 1 запропоновані емпіричні формули для розрахунку теплоти згоряння композитних палив у сухому стані:

- вища теплота згоряння (МДж/кг):

$$q_{Вища}^c = 0,205M_{\% Лушп} + 0,154M_{\% Шлам} + 0,125M_{\% Послід} + 0,121M_{\% Гній}, \quad (9)$$

- нижча теплота згоряння (МДж/кг):

$$q_{Нижча}^c = 0,192M_{\% Лушп} + 0,141M_{\% Шлам} + 0,114M_{\% Послід} + 0,199M_{\% Гній}, \quad (10)$$

Таблиця 1 – Результати вимірювань теплотехнічних характеристик складових композитних палив з біомаси

Зразок	Вологість, W_a , %	Теплота згоряння аналітичної проби		Теплота згоряння на суху масу	
		Вища, МДж/кг	Нижча, МДж/кг	Вища, МДж/кг	Нижча, МДж/кг
Лушпиння соняшника	6,0	19,30	17,84	20,53	19,222
Послід курячий підстилковий	6,5	11,62	10,4	12,43	11,3
Гній ВРХ	7,1	19,47	18,08	20,96	19,89
Шлам полів зрошення	4,3	14,78	13,31	15,44	14,13

Проведено експериментальне визначення вологості та теплоти згоряння композитних палив. Склад та масовий вміст складових у

відсотках до загальної маси, композитних палив наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Складові композитних палив

№ зразка	Опис зразка	Масовий вміст складових у відсотках до загальної маси суміші М%			
		лушпиння соняшника	шлам	курячий послід	гній ВРХ
1a	Лушпиння + шлам (60:40)	60	40	-	-
1b	Лушпиння + шлам (40:60)	40	60	-	-
2a	Лушпиння + послід 60:40)	60	-	40	-
2b	Лушпиння + послід 40:60)	40	-	60	-
3a	Лушпиння + гній (60:40)	60	-	-	40
3b	Лушпиння + гній (40:60)	40	-	-	60

Результати експериментального визначення вологості та теплоти згоряння композитних палив наведені у таблиці 3.

Залежність нижчої теплоти згоряння двокомпонентних сумішей композитних палив від вмісту лушпиння соняшника, отримана за формулою (10), узагальнено графіками, представленими на рисунку 2.

Таблиця 3 – Результати досліджень композитних палив з біомаси

№ зразка	Опис зразка	q_b , Дж/кг	Вологість аналітичної проби W_a , %	Вміст сірки, S_c , %	Вміст водню, H_c , %	Теплота згоряння аналітичної проби		Теплота згоряння на суху масу	
						вища, МДж/кг	нижча, МДж/кг	вища, МДж/кг	нижча, МДж/кг
1a	Лушпиння+шлам (60:40)	16,707	7,8	0,12	6,0	16,668	15,269	18,078	16,77
1b	Лушпиння+шлам (40:60)	16,386	7,8	0,12	6,0	16,347	14,948	17,730	16,42
2a	Лушпиння+послід (60:40)	15,943	7,7	0,22	5,56	15,895	14,587	17,221	16,01
2b	Лушпиння+послід (40:60)	13,286	7,7	0,27	5,34	13,234	11,970	14,338	13,17
3a	Лушпиння + гній (60:40)	18,442	7,1	0,22	5,56	18,394	17,093	19,800	18,59
3b	Лушпиння + гній (40:60)	18,390	7,1	0,27	5,34	18,337	17,081	19,739	18,13

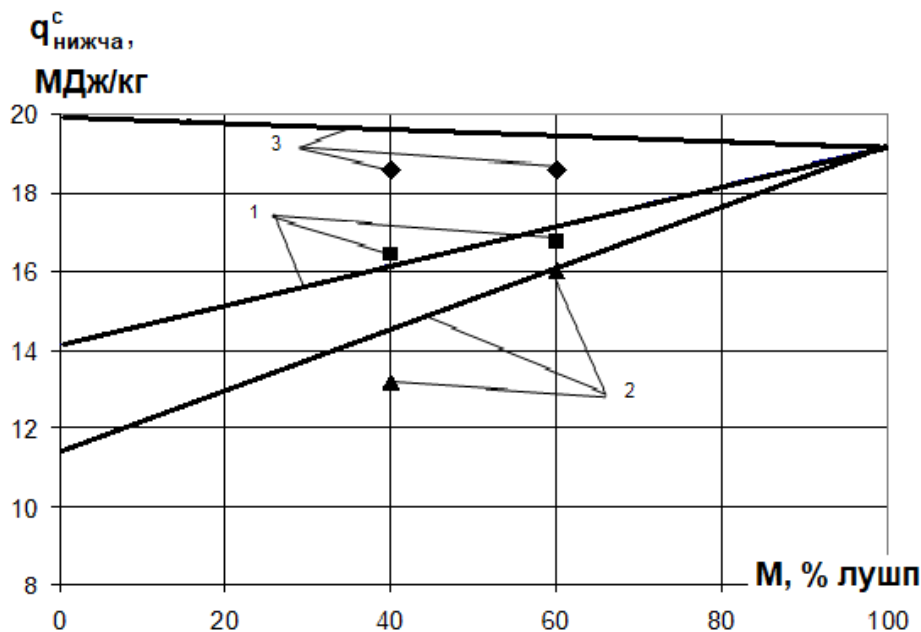


Рисунок 2 – Залежність нижчої теплоти згоряння сухих композитних паливних сумішей від вмісту лушпиння соняшнику

Примітки: 1 – суміш лушпиння і шламу; 2 – суміш лушпиння і курячого посліду; 3 – суміш лушпиння і гною

Для порівняння, у таблиці 4 наведені значення нижчої теплоти згоряння сумішей, які отримані за експериментальними даними і за

емпіричною формулою (10), та значення відносного відхилення (%) приведених значень.

Таблиця 4 – Значення нижчої теплоти згоряння сумішей, отриманих експериментально та за емпіричною формулою (10)

№ зразка	Опис зразка	Нижча теплота згоряння на суху масу $q_{нижча}^c$, МДж/кг		Відносне відхилення, %
		отримана на підставі експерименту	отримана за (10)	
1a	Лушпиння + шлам (60:40)	16,77	17,16	2,3
1b	Лушпиння + шлам (40:60)	16,42	16,14	-1,7
2a	Лушпиння + послід (60:40)	16,01	16,08	0,5
2b	Лушпиння + послід (40:60)	13,17	14,52	10,2
3a	Лушпиння + гній (60:40)	18,59	19,48	4,8
3b	Лушпиння + гній (40:60)	18,57	19,62	5,6

Аналіз отриманих результатів свідчить, що максимальна різниця між експериментально виміряними значеннями теплоти згоряння та значеннями отриманими розрахунком за емпіричними формулами складає до 11 %. Ця різниця значно перевищує похибку вимірювань, яка обумовлена характеристиками застосованих приладів і є, вочевидь, наслідком неоднорідності компонентів композитного палива, різною вологістю компонентів при змішуванні, вимірюванні, тощо. Можна вва-

жати, що похибка $\pm 10-15\%$ є похибкою розрахунків за приведеними апроксимаційними емпіричними формулами.

Для більшості з обстежених компонентів палив (окрім курячого посліду) визначені значення теплоти згоряння приблизно (з відхиленнями до 15–20 %) співпадають з даними, наведеними в технічній літературі. Експериментально ж визначене значення теплоти згоряння курячого посліду, виявилось приб-

лизно на 35 % менше ніж вказано в літературних джерелах [10, 11, 12], що може бути викликано різними умовами його зберігання та можливим протіканням біохімічних процесів при зберіганні, або частковим змішуванням посліду з негорючим підстилаючим ґрунтом. Крім того, такі розходження можуть пояснюватися різним походженням речовин, неоднорідністю, а також різною вологістю, яка не завжди наводиться в літературі, але яка значною мірою впливає на теплоту згоряння любого органічного палива.

Нижче приведені формули, які дають можливість оцінити теплоту згоряння композитного палива у робочому стані, в залежності від вихідної його вологості (W^P):

- вища теплота згоряння (МДж/кг):

$$q_{\text{вища}}^p = q_{\text{вища}}^c \frac{100 - W^P}{100}, \quad (11)$$

- нижча теплота згоряння (МДж/кг):

$$q_{\text{нижча}}^p = q_{\text{нижча}}^c \frac{100 - W^P}{100} - 0,0244W^P, \quad (12)$$

Результати розрахунків, за формулою (12), залежності нижчої теплоти згоряння досліджених композитних палив від їх вологості, узагальнені і приведені графічно на рисунку 3. Числові позначки на графіках відповідають номерам зразків у таблицях 2–4.

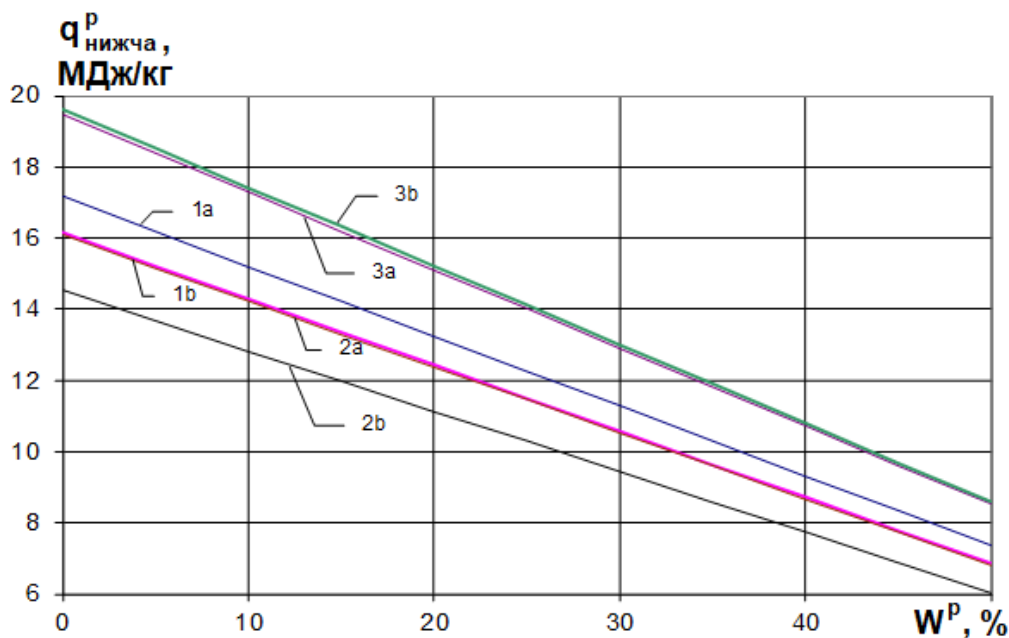


Рисунок 3 – Залежність нижчої теплоти згоряння композитних палив на основі лушпиння соняшника від вологості

ВИСНОВКИ

На підставі проведених експериментальних досліджень та розрахунків запропоновані емпіричні формули для розрахунку теплоти згоряння композитних палив, які містять суміш лушпиння соняшнику, шламу, курячого посліду та гною.

Досліджено залежність теплоти згоряння композитних палив з відходів біомаси сільськогосподарського виробництва від вологості. Оскільки брикетовані палива з таких відходів мають значну гігроскопічність, рекомендовано забезпечувати відповідні умови їх зберігання. Зроблено висновок, що під час довгот-

ривалого зберігання відходів птахівництва та тваринництва в них можливе протікання біохімічних процесів, які змінюють теплоту згоряння, що вказує на необхідність врахування терміну і умов зберігання вихідних компонентів.

Загалом, зроблено висновок, що композитні палива з відходів біомаси сільськогосподарського виробництва можуть бути вагомим компонентом паливного балансу країни, заощаджуючи традиційні викопні палива. Крім того, утилізація цих відходів сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Kaletnik, H. (2010). Biopalyvo. Prodovolcha, enerhetychna ta ekonomichna bezpeka Ukrainy [Biofuels. Food, energy and economic security of Ukraine]. Kyiv: Khai-Tek Pres (in Ukrainian) [Калетнік, Г. (2010). Біопаливо. Продовольча, енергетична та економічна безпека України. Київ: Хай-Тек Прес].
2. Heletukha, H., Zheliezna, T., & Drozdova, O. (2013). Kompleksnyi analiz tekhnologii vyrobnytstva enerhii z tverdoi biomasy v Ukraini. Chastyna 1. Soloma [Complex analysis of technologies for energy production from solid biomass. Part 1. Straw]. *Promyshlennaja teplotehnika*, 35(3), 56–63 (in Ukrainian) [Гелетуха, Г., Железна, Т., & Дроздова, О. (2013). Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома. *Промышленная теплотехника*, 35(3), 56–63].
3. Protsyshyn, B., Vorobiov, L., Lokh, Ye., Pavliuk, S., & Hordiienko, P. (2006). Vyrobnytstvo kompozytsiinykh palyv z vidkhodiv promyslovosti ta silskoho hospodarstva [Production of composite fuels from industrial and agricultural waste]. *Promyshlennaja teplotehnika*, 28(2), 46–50 (in Ukrainian) [Процишин, Б., Воробйов, Л., Лох, Є., Павлюк, С., & Гордієнко, П. (2006). Виробництво композиційних палив з відходів промисловості та сільського господарства. *Промышленная теплотехника*, 28(2), 46–50].
4. Vorob'ev, L., Grabov, L., Dekusha, L., Nazarenko, O., & Shmatok, A. (2011). Opredelenie teplotvornoj sposobnosti biotoplivnykh smesey [Definition of calorific efficiency of biofuel's mixes]. *Promyshlennaja teplotehnika*, 33(4), 87–93 (in Russian) [Воробьев, Л., Грабов, Л., Декуша, Л., Назаренко, О., & Шматок, А. (2011). Определение теплотворной способности биотопливных смесей. *Промышленная теплотехника*, 33(4), 87–93].
5. Sigal, O., Boulanger, Q., Vorobiov, L., Pavliuk, N., ... Serhiienko, R. (2018). Research of the Energy Characteristics of Municipal Solid Waste in Cherkassy. *Journal of Engineering Sciences*, 5(1), H16–H22. doi: 10.21272/jes.2018.5(1).h3
6. Vorob'ev, L., Grishhenko, T., & Dekusha, L. (1997). Bombovye kalorimetry dlja opredelenija teploty sgoranija topliva [Bomb calorimeters to determine the heat of combustion of fuel]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 70(5), 828–839 (in Russian) [Воробьев, Л., Грищенко, Т., & Декуша, Л. (1997). Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива. *Инженерно-физический журнал*, 70(5), 828–839].
7. Ministerstvo ekonomichnoho rozvytku Ukrainy. (2015). Tverde biopalyvo. Vyznachennia vmistu volohy. Metod vysushuvannia v sushylnii shafi. Chastyna 2. Zahalna voloha. Sproshchenyi metod [Iofuels solid. Determination of moisture. Content oven dry method. Part 1. Total moisture. Reference method] (DSTU EN 14774-2:2012). Kyiv: Minekonomrozvytku (in Ukrainian). [Міністерство економічного розвитку України. (2015). Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі. Частина 2. Загальна волога. Спрошений метод (ДСТУ EN 14774-2:2012). Київ: Мінекономрозвитку].
8. Gosstandart Ukrainy. (1997). Topливо tverdoe mineral'noe. Opredelenie vysshej teploty sgoranija i vychislenie nizshej teploty sgoranija [Solid mineral fuel. Determination of the highest combustion heat and calculation of the lowest combustion heat] (GOST 147-95). Kiev: Gosstandart Ukrainy (in Russian) [Госстандарт України. (1997). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания (ГОСТ 147-95). Киев: Госстандарт України].
9. Ministerstvo ekonomichnoho rozvytku Ukrainy. (2016). Tverde biopalyvo. Metod vyznachennia teplotvornoj zdatnosti [Solid biofuels. Method of determining the calorific value] (DSTU EN 14918:2016). Kyiv: Minekonomrozvytku (in Ukrainian)

- [Міністерство економічного розвитку України. (2016). *Тверде біопаливо. Метод визначення теплотворної здатності* (ДСТУ EN 14918:2016). Київ: Мінекономрозвитку].
10. Obidzinski, S. (2006). *Biomass*. Retrieved February 1, 2019, from <http://www.pnec.org.pl/moldova/poradnik.pdf> (in Russian)
[Обидзински, С. (2006). *Биомасса*. Актуально на 01.02.2019. URL: <http://www.pnec.org.pl/moldova/poradnik.pdf>].
 11. Klyus, V. (2015). *Avtotermicheskaya tekhnologiya karbonizatsii ptich'yego pometa* [Autothermal technology of bird droppings carbonization]. *Vidnovlyuvana yenergetika*, 2, 84–87. (in Russian)
[Клюс, В. П. (2015). Автотермическая технология карбонизации птичьего помета. *Відновлювана енергетика*, 2, 84–87].
 12. Dlja pticevodov. (n. d.). *Szhiganiye podstilochnogo pometa: za i protiv* [Burning of litter droppings: for and against]. Retrieved February 1, 2019, from <http://ptitcevod.ru/reprodukcija/soderzhanie-pticy/szhiganie-podstilochnogo-pometa-za-i-protiv.html> (in Russian)
[Для птицеводов. (n. d.). Сжигание подстилочного помета: за и против. Актуально на 01.02.2019. URL: <http://ptitcevod.ru/reprodukcija/soderzhanie-pticy/szhiganie-podstilochnogo-pometa-za-i-protiv.html>].
 13. Dekusha, L., Vorobiov, L., Hryshchenko, T., Burova, Z., Nazarenko, O., & Mazurenko, O. (2011). *Kvazidyferentsiinyi kalorymetr teplovoho potoku dlia vyznachennia teploty zghoriannia* [Quasidifferential calorimeter for the heat flow to determine the heat of combustion]. *Metrolohiia ta prylady*, 5, 27–31 (in Ukrainian).
[Декуша, Л., Воробйов, Л., Грищенко, Т., Бурова, З., Назаренко, О., & Мазуренко, О. (2011). Квазидиференційний калориметр теплового потоку для визначення теплоти згорання. *Метрологія та прилади*, 5, 27–31].