http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit08-02-039
DOI: 10.30890/2567-5273.2019-08-02-039

УДК 536.62 : 66.099.2

THERMAL ENGINEERING ANALYSIS OF BIOMASS FUEL
ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ПАЛИВ З БІОМАСИ

Sklyarenko E.V. / Скляренко Є.В.
Ph.d. / к.т.н.
ORCID: 0000-0003-3952-6520
Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й
d.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.
ORCID: 0000-0001-7958-6996
SPIN: 6154-2069
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Zhelyabova Str., 2a, Kyiv, 03057
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Желябова, 2а, 03057

Анотація. *Представлено результати калориметричних досліджень теплоти згоряння зразків композиційних палив на основі лушпиння соняшника, соломи пшениці та деревинної тирси в суміші із відходами сільськогосподарського виробництва. Запропоновані емпіричні формули для розрахунку нижчої робочої теплоти згоряння композиційних палив у залежності від масового вмісту їх складових і вихідної вологості. Виробництво таких композиційних палив дозволяє утилізувати значну кількість відходів, що сприяє вирішенню як паливної проблеми на місцевому рівні, так і проблеми забруднення навколишнього середовища відходами.*

Ключові слова*: біомаса, композиційне паливо, теплотворна здатність, бомбова калориметрія.*

Вступ

Один з дієвих шляхів вирішення паливної проблеми в Україні вбачається в економному і раціональному використанні всіх енергоресурсів, а також у впровадженні нових технологій використання відновлюваних джерел енергії.

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

Основу ресурсної біоенергетичної бази складає органічна біомаса рослинного і тваринного походження сільського і лісового господарства.

Серед основних причин значної уваги до біомаси необхідно відзначити: доступність, універсальність, мінімальний вплив на довкілля, можливість транспортування, накопичення та зберігання і, що головне, її відновлюваність. Тільки щорічний приріст біомаси у світі оцінюється в 200 млрд. т, в перерахунку на суху речовину, що енергетично еквівалентно 80 млрд. т нафти [2].

Разом з тим, основною перепоною до широкого використання біомаси в енергетичних цілях, є її специфічні теплотехнічні характеристики. Переважно це дрібна біомаса з широким фракційним складом, з низькою насипною і енергетичною щільністю та високою вихідною вологістю, а часто і зольністю. Оскільки основним критерієм визначення енергетичної цінності палива є його теплота згоряння, яка є похідною складу горючої маси і баласту в його робочій масі, то цілком зрозуміло, що внаслідок дії цих негативних факторів біомаса по

енергетичній ефективності не може конкурувати з традиційними паливами.

Для підвищення ефективності використання біомасу піддають фізичній, біохімічній чи термохімічній конверсії, поліпшуючи її теплотехнічні характеристики.

Одним із ефективних способів покращення теплотехнічних характеристик біомаси є її сушіння і пресування в паливні брикети чи пелети, що дає наступні переваги:

- підвищується теплота згоряння і енергетична щільність вихідної біомаси;
- зменшуються шкідливі викиди в навколишнє середовище при спалюванні;
- можливість застосування механізації та автоматизації при спалюванні, транспортуванні і складуванні;
- значно скорочуються транспортні витрати і площі для складування;

Крім того, пресування дає можливість утилізувати значну кількість відходів сільськогосподарського та промислового виробництва, які безпосередньо не можуть бути використані для енергетичних цілей, але які є значним джерелом забруднення навколишнього середовища. Ці відходи пресують в суміші з біомасою рослинного походження, утворюючи композиційні тверді палива. Їх енергетичну цінність контролюють по теплоті згоряння.

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.

В останні роки для таких вимірювань широкого застосування набули бомбові калориметри теплового потоку або кондуктивні калориметри [3].

Так, в ІТТФ НАН України впродовж 20 років розробляються кондуктивні калориметри марки КТС, які побудовані на базі термоелектричних перетворювачів теплового потоку [4]. На рис. 1 представлено вимірювальний комплекс, до складу якого входять: бомбовий анероїдний ізоперіболічний калориметр теплового потоку (1), електронно-обчислювальний блок (2), дві універсальні калориметричні бомби БКУ-2 (3), підставка для бомб (4) та прес для виготовлення проб (5).

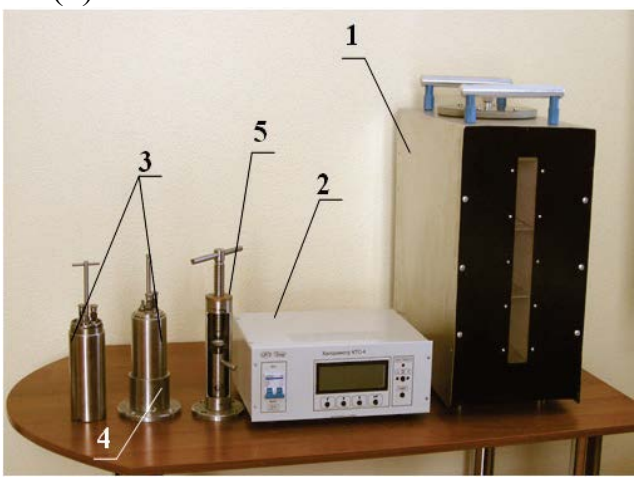

Рис. 1 Вимірювальний комплекс теплоти згоряння органічних палив, на базі калориметра КТС-4

Основні технічні характеристики КТС-4: діапазон вимірювання кількості теплоти 10…40 кДж; границі допустимої основної відносної похибки ±0,1%; тривалість підготовки до вимірювань, не більше 1,5 годин; тривалість проведення вимірювань 0,5 години.

Калориметр дозволяє вимірювати теплоту згоряння рідких, газоподібних та твердих палив.

Основний текст. Метою роботи є оцінка можливості використання органічних відходів сільськогосподарського виробництва в суміші із відходами біомаси рослинного походження, при виробництві композиційних паливних брикетів чи пелет, шляхом калориметричного та технічного аналізу їх основних теплотехнічних характеристик: теплоти згоряння, вологості та зольності.

Об'єкт дослідження. Досліджено теплоту згоряння композиційних палив на основі лушпиння соняшника і соломи пшениці в суміші з гноєм ВРХ, курячим послідом та шламом полів зрошення, а також суміші деревинної тирси з свинячим гноєм. Масовий вміст складових композиційних сумішей заданий у відсотках від загальної маси, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Складові композиційних палив

№ зразка	Опис зразка	Масовий вміст складових у відсотках до загальної маси суміші M_j				
		лушпиння насіння соняшника	солома	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
1	солома + шлам (60:40)	-	60	40	-	-
2	солома + послід (60:40)	-	60	-	40	-
3	солома + гній (60:40)	-	60	-	-	40
4	солома + шлам (40:60)	-	40	60	-	-
5	солома + послід (40:60)	-	40	-	60	-
6	солома + гній (40:60)	-	40	-	-	60

Прилади та апаратура. Теплоту згоряння зразків досліджено за допомогою бомбового калориметра теплового потоку КТС-4 з калориметричною бомбою БКУ-2 [5].

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

Масу зразків досліджуваного палива, пакувального паперу та запального дроту визначено за допомогою ваг ВЛР-20.

Методики випробувань. Частка кожного з наданих зразків використовується для визначення вологості палива у стані поставки. З іншої частки підсушених, подрібнених та витриманих в лабораторних умовах для досягнення рівноважної вологості зразків готуються аналітичні проби для

подальших досліджень.

Методика визначення вологості полягає у зважуванні зразка досліджуваного матеріалу, сушінні його при температурі (105±2)ºС 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 [6].

Зольність зразка визначена методом повільного озолення шляхом нагріву на протязі 60 хвилин від кімнатної температури до 500°С, витримці на цій температурі протягом 60 хвилин, а потім нагріву до 815°С і витримці при цій температурі протягом 120 хвилин згідно з вимогами ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) [7].

Методика визначення теплоти згоряння композиційних палив відповідає стандартним методикам для твердих видів палива [8, 9] та продуктів тваринництва [10]. Значення вмісту водню, сірки та азоту для визначення поправок при обробці експериментальних даних використовувалися виходячи з даних технічної літератури [11...15]. Значення поправки на теплоту утворення та розчинення азотної кислоти прийнято таке, як рекомендовано ГОСТ147-95 [8] для торфу, як найбільш близького за елементарним складом та походженням органічного палива.

Питома теплота згоряння аналітичної проби палива в бомбі $q_б$ розраховується за формулою:

$$q_б = [Q_п - q_{др} (m_1 - m_2) - q_{пп} \cdot m_{пп}] / m_{зр}, \quad (1)$$

де: $Q_п$ - виміряна теплота згоряння проби палива, Дж;

$q_{др}$ = 2510 Дж/г - питома теплота згоряння запального дроту;

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

$q_{пп}$ = 15627 Дж/г - питома теплота згоряння паперової упаковки

$m_{пп}$ – маса упаковки з паперу; $m_{зр}$ – маса зразка палива.

На підставі проведених випробувань і розрахунків теплоти згоряння аналітичної проби палива в бомбі, проводяться розрахунки вищої і нижчої теплоти згоряння аналітичної, сухої і робочої проби із врахуванням поправок на створення та розчинення сірчаної та азотної кислоти. Методика та формули для розрахунків детально висвітлені авторами в роботах [5, 16]. А дані про вміст сірки і водню в соломі, лушпинні, курячому посліді та гної взяті із літературних джерел [11, 12, 13]. Так для посліду та гною з вологістю 35% вміст водню складає приблизно 3,2%, а сірки – 0,24%, тобто на суху масу відповідно 4,9% та 0,37%. 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 розрахунку по деревинній тирсі використовувалися значення, рекомендовані [14], а саме вміст сірки S_c= 0,1%, водню H_c= 6,3%.

Загалом, теплота згоряння композиційного палива $q_{суміш}$, що є сумішшю кількох компонентів, які хімічно не реагують між собою, може бути розрахована за формулою:

$$q_{суміш} = \sum_{j=1}^{n} \frac{M_j}{100} \times q_j \qquad (2)$$

де M_j і q_j - масовий вміст та теплота згоряння j–того компонента суміші.

Результати вимірювань. Результати вимірювань теплотехнічних характеристик складових композиційних палив з біомаси наведені у таблиці 2, а їх композиційних сумішей у таблиці 3.

Таблиця 2

Результати вимірювань теплотехнічних характеристик складових композиційних палив з біомаси

Зразок	Вологість, Wa, %	Зольність, Aa,%	Насипна густина, кг/м3	Теплота згоряння аналітичної проби		Теплота згоряння на суху масу	
				Вища, МДж/кг	Нижча, МДж/кг	Вища, МДж/кг	Нижча, МДж/кг
Солома пшениці	10		120	17,20	15,65	19,11	17,80
Лушпиння соняшника	6		230	19,30	17,84	20,53	19,22
Послід курячий	6,5		880	11,62	10,40	12,43	11,30
Гній свинячий	6,7	6,7	320	16,07	15,03	17,22	16,13
Гній ВРХ	7,1		1850	19,47		20,96	19,89
Тирса деревини	4.3	2,4	190	17,24	16,04	18,01	16,64
Шлам полів зрошення	4,3		700	14,78	13,31	15,44	14,13

Таблиця 3

Результати досліджень композиційних палив з біомаси

№ зразка	Опис зразка	$q_б$ МДж/кг	Вологість аналіт. проби W^a,%	Вміст сірки Sc,%	Вміст водню Hc,%	Теплота згоряння аналітичної проби		Теплота згоряння на суху масу	
						вища $q^a_{вища}$ МДж/кг	нижча $q^a_{нижча}$, МДж/кг	вища $q^c_{вища}$, МДж/кг	нижча $q^c_{нижча}$, МДж/кг
1a	лушпиння + шлам (60:40)	16,71	7,8	0,12	6,00	16,668	15,27	18,08	16,77
1b	лушпиння + шлам (40:60)	16,39	7,8	0,12	6,00	16,347	14,95	17,73	16,42
2a	лушпиння + послід (60:40)	15,94	7,7	0,22	5,56	15,895	14,59	17,22	16,01
2b	лушпиння + послід (40:60)	13,29	7,7	0,27	5,34	13,234	11,97	14,34	13,17
3a	лушпиння + гній (60:40)	18,44	7,1	0,22	5,56	18,394	17,09	19,80	18,59
3b	лушпиння + гній (40:60)	18,39	7,1	0,27	5,34	18,337	17,08	19,74	18,57
1	солома + шлам (60:40)	16,38	6,3	0,12	6,00	16,339	14,96	17,44	16,13
2	солома + послід (60:40)	14,06	7,6	0,22	5,56	14,013	12,71	15,17	13,95
3	солома + гній (60:40)	18,05	7,6	0,22	5,56	18,004	16,70	19,49	18,27

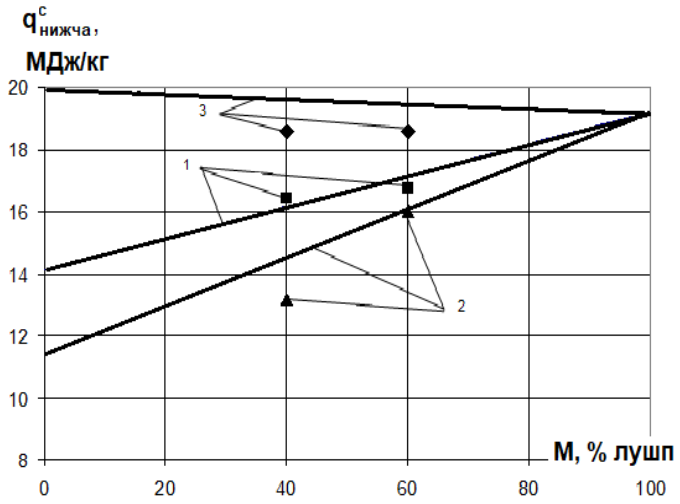

Рис.2. Залежність нижчої теплоти згоряння сухих композитних паливних сумішей від вмісту лушпиння соняшнику: 1 – суміш лушпиння і шламу; 2 - суміш лушпиння і курячого посліду; 3 - суміш лушпиння і гною.

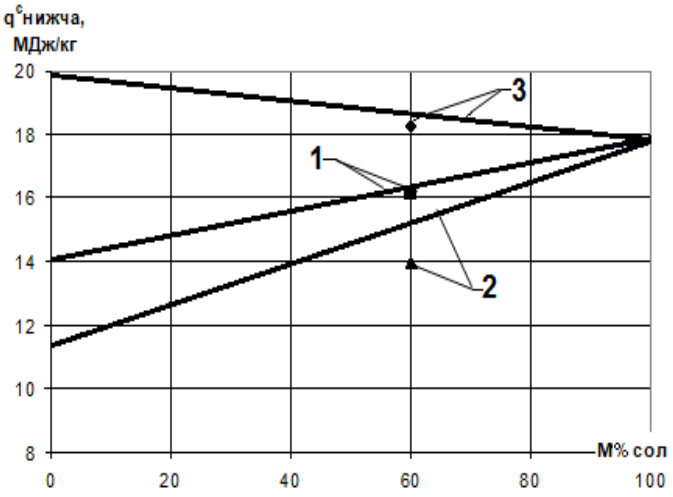

Рис. 3. Залежність нижчої теплоти згоряння сухих двокомпонентних сумішей від вмісту соломи пшениці: 1 – суміш соломи і шламу; 2 - суміш соломи і курячого посліду; 3 – суміш соломи і гною.

Результати досліджень залежності нижчої теплоти згоряння сухих двокомпонентних сумішей від вмісту одного з компонентів узагальнені графіками, які представлені на рисунках 2 і 3, де лініями показані розрахункові дані, отримані на підставі визначеної теплоти згоряння окремих компонентів, точки – результати експериментальних досліджень композитних зразків палив.

Композиційні паливні суміші на основі тирси і свинячого гною досліджувалися з вологістю 15,0%, яка вибрана оскільки таке значення може бути досягнуто технологічно відносно легко - шляхом сепарації або підсушування [17]. За експериментальними значеннями (таблиця 2) знаходимо, що нижча теплота згоряння гною за вологості 15% складає приблизно 13340 кДж/кг, а тирси за тієї ж вологості - 13780 кДж/кг. Підставляючи вказані значення у формулу (2), отримуємо значення теплоти згоряння композиційної

паливної суміші.

Для прикладу, в таблиці 4 наведені розрахункові значення нижчої теплоти згоряння (МДж/кг та ккал/кг) для композиційних паливних сумішей за різного вмісту гною та тирси при робочій вологості 15%. Залежність нижчої теплоти згоряння композиційних сумішей на основі тирси і свинячого гною від вмісту одного з компонентів представлено на рис. 4.

Аналогічні розрахунки можна проводити застосовуючи результати калориметричних вимірювань і для інших композиційних паливних сумішей з різною вихідною вологістю.

Таблиця 4

Розрахункові значення нижчої теплоти згоряння композиційних паливних сумішей при робочій вологості 15%

Нижча теплота згоряння при робочій вологості 15%	Вміст компонентів в суміші композиційного палива, $M_{гній}$ / $M_{тирса}$, %						
	100/0	80/20	60/40	50/50	30/70	10/90	0/100
МДж/кг ккал/кг	13,34 3188	13,43 3208	13,52 3229	13,56 3239	13,65 3260	13,73 3281	13,78 3291

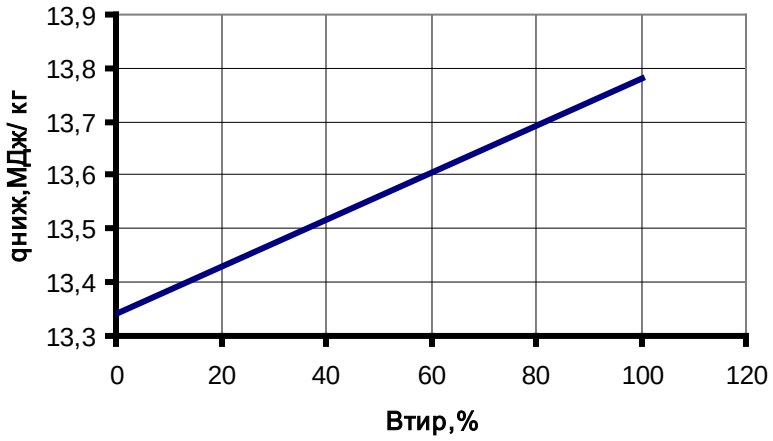

Рис.4. Залежність нижчої теплоти згоряння композиційного палива ($q_{ниж}$) від вмісту тирси ($M_{тирса}$,%) в суміші з свинячим гноєм

Так, на рис. 5 і 6 приведені результати розрахунків у графічному вигляді, як залежності нижчої теплоти згоряння від вологості досліджуваних композиційних палив. Числові позначки на графіках відповідають номерам зразків в табл. 1 і 3.

На підставі проведених експериментальних та розрахункових досліджень запропоновані емпіричні формули для розрахунку теплоти згоряння композиційних палив у сухому стані:

- вища теплота згоряння (МДж/кг):

$$q^{c}_{вища}=0,154\times M_{шлам}+0,191\times M_{сол}+0,205\times M_{лушп}+0,125\times M_{послід}+0,21\times M_{гній}+ \\ +0,172\times M_{гнійсв.}+0,180\times M_{тирса} \quad (3)$$

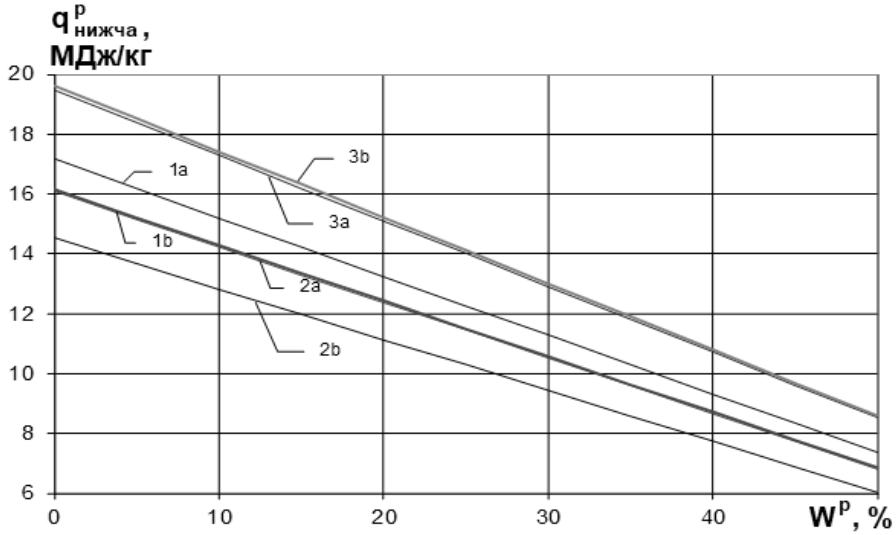

Рис.5. Залежність нижчої теплоти згоряння двокомпонентних палив на основі лушпиння від вологості.

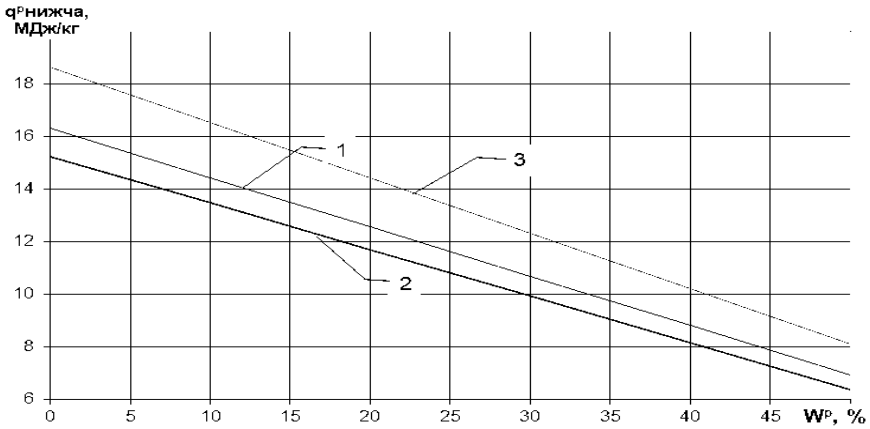

Рис. 6. Залежність нижчої теплоти згоряння двокомпонентних палив на основі соломи від вологості.

- нижча теплота згоряння (МДж/кг):

$$q^c_{нижча} = 0{,}141\times M_{шлам} + 0{,}178\times M_{сол} + 0{,}192\times M_{лушп} + 0{,}114\times M_{послід} + \\ + 0{,}199\times M_{гній} + 161\times M_{гнійсв.} + 0{,}166\times M_{тирса} \quad (4)$$

У таблиці 5 для порівняння наведені значення нижчої теплоти згоряння сумішей, що отримані за експериментальними даними та за емпіричною формулою (4), а також наведене відносне відхилення (%) цих значень.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що максимальна різниця між експериментально виміряними значеннями теплоти згоряння та значеннями отриманими розрахунком за емпіричною формулою (4) не перевищує 11 %. Найбільші розходження характерні для сумішей, до складу яких входить курячий послід. Крім того, при спалюванні таких композиційних палив спостерігалося утворення значної кількості золи (шлаків), маса якої сягала 40...50% від початкової маси проби палива.

Для більшості з обстежених компонентів палив (окрім курячого посліду) значення визначеної теплоти згоряння приблизно (з відхиленнями до 15...20%) співпадають з даними, наведеними в технічній літературі. Такі розходження

Таблиця 5

Значення нижчої теплоти згоряння композиційних сумішей, отримані за експериментальними даними та за емпіричною формулою (4).

№ зразка	Опис зразка	Нижча теплота згоряння на суху масу $q^c_{нижча}$, МДж/кг		Відносне відхилення, %
		отримана на підставі експерименту	отримана розрахунком по формулі (4)	
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
1	солома + шлам (60:40)	16,13	16,32	1,2
2	солома + послід (60:40)	13,95	15,24	9,2
3	солома + гній (60:40)	18,27	18,64	2,0
4	солома + шлам (40:60)	-	15,58	-
5	солома + послід (40:60)	-	13,96	-
6	солома + гній (40:60)	-	19,06	-

пояснюються різним походженням речовин, їх неоднорідністю, а також різною вологістю, яка не завжди наводиться в літературі. Визначене експериментально значення теплоти згоряння курячого посліду, виявилося приблизно на 35% менше ніж вказано в літературних джерелах [12,13]. Це може бути викликано протіканням біохімічних процесів у посліді під час зберігання, або частковим змішуванням посліду з негорючим підстилаючим ґрунтом.

Висновки

На підставі проведених експериментальних досліджень та розрахунків показана можливість утилізації відходів тваринництва та птахівництва шляхом виробництва композиційних палив в суміші з біомасою рослинного походження. Запропоновані емпіричні формули дають можливість розраховувати склад композиційних паливних сумішей та їх теплоту згоряння.

В роботі показано, що досліджені зразки відходів у стані поставки мають значну відносну вологість, що суттєво впливає на їх теплоту згоряння. Крім того, зроблено припущення, що під час довготривалого зберігання відходів птахівництва та тваринництва в них можливе протікання біохімічних процесів, що також змінює теплоту згоряння.

Зроблено висновок, що такі композиційні палива дозволяють вирішувати, на місцевому рівні, не тільки паливну проблему, але й проблему щодо забруднення довкілля такими відходами. З огляду на це, технологія ефективного використання таких композиційних палив має передбачати попереднє сушіння, сепарацію і подрібнення компонентів, їх змішування та брикетування, зберігання, застосування відповідних топкових пристроїв, видалення та утилізацію золи.

Література

1. Калетнік Г.М. Біопаливо, Продовольча, енергетична та економічна безпека України: монографія /Г.М. Калетнік.-К.: Хай-Тек Прес, 2010. – 516 с.

2. Саранчук В.І., Ільяшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. Хімія і фізика горючих копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. - 600с.

3. Гаджиев С. Н. Бомбовая калориметрия / С. Н. Гаджиев. – М.: Химия,1988. – 192 с.

4. Воробьев Л.И. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива / Л.И Воробьев, Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Том 70, №5. – С.828-839.

5. Определение теплотворной способности биотопливных смесей / Л.И.Воробьев, Л.Н. Грабов, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, А.И. Шматок //Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. –К., 2011. – Т. 33, №4 – С. 87-93. – ISSN 0204-3602.

6. ДСТУ EN 14774-2:2012 «Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі. Частина 2. Загальна волога. Спрощений метод (EN 14774-2:2009, IDT)».

7. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности.

8. ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76) «Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания»

9. ДСТУ EN 14918:2016. Тверде біопаливо. Метод визначення теплотворної здатності (EN 14918:2009, IDT).

10. ISO9831: 1998. Animal feeding stuffs, animal products, and faeces or urine. Determination of gross calorific value - Bomb calorimeter method.

11. С. Обидзински. Биомасса // Поддержка показательного партнерства по содействию сбалансированному развитию. С.33-54. http://www.pnec.org.pl/moldova/poradnik.pdf.

12. Применение газогенераторов для утилизации экскрементов животных. http://www.kotelprom.ru/gazifik_jivot.php.

13. Отходы животноводства: опасности неорганизованного хранения и возможности утилизации. http://www.ecodelta.com.ua/materials/broch.pdf.

14. EN 14918:2009 «Solid Biofuels - Determination of calorific value».

15. Лихачев Н.И., Ларин И.И., Хаскин С.А. и др. Канализация населенных мест и промышленных предприятий.; Под общ. ред. В. Н. Самохина. М.: Стройиздат, 1981. - 639 с.

16. Скляренко Є.В., Воробйов Л.Й. Калориметричний аналіз композитних палив з біомаси на основі соломи пшениці /Є.В.Скляренко, Л.Й.Воробйов. Журнал "The scientific heritage " Р 1, №32 (2019). С.38-43.

17. https://www.bluming.ru/catalog/liniya_briketirovaniya_svinogo_navoza

References:

1. Kaletnik, H. (2010). Biopalyvo. Prodovolcha, enerhetychna ta ekonomichna bezpeka Ukrainy [Biofuels. Food, energy and economic security of Ukraine]. Kyiv: Khai-Tek Pres – 516p.

2. Saranchuk, V.I., Ilyashov, M.O., Oshovsky, V.V., & Biletsky, V.C. (2008). Khimiya i fizyka horyuchykh kopalyn. [Chemistry and physics of combustible minerals]. - Donetsk: Skhidnyy vydavnychyy dim – 600p.

3. Gadzhiyev, S.N. (1988). Bombovaya kalorimetriya. [Bomb Calorimetry]. M.: Khimiya,. – 192 p.

4. 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.

5. Vorob'ev, L., Grabov, L., Dekusha, L., Nazarenko, O., & Shmatok, A. (2011). Opredelenie teplotvornoj sposobnosti biotoplivnyh smesej [Definition of calorific efficiency of biofuel's mixes]. *Promyshlennaja teplotehnika, 33*(4), 87–93.

6. 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.

7. GOST 11022-95 (ISO 1171-97) Mezhgosudarstvennyy standart. Toplivo tverdoye mineral'noye. Metody opredeleniya zol'nosti. [Interstate standard. Solid mineral fuel. Methods for the determination of ash]. Kyiv: Minekonomrozvytku.

8. Gosstandart Ukrainy. (1997). Toplivo 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.

9. DSTU EN 14918:2016 Tverde biopalyvo. Metod vyznachennya teplotvornoyi zdatnosti. [Solid biofuels. Calculation method]. (EN 14918:2009, IDT).

10. ISO9831: 1998. Animal feeding stuffs, animal products, and faeces or urine. Determination of gross calorific value - Bomb calorimeter method.

11. Obidzinski, S. (2006). *Biomass*. Retrieved February 1, 2019, from http://www.pnec.org.pl/moldova/poradnik.pdf.

12. Primeneniye gazogeneratorov dlya utilizatsii ekskrementov zhivotnykh. [The use of gas generators for the disposal of animal excrement]. http://www.kotelprom.ru/gazifik jivot.php.

13. Otkhody zhivotnovodstva: opasnosti neorganizovannogo khraneniya i vozmozhnosti utilizatsii. [Livestock waste: the dangers of unorganized storage and disposal options]. http://www.ecodelta.com.ua/materials/broch.pdf.

14. EN 14918:2009 «Solid Biofuels - Determination of calorific value».

15. Likhachev, N.I., Larin, I.I., & Khaskin S.A. (1981). Kanalizatsiya naselennykh mest i promyshlennykh predpriyatiy. [Sewerage of populated places and industrial enterprises]. Pod obshch. red. V. N. Samokhina. M.: Stroyizdat - 639 p.

16. Sklyarenko, Ye.V., Vorobiov, L.Y. (2019). Kalorymetrychnyy analiz kompozytnykh palyv z biomasy na osnovi solomy pshenytsi. [Calorimetric analysis of composite fuels from biomass based on wheat straw]. *The scientific heritage.* P.1, №32, 38-43.

17. https://www.bluming.ru/catalog/liniya_briketirovaniya_svinogo_navoza.

Abstract. *The results of calorimetric studies of combustion heat of composite fuel samples based on sunflower husk, wheat straw and sawdust in combination with agricultural wastes are presented. The proposed empirical formulas for calculating the lower working heat of combustion of composite fuels, depending on the mass content of their constituent and initial moisture content. The production of such composite fuels allows us to utilize a significant amount of waste, which helps to solve both the fuel issue at the local level and the problems of environmental pollution with waste.*

Key words *: biomass, composite fuel, fuel capacity, bomb calorimetry*

Науковий керівник: чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. Бабак В.П. Стаття підготовлена у рамках виконання науково-дослідної теми «Розроблення

наукових основ, вимірювальних технологій та систем шумової діагностики теплоенергетичного обладнання в житлово-комунальному господарстві» (шифр: 1.7.1.865).

Стаття відправлена: 06.06.2019 г.

© Скляренко Є.В., Воробйов Л.Й.