

УДК 662.636.

О.С.Матвійчук (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ),**О.В.Рудавіна** (ДП "УкрНДІвуглезбагачення", Луганськ), **М.В.Чернявський** (Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, Київ)

Експериментальне дослідження фізико-хімічних і теплотехнічних властивостей соломи та лушпиння як твердого біопалива

Наведено огляд паливного потенціалу сільськогосподарських відходів біомаси в Україні. Систематизовано основні фізико-хімічні та теплотехнічні властивості найбільш поширених видів паливної біомаси. Виявлено властивості, що вимагають поглибленого дослідження для розробки вимог до біомаси як до енергетичного палива та при створенні котлоагрегатів. Наведено результати експериментального дослідження зразків вітчизняної соломи та лушпиння методами аналізу, гармонізованими з міжнародною системою стандартизації, і виявлено раніше невідомі закономірності.

Приведен обзор топливного потенциала сельскохозяйственных отходов биомассы в Украине. Систематизированы основные физико-химические и теплотехнические свойства наиболее распространенных видов топливной биомассы. Выявлены свойства, требующие углубленного исследования для разработки требований к биомассе как к энергетическому топливу и при создании котлоагрегатов. Представлены результаты экспериментального исследования образцов отечественной соломы и лузги методами анализа, гармонизированными с международной системой стандартизации, и выявлены ранее неизвестные закономерности.

Вступ. В умовах стрімкого подорожчання та необхідності зниження паливного використання імпортованих природного газу та нафтопродуктів, а також дефіциту енергетичного вугілля, що виник завдяки збільшенню частки твердого палива у паливній базі ТЕС [1], все більша увага звертається на місцеві відновлювані джерела енергії, зокрема, на паливну біомасу. Відомо, що в Україні економічно доцільний потенціал біомаси, придатної для виробництва енергії, досягає 27 млн т у.п. на рік [2]. З цього помітну частину складають тверді відходи агропромислової біомаси – солома і лушпиння (табл. 1).

Таблиця 1. Енергетичний потенціал основних видів відходів агропромислової біомаси в Україні ([2], дані за 2008 р.)

Вид біомаси	Енергетичний потенціал, млн т у.п.		
	Теоретичний	Технічний	Економічний
Солома зернових	10,39	5,21	1,34
Солома ріпаку	1,65	1,15	1,15
Відходи кукурудзи та соняшнику	9,97	6,85	5,65
Всього	22,01	13,21	8,14

Величину економічного (тобто, з урахуванням усіх втрат у ланцюжку збору та паливоприготування [2]) потенціалу – 8 млн т на рік – легше

зрозуміти в порівнянні з нинішніми річними обсягами використання природного газу на ТЕС (менше 1 млн т у.п. [1]) і в житлово-комунально-побутовому секторі (більше 30 млн т у.п. [3]). Вважається, що через меншу зольність і менший вміст сірки, ніж у вугіллі, біомаса більш придатна для заміни природного газу саме в комунальних і промислових котельнях [4]. Крім того, біомаса є відновлюваним, вуглецево-нейтральним паливом, використання якого не призводить до посилення глобального парникового ефекту [2].

Однак поряд із цими позитивними властивостями біомаса має і такі, що ускладнюють її використання як твердого палива. Серед них – низька насипна щільність, що обумовлює підвищені габарити паливних бункерів; специфічна крупність і волоконна структура, що вимагають спеціального паливоприготування; низька калорійність, пов'язана з великим вмістом кисню в органічній частині; нарешті, високий вміст лужних металів у золі, що зумовлює нижчі, ніж у вугілля, температури її плавкості.

У зв'язку з цим актуальним є відпрацювання методології комплексного дослідження фізико-хімічних і теплотехнічних властивостей біомаси для розробки вимог до неї як до енергетичного палива, а також до котлоагрегатів для її спалювання.

Порівняння найважливіших фізико-хімічних і теплотехнічних властивостей різних видів твердих палив та біопалив.

Основними напрямками використання паливної біомаси вважаються: факельне спалювання, в т.ч. спільно з вугіллям [5]; спалювання у щільному та комбінованому шарі [6]; газифікація з наступним допалюванням газоподібних продуктів [7]. Для всіх цих технологій основними характеристиками твердих палив, які використовуються для стандартизації технічних вимог до них при проектуванні енергоустановок і оптимізації режимів термічної переробки, є наступні [8]:

- вологість, зольність, вихід летких речовин, які визначаються технічним аналізом;
- елементний склад сухої беззольної маси – вміст вуглецю, водню, азоту, кисню, вміст загальної сірки;
- теплота згоряння, яку визначають калориметричним аналізом і перераховують із вищої на нижчу з використанням окремо встановлених показників вологості, вмісту водню і загальної сірки;
- температура плавкості золи, в окремих випадках – склад золи по вищих оксидах;
- вміст у золі шкідливих компонентів – хлору та важких металів.

Таблиця 2. Порівняння основних теплотехнічних характеристик соломи (зарубіжні дані) з вітчизняними твердими енергетичними паливами

Показник	Розмірність	Солома [2]	Солома [9]	Торф ¹	Дніпровське буре вугілля ¹	Донецьке газове вугілля
Технічний аналіз (на робочу масу)						
Вологість	%	7,9	7-10	10,0	10,0	11,0
Зольність	%	9,0	5	9,9	20,3	22,3
Вихід летких	%	66,1	68-74	55,3	41,8	26,7
Нелеткий вуглець	%	17,0	-	24,8	27,9	40,0
Елементний аналіз (на суху беззольну масу)						
Вуглець	%	48,0	49,0	57,6	66,9	80,0
Водень	%	5,8	6,3	5,8	5,7	5,3
Азот	%	0,7	0,5	2,5	0,7	1,5
Кисень	%	45,5	43,0	33,7	21,8	9,8
Сірка	%	0,1	0,1	0,4	4,9	3,4
Калориметричний аналіз						
Теплота згоряння вища на суху беззольну масу	МДж/кг	18,7	20,8	23,1	28,3	33,9
Теплота згоряння нижча на робочу масу	МДж/кг	14,4	16,8-17,5	17,5	18,7	21,6
Температури плавкості золи						
t_A	°C	770	860	1190	1040	1100
t_B	°C	1045	1080	1310	1240	1220
t_C	°C	1080	1270	1360	1300	1280
Хімічний склад золи						
SiO ₂	%	-	42,9	35,3	59,7	43,0
Al ₂ O ₃	%	-	0,2	8,8	19,0	24,0
Fe ₂ O ₃	%	-	0,3	15,7	9,3	23,5
CaO+MgO	%	5,7	13,5	35,9	10,0	5,2
K ₂ O+Na ₂ O	%	13,1	25,4	4,3	0,7	3,8
Cl	%	2,8	8,0	-	-	-

¹ Вологість фрезерного торфу та дніпровського бурого вугілля сягає 50%. Для порівняння їх характеристики перераховані на вологість 10%.

В таблиці 2 порівнюються основні теплотехнічні показники соломи пшениці за зарубіжними даними [2, 9] з вітчизняним торфом, дніпровським бурим і донецьким газовим вугіллям (концентратом енергетичним) [10]. З таблиці видно, що в ряду "газове - буре вугілля - торф - солома" зростає вихід летких речовин і знижується частка нелеткого вуглецю, що полегшує умови займання соломи і вимагає врахування при встановленні розподілу первинного і вторинного дуття при спалюванні. У той же час, незважаючи на зниження зольності, калорійність у цьому ряду суттєво зменшується. Це пов'язано зі зростанням вмісту кисню і зниженням вмісту вуглецю в органічній частині палива, через що вища теплота згоряння на суху беззольну масу соломи майже удвічі менша, ніж газового вугілля. Через більш низьку калорійність при спалюванні соломи в топці будуть розвиватися більш низькі температури, ніж при спалюванні вугілля і торфу; отже, при проектуванні потрібне збільшення теплосприймаючих поверхонь котла. Крім того, на одиницю виділеного тепла масова витрата соломи буде майже удвічі більшою, а об'ємна витрата, якщо не вжити заходів щодо її ущільнення, – у багато разів більшою, ніж газового вугілля.

Серед інших істотних тенденцій у цьому ж ряду можна виділити:

- зниження вмісту сірки, що дозволяє спалювати соломі без сіркоочищення навіть у комунальних котельнях;
- збільшення мольного відношення водень/вуглець від 0,79 до 1,45, що, як правило, пов'язане з неповним відщепленням водню при піролізі і вимагає врахування при розрахунку процесу горіння коксового залишку;
- зниження температур плавкості золи, що, коли не вжити спеціальних заходів, призводить до прискореного шлакування поверхонь нагріву [11].

Останнє пов'язане з тим, що в золі соломи менше тугоплавких компонентів (оксидів кремнію, алюмінію, лужноземельних металів) і більше легкоплавких (оксидів лужних металів). Що стосується такого шкідливого і хімічно активного компонента як хлор, то для вугілля і торфу його вміст настільки несуттєвий, що на практиці він

вимірюється рідко. У соломі, навпаки, хлор є помітним компонентом мінеральної частини.

У [2] вказується, що за даними зарубіжних досліджень фізико-хімічні та теплотехнічні характеристики істотно відрізняються у соломі різних злаків, ріпаку, лузги, а також залежно від умов збору і зберігання паливної біомаси. Це добре видно з порівняння даних [2] і [9] по соломі. За даними [2], в золі соломи приблизно в 3 рази менше хлору, в 2-3 рази – оксидів лужних і лужноземельних металів, а температури плавкості золи на 90-190°C нижчі, ніж за даними [9]. Можливо, це пов'язано з тим, що сполуки хлору, солі лужних і частково лужноземельних металів є розчинними, тому при зберіганні можуть вимиватися з біомаси, а саме з їх наявністю пов'язані температури плавкості золи [11].

Для українських агропромислових відходів такі дослідження не проводилися. При їх виконанні, крім традиційного технічного, елементного, калориметричного аналізу, аналізу складу (з особливою увагою до вмісту лужних і лужноземельних металів) і температур плавкості золи, важливим є встановлення природи залежностей теплотехнічних характеристик від походження і складу твердих біопалив.

Порівняння стандартних методів аналізу вугілля і паливної біомаси. Апробація нових для України стандартних методів аналізу паливної біомаси.

В Україні діють такі стандарти на відбір, підготовку і аналіз проб вугілля [12, 13]:

- ДСТУ 4096-2002 Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань;
- ГОСТ 27314-91 Паливо тверде мінеральне. Методи визначення вологи;
- ГОСТ 6382-91 Паливо тверде мінеральне. Методи визначення виходу летких речовин;
- ГОСТ 11022-95 Паливо тверде мінеральне. Методи визначення зольності;
- ДСТУ 3528-97 (ГОСТ 8606-93) Паливо тверде мінеральне. Визначення загальної сірки. Метод Ешка;

- ДСТУ ISO 1928:2004 Палива тверді мінеральні. Визначення вищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та розрахунок нижчої теплоти згоряння;

- ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625-75) Паливо тверде. Методи визначення вуглецю і водню;

- ГОСТ 27313-95 (ИСО 1170-77) Паливо тверде мінеральне. Позначення показників якості та формули перерахунку результатів аналізу для різних станів палива;

- ГОСТ 2057-94 Паливо тверде мінеральне. Методи визначення плавкості золи.

Ряд вимог, що містяться в цих стандартах, незастосовний до паливної біомаси. Наприклад, через волокнистість структури солома і лушпиння не можуть розмелюватися для забезпечення крупності аналітичної проби менше 0,2 мм; при підготовці проб золи для визначення температур її плавкості методом спалювання проби палива температура спалювання, на відміну від вугілля, не може бути 850-900°C, оскільки це перевищує температуру плавкості золи біомаси. Цілий ряд специфічних вимог стосується аналізу елементного складу біомаси та складу золи. Проте до останнього часу в Україні не було спеціальних стандартів для підготовки та аналізу проб біомаси.

В рамках Програми гармонізації національних стандартів України з міжнародною системою стандартизації такі нормативні документи (національні ідентичні пробні стандарти) нещодавно з'явилися, в тому числі:

- ДСТУ-П CEN / TS 14780 Біопаливо тверде. Методи готування проб;

- ДСТУ-П CEN / TS 13774 Біопаливо тверде. Методи визначання вмісту вологи. Методи висушування у сушильній шафі;

- ДСТУ-П CEN / TS 15148 Біопаливо тверде. Методи визначання вмісту летких речовин;

- ДСТУ-П CEN / TS 14775 Біопаливо тверде. Методи визначання вмісту попелу;

- ДСТУ-П CEN / TS 14918 Біопаливо тверде. Методи визначання теплотворної здатності;

- ДСТУ-П CEN / TS 15104 Біопаливо тверде. Методи визначання загального вмісту вуглецю, водню і азоту;

- ДСТУ-П CEN / TS 15289 Біопаливо тверде. Визначення вмісту загальних сірки та хлору;

- ДСТУ-П CEN / TS 15290 : 2009 Біопаливо тверде. Визначення основних елементів;

- ДСТУ-П CEN / TS 15296 Біопаливо тверде. Обчислювання складу за різними базами.

Очікують впровадження національні стандарти, гармонізовані з такими міжнародними:

- EN 15103: 2009 Метод визначення насипної щільності;

- CEN / TS 15370-1:2006 Метод визначення поведінки плавлення золи;

- EN 15105: 2011 Метод визначення хлоридів, натрію і калію.

Формат зазначених випробувань та аналізу дає підстави для коректного порівняння отриманих результатів із результатами, що містяться у зарубіжних джерелах. Проте застосування цих поширених за кордоном методів в Україні досі не було апробовано. В цій роботі вперше в Україні виконане комплексне дослідження декількох видів вітчизняної соломи та лушпиння з апробацією стандартних методів підготовки та аналізу проб біопалива.

Результати експериментальних досліджень.

Для дослідження були відібрані зразки соняшникового лушпиння з Пологівського олійно-екстракційного заводу (Запорізька обл.) і соломи пшениці з Вишгородського та Васильківського районів Київської обл. Підготовка проб до аналізу здійснювалася в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України, аналізування – у вуглехімічній лабораторії ДП "УкрНДІвуглезбагачення". Результати технічного аналізу зразків наведені в табл. 3, елементного складу сухої беззольної маси, калорійності та плавкості золи – в табл. 4, хімічного складу золи – в табл. 5. Результати добре збігаються з даними зарубіжних досліджень [2, 9] по волозі, зольності, виходу летких речовин, вмісту сірки і хлору. Вони ближче до даних [9] за елементним складом сухої беззольної маси і калорійністю (в [9] і у вітчизняних зразках більше вуглецю і менше кисню, відповідно – більша вища теплота згоряння сухої беззольної маси, ніж наведено в [2]).

Хімічний склад золи вітчизняних зразків відрізняється значним коливанням вмісту діоксиду кремнію, оксидів лужних та лужноземельних металів, сума часток компонентів не досягає 100%. Визначені температури плавкості золи демонструють інакші закономірності, ніж у зарубіжних дослідженнях. Так, температура плавлення t_C зразка №2 збігається з [9], зразків №3-5 близька до [2], зразка №1 – проміжна між ними; але температура початку деформації t_A вітчизняних зразків виявилась

на 190-380°C більшою, ніж у [9], і на 280-470°C більшою, ніж у [2]. Загалом, різниця між t_C і t_A вітчизняних зразків виявилася значно меншою (30-50°C), ніж у зарубіжних дослідженнях (310-410°C). Для пояснення цих та інших особливостей, а також для оцінки впливу складу мінеральної частини на температури плавкості золи потрібен більш докладний аналіз із оцінкою фактичного розподілу сірки, вуглецю і кисню в мінеральній та органічній речовинах.

Таблиця 3. Результати технічного аналізу зразків вітчизняного лушпиння та соломи

№ проби	Найменування	Місце і час відбору	Примітка	Вміст вологи W_t^r , %	Зольність A^d , %	Вміст сірки S_t^d , %	Вихід летких речовин V^{daf} , %
1	Лушпиння соняшника	ОЕЗ м. Пологи, 2009	Відходи виробництва	9,45	3,8	0,21	77,1
2	Солома ярова	Васильківський р-н, 2010	Удобрене поле, під навісом	14,82	9,0	0,15	79,8
3	Солома озима	Вишгородський р-н, 2011	Відкрите зберігання	10,83 ¹	3,2	0,04	83,7
4	Солома озима	Вишгородський р-н, 2011	Зберігання під навісом	9,78	8,9	0,21	78,5
5	Солома озима	Васильківський р-н, 2011	Удобрене поле, під навісом	10,33	5,2	0,15	80,2

¹ Підсушена для подрібнення при готуванні проби.

Таблиця 4. Результати елементного, калориметричного аналізу та визначення температур плавкості золи зразків вітчизняного лушпиння та соломи

№ проби	Елементний склад, %				Cl, %	P, %	Вища теплота згорання, Q_s^{daf}		Температури плавкості золи, °C		
	H_o^{daf}	C_o^{daf}	$(N+O)_o^{daf}$	S_o^{daf}			МДж/кг	ккал/кг	t_A	t_B	t_C
1	5,29	50,60	43,89	0,22	0,09	0,007	20,520	4901	1140	1150	1180
2	5,97	52,90	40,97	0,16	0,26	0,134	21,169	5056	1240	1260	1270
3	6,11	50,50	43,34	0,05	0,03	0,090	19,968	4769	1070	1090	1100
4	6,10	50,00	43,66	0,24	0,40	0,280	19,660	4696	1050	1070	1100
5	4,80	49,83	45,21	0,16	0,12	0,038	19,476	4652	1080	1100	1110

Таблиця 5. Результати визначення хімічного складу зразків вітчизняного лушпиння та соломи в перерахунку на вищі оксиди

№ проби	Хімічний склад, %											
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Mn ₃ O ₄	P ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Всього
1	3,34	2,50	—	16,45	11,84	0,07	0,08	3,78	9,23	4,43	17,75	69,5
2	59,83	2,99	2,80	8,40	3,40	0,23	0,14	4,16	3,53	2,25	4,65	92,4
3	44,09	2,48	—	14,34	5,79	0,07	0,19	8,94	4,92	2,55	7,25	90,6
4	30,04	2,99	—	7,70	4,79	0,10	0,13	14,48	5,38	3,88	17,25	86,7
5	43,03	2,00	—	5,25	1,51	0,02	0,05	3,36	3,50	1,73	21,50	82,0

Перше питання стосується сірки. З порівняння даних табл. 4 та 5 складається враження, ніби сума органічної та мінеральної сірки значно перевищує загальну сірку (табл. 3). Однак слід згадати, що суміш Ешка, якою користуються для зв'язування сірки в зольному залишку при стандартному визначенні вмісту загальної сірки, являє собою суміш оксиду магнію і карбонату натрію. У золі всіх зразків достатньо магнію, натрію та інших лужних і лужноземельних металів для повного зв'язування сірки, незалежно від її походження. Звідси випливає, що поділ сірки у зразках на органічну та мінеральну не має сенсу – після випалу більша її частина залишиться в зольному залишку.

Друге питання стосується того, чому сума мас оксидів у зольному залишку менша за 100% (у середньому 84,2%). Справа в тому, що в мінеральній частині як вугілля, так і біомаси лужні та лужноземельні метали містяться у вигляді не оксидів, а здебільшого карбонатів та сульфатів. При визначенні зольності вугілля (спалювання при 815°C) вони розкладаються до оксидів, тому сума оксидів є близькою до кількості золи. Біопаливо для визначення зольності спалюють при 550°C, при цьому більша частина карбонатів і сульфатів не розкладається. Тому можна припустити, що різниця між сумою оксидів та кількістю стандартно визначеної золи (по суті, нерозкладеної мінеральної маси) біопалива дорівнює кількості газо-

подібних продуктів розкладу карбонатів та сульфатів – CO₂ та SO₃. На користь цього припущення говорить таблиця 6, де за рахунок перерахування оксидів на карбонати і сульфати сума компонентів наблизилась до 100% (в середньому 104%). Зазначимо, що на практиці спалювання в енергоустановках відбувається при більш високих температурах, при цьому карбонати та сульфати в основному розкладаються, так що маса зольного залишку наближається до суми мас оксидів.

Наступне питання полягає в причині принципово різного складу золи зразків лушпиння (3% оксиду кремнію) і соломи (30-60% оксиду кремнію). Імовірно, що причина полягає в різній природі компонентів мінеральної частини біопалива. Відомо, що в самій органічній речовині вміст кремнію незначний, помітний внесок можуть дати скоріше сторонні мінеральні включення – пісок та глина. При виробництві олії першою технологічною операцією є очищення насіння від мінеральних домішок – це і пояснює низький вміст оксиду кремнію в золі лушпиння. Тому властивості золи лушпиння слід розглядати окремо. Її відносно високі температури плавкості пов'язані, скоріше за все, з наявністю тугоплавких оксидів кальцію ($T_{пл} = 2570^\circ\text{C}$) та магнію ($T_{пл} = 2825^\circ\text{C}$) в кількості майже 30% (в інших зразках – менше 20%), що здатні утворювати стійку до теплових деформацій структуру зразка, який аналізується.

Таблиця 6. Результати визначення хімічного складу зразків у перерахунку лужних та лужноземельних металів на карбонати і сульфати

№ проби	Хімічний склад, %										
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaCO ₃ +CaSO ₄	MgCO ₃	TiO ₂	Mn ₃ O ₄	P ₂ O ₅	Na ₂ CO ₃	K ₂ CO ₃	Всього
1	3,34	2,50	–	33,53	24,86	0,07	0,08	3,78	7,57	26,06	101,8
2	59,83	2,99	2,80	16,59	7,14	0,23	0,14	4,16	3,85	6,83	104,6
3	44,09	2,48	–	27,82	12,16	0,07	0,19	8,94	4,36	10,64	110,8
4	30,04	2,99	–	16,17	10,06	0,10	0,13	14,48	6,63	25,32	105,9
5	43,03	2,00	–	10,95	3,17	0,02	0,05	3,36	2,96	31,56	97,1

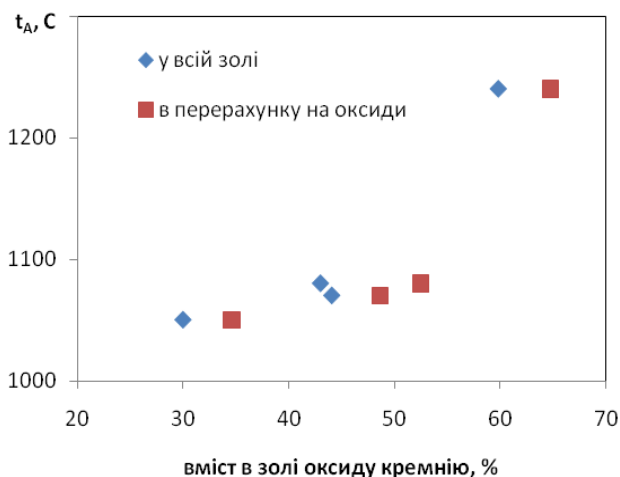


Рис. 1. Залежність температури деформації від вмісту в золі пшениці оксиду кремнію.

Зола зібраної з поля соломи пшениці, навпаки, багата на привнесений із ґрунтом оксид кремнію ($T_{пл}=1713-1728^{\circ}\text{C}$), який виступає як структуроутворюючий тугоплавкий компонент. На рис. 1 видно, що величина t_A зі збільшенням вмісту в золі оксиду кремнію монотонно зростає. Зміна t_A від вмісту оксидів лужних металів (рис. 2) має інший характер: зниження при зростанні вмісту оксидів до 10% і далі без явної залежності.

Відносно високі температури плавкості золи вітчизняних твердих біопалив не означають можливості їх безпечного спалювання. Справа в тому, що при спалюванні в реальних котлоагрегатах найнебезпечнішим є шлакування поверхонь нагріву, яке відбувається за дещо іншим механізмом, ніж просте плавлення золи, а саме – шляхом нерівномірного осаду реакційних компонентів золи (залізо, кальцій, оксиди лужних металів або їх сполуки з сіркою), які являють собою низькоплавкі евтектичні суміші. Температуру початку шлакування t_{is} звичайно оцінюють за методикою УралВТІ [11], яка в якості основних параметрів використовує суму кислотних оксидів: $K=SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$ і суму основних оксидів: $O=CaO+MgO+K_2O+Na_2O$. Величину t_{is} , $^{\circ}\text{C}$, розраховують із виразу: $t_{is}=945+8,22 K/O$. На рис. 3 для зразків соломи пшениці наведено залежності t_A і t_{is} від суми основних оксидів. Обидві залежності є монотонно

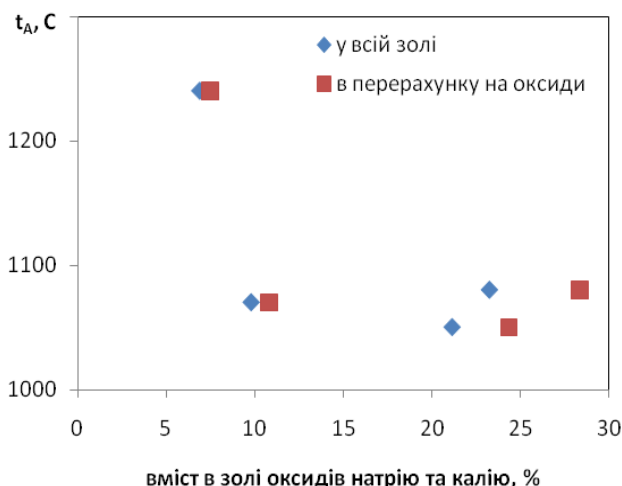


Рис. 2. Залежність температури деформації від вмісту в золі пшениці оксидів лужних металів.

спадаючими, але рівень t_{is} є значно нижчим і таким, що близький до даних [9]. Можна зробити висновок, що для золи вітчизняної соломи пшениці саме температури шлакування, а не плавкості золи, являють головний фактор ризику при спалюванні в котлоагрегатах.

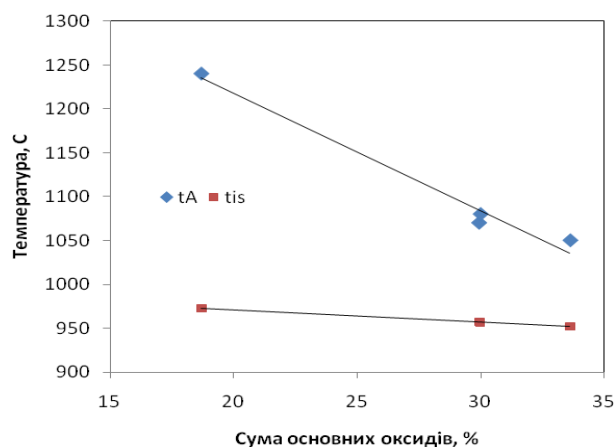


Рис. 3. Залежності температур початку деформації та шлакування від вмісту оксидів у золі соломи пшениці.

За вищою теплоотою згоряння на суху беззолу масу проаналізовані зразки можна поділити на 2 групи: №1, 2 з $Q_s^{daf}=20,5-21,2$ МДж/кг (близько до [9]) і №3-5 з $Q_s^{daf}=19,5-19,9$ МДж/кг (ближче до [2]). Це стає зрозумілим, якщо згадати, що в солоній озимій пшениці основною складовою є низькокалорійна целюлоза із високим вмістом кисню, в солоній ярової пшениці більше більш калорійного білку, а в соняшниковому лушпинні, ймовірно, наявний залишок більш калорійних жирів.

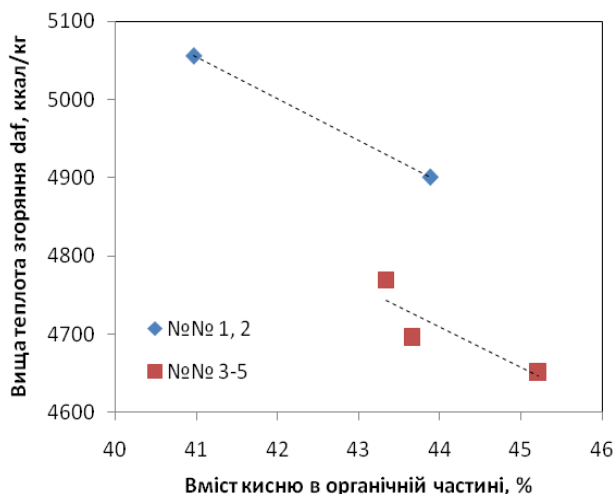


Рис. 4. Залежність величини Q_s^{daf} від частки кисню в органічній частині зразків біопалив.

В рядах зразків 1-2 і 3-5 спостерігається зменшення величини Q_s^{daf} зі збільшенням частки кисню в органічній речовині (рис. 4). Схожа залежність спостерігається від частки розкладу мінеральної речовини у відсотках сухої маси палива, яку можна оцінити як добуток зольності на різницю між 100% і сумою оксидів (див. табл. 5). В [13] подібний ефект для вугілля пов'язувався з удаваним збільшенням сухої беззольної маси палива на розкладену частину мінеральної речовини, але кількісний аналіз показує, що в даному випадку цього недостатньо. Імовірно, що в дану залежність внесок дає ендотермічний ефект розкладу карбонатів (від 100-180 кДж/моль для лужноземельних до 300-390 кДж/моль для лужних металів), сульфатів, а також вивільнення гідратної води. Схожість залежностей на рис. 4 і рис. 5 пов'язана з тим, що при розкладі мінеральної речовини в позірній "сухій беззольній масі" збільшується частка кисню за рахунок внеску продуктів розкладу – CO_2 і H_2O .

Висновки. Паливна біомаса, насамперед, тверді агропромислові відходи (солома, лушпиння), може стати суттєвим компонентом ПЕК України, а такі її властивості, як високий вихід летких речовин (що робить можливим низькотемпературне займання і спалювання) і низький вміст сірки зумовлюють її пріоритетне використання для заміни природного газу в комунальних і промислових котельнях. Однак ряд фізи-

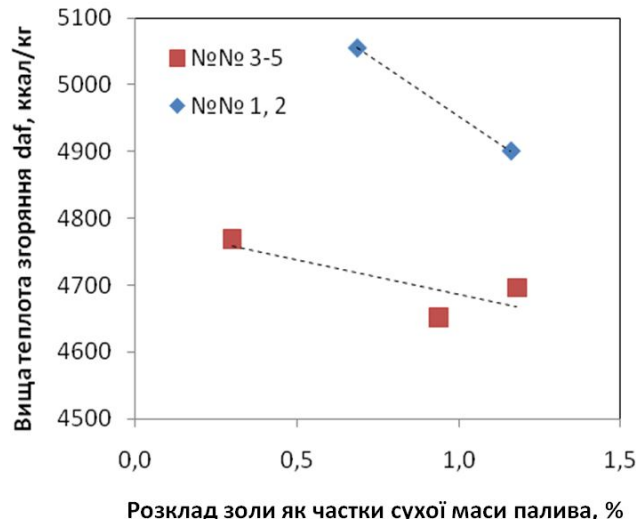


Рис. 5. Залежність величини Q_s^{daf} від частки розкладу мінеральної речовини, % від сухої маси палива.

ко-хімічних і теплотехнічних властивостей паливної біомаси істотно відрізняє її від вугілля, що вимагає врахування при створенні технологій її спалювання.

Це низькі температури плавкості золи, пов'язані з високим вмістом лужних металів, високий вміст кисню в органічній частині, з чим пов'язаний низький рівень Q_s^{daf} , та інше. Зарубіжні дослідження властивостей твердих біопалив часто не мають комплексного характеру, характеризуються значними розбіжностями даних і не завжди можуть бути перенесені на вітчизняні біовідходи. Між тим, комплексні дослідження вітчизняної соломи та лушпиння досі не проводилися, зокрема, внаслідок відсутності відповідних стандартів.

Основним результатом представленої роботи є відпрацювання методів аналізу твердих біопалив, гармонізованих із міжнародною системою стандартизації, а також дослідження основних теплотехнічних властивостей зразків вітчизняної соломи і лушпиння та їх природи. Зокрема, визначено вологість, зольність та вихід летких речовин, температури плавкості і шлакування золи, їх залежність від природи та складу мінеральної речовини палив, поведінку сірки при спалюванні біомаси. Встановлено вищу теплоту згоряння сухої беззольної маси по групах біовідходів, її залежність від складу органічної частини та від внеску продуктів термічного розкладу мінеральної частини.

Продовження досліджень та узагальнення їх результатів дадуть вихідні дані для створення енергоустановок на вітчизняних твердих біопаливах, в тому числі – з переведенням на них газових котлів, а також для розробки стандартних вимог до якості та паливоприготування відходів біомаси.

1. *Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В.* Влияние качества угля на эффективность его пылевидного сжигания на ТЭС Украины // Энергохозяйство за рубежом. – 2011. – №5 (258). – С. 23–28.

2. *Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б.Блюм, Г.Г.Гелетука, І.П.Григорюк та ін.* – К.: "Аграр Медіа Груп", 2010. – 326 с.

3. *Базеев С.Т.* Оцінка обсягів та преспективи споживання котельно-пічного палива комунальною теплоенергетикою України // В кн.: Комунальна енергетика України: Стан, проблеми, шляхи модернізації. Т.1. – К.: ІТФ НАН України, 2007. – С. 19–22.

4. *Современное состояние и перспективы развития биоэнергетики в Украине / Г.Г.Гелетука, Т.А.Железная, Н.М.Жовмир, Ю.Б.Матвеев* // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27. – №1. – С. 78–85.

5. *Экспериментальное исследование процесса совместного факельного сжигания антрацита с древесной биомассой / Н.И.Дунаевская, Я.И.Засядько, Т.С.Щудло и др.* // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – №3. – С. 10–17.

6. *Энергетическое использование органических отходов промышленности и сельского хозяйства / М. Губинский и др.* // Вісник Держ. університету "Львівська політехніка". Спец. випуск "Проблемі економії енергії". – 1998. – С. 179–182.

7. *Перспективы использования в Украине современных технологий термохимической газификации и пиролиза биомассы / Г.Г. Гелетука, Т.А. Железная и др.* // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т.19. – №4-5. – С. 115–120.

8. *Майстренко А.Ю., Чернявский Н.В., Стегний Н.Г.* Техническое обоснование нормативных требований к качеству энергетических углей и ценовая шкала как средство их обеспечения // Экологические и ресурсосбережение. – 2007. – №6. – С. 3–8.

9. *Dahl J., Andersen M.B.* Project Biolex FU3229 ORDRE-104804. Final Report. – Denmark: Force Technology, 2007. – 21 pp.

10. *Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.

11. *Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла / А.Н.Алехнович, В.В.Богомолов, В.Е.Гладков, Н.В.Артемьева* // Теплоэнергетика. – 1997. – № 3. – С. 64–68.

12. *Стандартные методы испытания углей.* Классификация углей / И.В. Авгушевич, Т.М. Броневец, Г.С.Головин и др. – М.: НТК "Трек", 2008. – 368 с.

13. *Філіппенко Ю.М.* Вплив мінеральних компонентів на теплотехнічні характеристики енергетичного вугілля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06. – Київ: ІГ НАН України, 2010. – 20 с.