

УДК 622.311

Кузьменко Б.В.,
д.т.н., професор,
Академія муніципального управління;
Матвійчук О.С.,
к.т.н.
Верховна Рада України, спеціальна
контрольна комісія з питань
приватизації, зав. Секретаріатом

ЕНЕРГЕТИЧНЕ СПАЛЮВАННЯ І ГАЗИФІКАЦІЯ СОЛОМИ ТА, ЯК ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

Виконано апробацію нових для України методів підготовки та аналізу проб соломи і лушпиння соняшнику, гармонізованих з міжнародною системою стандартизації. Здійснено порівняння із зарубіжними аналогами, визначено їх характерні відмінності.

Ключові слова: енергетичне спалювання, газифікація соломи, газифікація лушпиння, тверде біопаливо

Кузьменко Б.В.,
д.т.н. професор,
Академія муніципального управління;
Матвійчук А.С.,
к.т.н.
Верховная Рада Украины, специальная
контрольная комиссия по вопросам
приватизации, зав. Секретариатом

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СЖИГАНИЯ И ГАЗИФИКАЦИЯ СОЛОМЫ И ШЕЛУХИ, КАК ТВЕРДОГО БИОТОПЛИВА

Выполнена апробация новых для Украины методов подготовки и анализа проб соломы и шелухи подсолнуха, гармонизированных с международной системой стандартизации. Осуществлено сравнение с зарубежными аналогами, определено их характерные отличия.

Ключевые слова: энергетическое сжигание, газификация соломы, газификация шелухи, твердое биотопливо

Kuzmenko B.V.,
Ph.D. Professor,
Academy of Municipal Management;
Matviychuk A.S.,
Ph.D.
Verkhovna Rada of Ukraine, special
Control Commission
privatization, head. Secretariat

ENERGY COMBUSTION AND GASIFICATION OF STRAW AND HUSK HOW SOLID BIOFUELS

Approbation of new for Ukraine methods of preparation and analysis of tests of straw and husk of sunflower is executed, harmonized with the international system of standardization. Comparing is carried out to the foreign analogues, certainly them characteristic differences

Keywords: energy incineration, gasification of straw, husk gasification, solid biofuels

Вступ. Зміцнення енергетичної незалежності України, яка 86% потреб у нафті та 73-78% у газі забезпечує за рахунок імпорту, набуває стратегічного характеру. Впровадження відновлюваних джерел енергії може не лише сприяти скороченню імпорту первинних енергоносіїв, але й мінімізації негативного впливу енергетики на навколишнє середовище. Залучення енергетичного потенціалу біомаси, зокрема, відходів сільськогосподарського виробництва, для заміщення природного газу потребує розробки сучасних технологій спалювання та застосування енергетичного обладнання з урахуванням фізико-хімічних властивостей біопалив вітчизняного походження.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблема енергетичного використання біопалив та інших поновлюваних джерел енергії останніми роками вивчається і розглядається систематично, [1,2]. Обговорення, зокрема, відбувається у контексті охорони навколишнього середовища і прагнення гарантувати умови сталого регіонального і місцевого розвитку (Кліматичний протокол Кіото, механізми (Joint Implementation)). Найменш дослідженими є процеси сумісного спалюванні вугілля та біомаси, зокрема при комбінованому спалюванні бурого вугілля та соломи в реакторах з нерухомим шаром, спільному спалюванні антрацитового штибу та соломи. Виключне значення при цьому набувають дослідження складу і властивостей вітчизняного лушпиння соняшнику та соломи пшениці методами, гармонізованими з міжнародною системою стандартизації, виявлення раніше невідомих даних про природу мінеральної частини вітчизняних твердих біопалив, закономірностей впливу продуктів їх термічного розкладання на вихід летких речовин, визначення складу летких речовин, коксового залишку, його густини і геометричної характеристики, а також температур плавкості золи, що становить необхідний комплекс вихідних даних для розрахунку енергоустановок, які використовують солону і лушпиння соняшнику як тверде біопаливо. Експериментальні дослідження залежностей температур плавкості і шлакування золи від природи та складу мінеральної речовини вітчизняної соломи та лушпиння соняшнику в Україні практично не проводились. В цих умовах здійснення порівняння результатів технічного аналізу проб твердого біопалива (лушпиння соняшнику, соломи), елементного складу та калорійності сухої без зольної маси, складу та плавкості золи із зарубіжними аналогами, визначення їх характерних відмінностей набувають особливого значення.

Аналіз загальносвітових тенденцій щодо використання

відновлювальних джерел енергії, потенціал, обсяги та напрямки їх використання в Україні, місце серед них відходів біомаси дає змогу визначити річний енергетичний потенціал біомаси, він складає 26-31 млн т у.п. , в тому числі соломи зернових культур та лушпиння соняшнику – 6,5 -7 млн т у.п. Основні відмінності твердих біопалив від вугілля такі: знижена калорійність через підвищений вміст кисню, низькі зольність і вміст сірки, волокнистість і мала насипна щільність, підвищений вміст в золі лужних, лужноземельних металів, хлору, температури плавкості золи значно нижчі, ніж у вугілля.

Нами експериментально досліджено спалювання зразків твердого біопалива (лушпиння соняшнику, соломи), і з використанням методами технічного, елементного та калориметричного аналізу, визначено хімічний склад і температура плавкості золи та порівнянню результатів із зарубіжними аналогами. Для дослідження були відібрані зразки лушпиння соняшнику з Пологівського олійно-екстракційного заводу (Запорізька обл.) і соломи пшениці з Вишгородського та Васильківського районів Київської області. Серед проб пшениці представлені озимі та ярові сорти, удобрені різною кількістю добрив та різні за умовами зберігання. Загалом Київська область має середнє по Україні значення кількості добрив, що вносяться на 1 га посівної площі, що дозволяє вважати проби достатньо характерними для вітчизняного сільського господарства. Результати технічного аналізу зразків наведені в табл. 1, елементного складу сухої без зольної маси, калорійності та плавкості золи – в табл. 2, хімічного складу золи – в табл. 3. Результати добре збігаються з даними зарубіжних досліджень по волозі, зольності, виходу летких речовин, вмісту сірки і хлору. Вони близькі до них по елементному складу сухої без зольної маси і калорійності (у вітчизняних зразках більше вуглецю і менше кисню, відповідно – на 2-4% більша вища теплота згоряння сухої без зольної маси).

Таблиця 1

Максимально допустимі розбіжності між результатами аналізу

Найменування	Позначення	Повторюваність	Відтворюваність
Волога загальна ДСТУ-П CEN/TS 14774	W_t^r	не встановлено	не встановлено
Волога аналітична ДСТУ-П CEN/TS 14774	W^a	0,2% абс.	не встановлено
Вихід летких речовин ДСТУ-П CEN/TS 15148	V^a	2% відн.	4% відн.
Зольність ДСТУ-П CEN/TS 114775	A^a	0,2% абс. ($A^a \leq 10\%$) 2% відн. ($A^a > 10\%$)	0,3% абс. ($A^a \leq 10\%$) 3% відн. ($A^a > 10\%$)

Хлор загальний ДСТУ-П CEN/TS 15289	Cl_t^d	50 мг/кг ($Cl_t^d \leq 500$ мг/кг) 10% відн. ($Cl_t^d > 500$ мг/кг)	100 мг/кг ($Cl_t^d \leq 500$ мг/кг) 20% відн. ($Cl_t^d > 500$ мг/кг)
Сірка загальна ДСТУ-П CEN/TS 15289	S_t^d	50 мг/кг ($S_t^d \leq 500$ мг/кг) 10% відн. ($S_t^d > 500$ мг/кг)	50 мг/кг ($S_t^d \leq 500$ мг/кг) 10% відн. ($S_t^d > 500$ мг/кг)
Сірка загальна ДСТУ 3528-97	S_t^d	0,05% абс. ($S_t^d \leq 5\%$) 0,1% абс. ($S_t^d > 5\%$)	0,1% абс. ($S_t^a \leq 5\%$) 0,2% абс. ($S_t^a > 5\%$)
Вуглець ГОСТ 2408.1	C^a	0,25% абс.	0,5% абс.
Водень ГОСТ 2408.1	H^a	0,12%	0,3% абс.
Теплота згоряння ДСТУ-П CEN/TS 14918	Q	0,170 МДж/кг	0,300 МДж/кг
Елементний склад золи ДСТУ-П CEN/TS 15290	-	не встановлено	не встановлено
Температури плавкості золи CEN/TS 15370-1	t_A, t_B, t_C	не встановлено	не встановлено

Таблиця 2

Результати технічного аналізу зразків вітчизняних лушпиння соняшнику та соломи

№ проби	Найменування	Місце і час відбору	Примітка	$W_t^f, \%$	$A^d, \%$	$S_t^d, \%$	$V^{daf}, \%$
1	Лушпиння соняшнику	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.

Склад мінеральної частини зразків характеризується значними коливаннями вмісту діоксиду кремнію, оксидів лужних і лужноземельних

металів, сума оксидів $\Sigma_{\text{окс}}$ не досягає 100%. Температури плавлення t_c коливаються від 1110 до 1270°C; загалом, різниця між t_c и t_A (30-50°C) виявилася значно меншою, ніж у зарубіжних дослідженнях (310-410°C). Ці особливості можна пояснити з таких міркувань.

В мінеральній частині твердих біопалив лужні і лужноземельні метали містяться переважно у вигляді карбонатів та сульфатів. При визначенні зольності біопалив (550°C) більша їх частина не розкладається. Звідси випливає, що різниця між кількістю стандартно визначеної золи і сумою оксидів повинна бути близька до кількості продуктів розкладу карбонатів та сульфатів – CO_2 і SO_3 . При перерахуванні на масу карбонатів та сульфатів видно, що сума компонентів золи наблизилася до 100%. В енергоустановках спалювання відбувається при більш високих температурах, тому маса свіжого зольного залишку повинна наближатися до суми мас оксидів. Найбільш вірогідна причина відмінності вмісту діоксиду кремнію в золі лушпиння соняшнику (3%) і соломи (30-60%) полягає в тому, що золоутворюючим компонентом лушпиння соняшнику є мінеральна частина біомаси, в якій вміст діоксиду кремнію малий, а соломи – значною мірою залишки піску та глини з великим вмістом діоксиду кремнію. Відносно високі температури плавкості золи лушпиння соняшнику пов'язані з наявністю тугоплавких оксидів кальцію ($T_{\text{пл}} = 2570^\circ\text{C}$) і магнію ($T_{\text{пл}} = 2825^\circ\text{C}$) в кількості майже 30%, здатних створювати стійку до теплових деформацій структуру зольного залишку. Закономірності температур плавкості золи соломи пов'язані з наявністю діоксиду кремнію: порівняння даних табл. 2, 3 і рис. 1 показують монотонне зростання температури деформації t_A із збільшенням його вмісту.

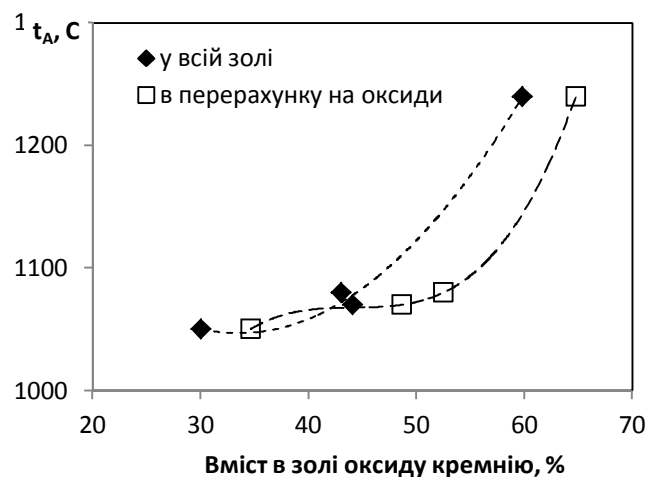


Рис. 1. Залежність температури деформації від вмісту оксиду кремнію в золі соломи пшениці.

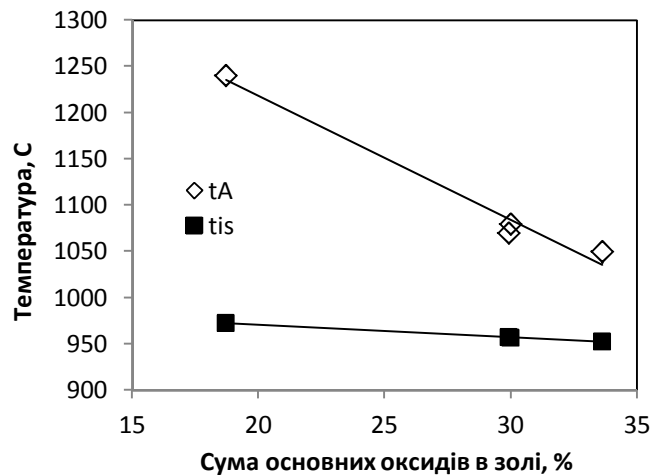


Рис. 2. Залежності температур початку деформації та шлакування від вмісту основних оксидів в золі соломи пшениці

Натомість, температури початку шлакування t_{is} , °C, які за методикою УралВТІ оцінюють за сумою кислотних $K = SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$ і основних оксидів $O = CaO + MgO + K_2O + Na_2O$ за формулою $t_{is} = 945 + 8,22 K/O$, знижуються із зростанням вмісту основних оксидів (рис. 2) і наближаються до рівня $t_A = 860-900^\circ C$, встановленого в зарубіжних дослідженнях. Оскільки температурний рівень шлакування є значно нижчим, ніж деформації золи, для золи вітчизняної соломи пшениці саме температури шлакування, а не плавкості золи, являють головний фактор ризику при спалюванні в котлоагрегатах.

Проаналізовані зразки можна розділити на 2 групи: №№ 1, 2 з $Q_s^{daf} = 4900-5060$ ккал/кг і №№ 3-5 з $Q_s^{daf} = 4650-7670$ ккал/кг. В межах кожної групи спостерігається зменшення величини Q_s^{daf} із збільшенням частки кисню в органічній речовині.

Це добре корелює з тим, що в соломі озимої пшениці основна складова - низькокалорійна целюлоза з високим вмістом кисню, в соломі ярової пшениці більше калорійнішого білку, а в лушпинні соняшнику - жирових залишків. В межах цієї групи існує тенденція зменшення виходу летких речовин та вищої теплоти згоряння як на суху, так і на суху без зольну масу біопалива із зростанням зольності (рис. 3, 4), яку можна пояснити впливом термічного розкладу мінеральної частини біопалива у стандартних умовах технічного та калориметричного аналізу.

Вплив зольності на величини Q_s^{daf} і V^{daf} зводиться до наступного. Зольність відображає вміст мінеральної речовини палива за вирахуванням продуктів його термічного розкладання - CO_2 карбонатів і гідратної вологи, кількість яких досягає 10% від кількості зольного залишку вугілля. При збільшенні зольності характеристики органічної речовини не змінюються, але вимірювана величина V^{daf} зростає за рахунок внеску продуктів термічного розкладання мінеральної речовини, а Q_s^{daf} зменшується через те, що теплоту згоряння органічної речовини відносять

до сухої беззольної маси, збільшеної в порівнянні з органічною масою за рахунок термічного розкладання частини мінеральної речовини.

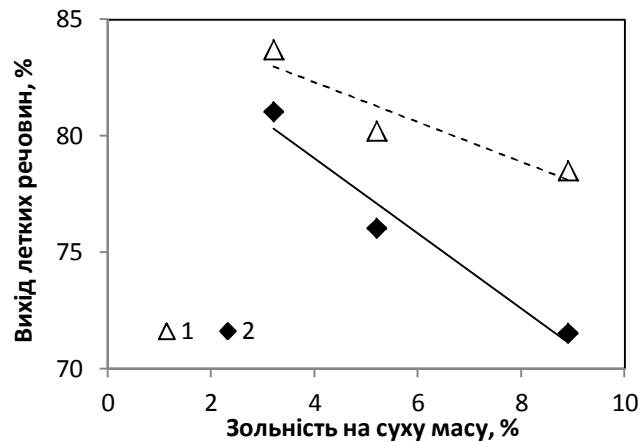


Рис. 3. Залежність виходу летких речовин від зольності: 1 - V^{daf} , 2 - V^d .

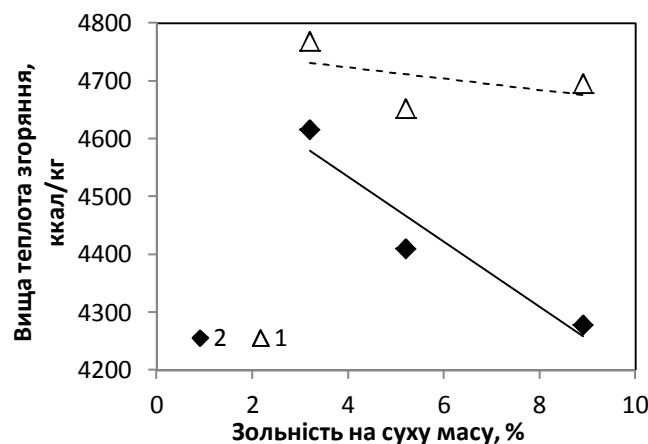


Рис. 4. Залежність вищої теплоти згоряння від зольності: 1 - Q_s^{daf} , 2 - Q_s^d .

Ступінь розкладання мінеральної речовини, розрахована з експериментальних даних методом, запропонованим Ю.Філіппенком та ін. для вугілля (2010), в середньому більша, ніж у вугіллі, вона знижується із зростанням зольності зразків (рис. 5), що пов'язано зі зниженням вмісту лужних та/або лужноземельних металів при збільшенні частки зовнішніх мінеральних домішок. Розкладання мінеральної речовини при низькотемпературному озоленні біопалив пов'язано головним чином з відщепленням гідратної води. В малозольних зразках присутня більша частка гідратів з температурою розкладання більше 550°C , аніж у високозольних. Цим же можна пояснити і удаване зниження (на відміну від вугілля, де спостерігається удаване зростання) величини V^{daf} із збільшенням зольності.

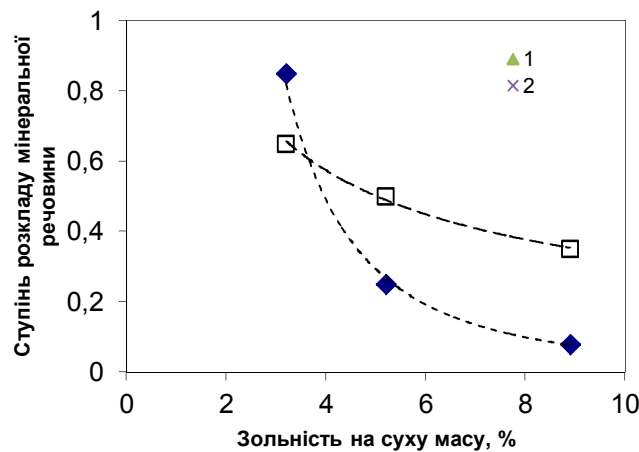


Рис. 5. Ступінь розкладу мінеральної речовини для зразків озимої соломи визначена з обробки калориметричних аналізів (1) та виходу летких речовин (2).

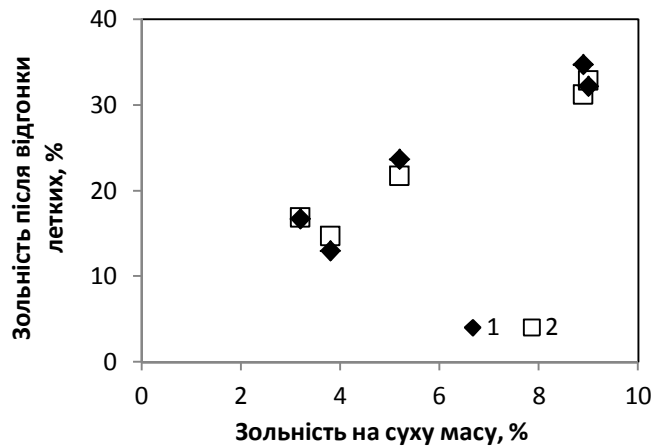


Рис. 6. Порівняння експериментальних (1) та розрахункових (2) значень зольності зразків озимої соломи після відгонки летких речовин.

Через високий ступінь термічного розкладу мінеральної речовини біопалив перерахунок їх характеристик на суху беззольную масу може призводити до суттєвих неточностей, тому більш доцільно дані аналізів приводити до сухої маси біопалива. На рис. 6 експериментальні значення зольності коксового залишку зразків після піролізу (табл. 5) порівняні з розрахованими з використанням співвідношення:

$$C_{\text{кз}}^{\text{d}} = 100 - V^{\text{d}} - A^{\text{d}}, A_{\text{кз}}^{\text{d}} = 100 \cdot A^{\text{d}} / (A^{\text{d}} + C_{\text{кз}}^{\text{d}}),$$

де нижній індекс «кз» відноситься до коксового залишку. З урахуванням розкиду експериментальних даних щодо виходу летких речовин і вихідної зольності зразків, розрахункові значення $A_{\text{кз}}^{\text{d}}$ виявилися близькі до експериментальних. Крім того, дані свідчать про практичну відсутність водню в коксовому залишку. Зведена таблиця вихідних даних для розрахунку енергоустановок на твердому біотопливі

Таблиця 5

Характеристика	Лушпиння соняшнику	Солома ярова	Солома озимая (усрдн.)	Характеристика	Лушпиння соняшнику	Солома ярова	Солома озимая (усредн.)
$W_t^r, \%$	9,5	14,8	10,3	Вихід на 100 кг сировини в зоні піролізу, кг			
$A^r, \%$	3,4	7,7	5,2	Зола	3,4	8,1	5,2
$V^r, \%$	66,8	65,4	68,6	Вугц. залишок	19,9	15,7	16,2
$Q_i^r, \text{ккал/кг}$	3850	3610	3590	H_2O зовнішня	9,5	14,8	10,3
$C_{\text{фикс}}^r, \%$	19,9	15,7	16,2	H_2O пироген.	16,9	7,2	8,8
$C_{\text{лег}}^r, \%$	24,1	25,3	26,2	CH_4	10,9	15,3	15,3
$H^r, \%$	4,6	4,6	4,8	CO	34,6	21,2	17,9
$O^r, \%$	37,8	31,4	36,8	CO_2	4,1	17,6	25,8
$N^r, \%$	0,4	0,4	0,4	азот	0,4	0,4	0,4
$S^r, \%$	0,2	0,1	0,1	сера	0,2	0,1	0,1
$t_{is}, ^\circ C$	≤ 946	≤ 973	≤ 955	Кокс. залиш%	14,6	32,9	24,3
$t_A, ^\circ C$	1140	1240	1065	Зола	3,4	8,1	5,2
$t_C, ^\circ C$	1180	1270	1110	Вуглецевий залишок	19,9	15,7	16,2
Характеристики частинок коксового залишку							
Еквівалентний діаметр (d_e), мм	2,2	2,2	розмір частинок коксового залишку: лушпиння $8 \times 4,5 \times 0,2$ мм, що відповідає об'єму частинки $6,38 \text{ мм}^3$, соломи $10 \times 4 \times 0,2$ мм що відповідає об'єму частинки $6,4 \text{ мм}^3$				
Фактор форми (К)	0,24	0,2-0,25					
Густина (ρ), кг/м^3	600	500-700					

Для визначення уявної густини коксовий залишок лушпиння соняшнику здрібнили до розміру 0-1 мм, в результаті чого щільність його насипного шару зросла від менше ніж 50 до 250 кг/м^3 . Таким чином, виявлені у розділі раніше невідомі дані про природу мінеральної речовини твердих біопалив, закономірності впливу продуктів її термічного розкладання на теплоту згоряння і на вихід летких речовин, визначені склад летких речовин, коксового залишку, його густина і геометричні характеристики, а також температури плавкості золи, що становить необхідний комплекс вихідних даних для розрахунку енергоустановок, які використовують соломку і лушпиння соняшнику як паливо.

Розроблені методи, виконані модельні розрахунки процесів спалювання різаної соломи та лушпиння соняшнику окремо та сумісно з вугіллям в топках з нерухомим шаром та в камерних топках. Для цього побудовано математичну модель параметрів робочого процесу в кисневій та відновній зонах нерухомого шару (НШ), а також математичну модель висхідного руху, тепломасообміну і горіння полідисперсного ансамблю коксозольних частинок біомаси та вугілля в надшаровому просторі (НП) та висхідному факелі. Оскільки при подачі палива до високо-температурної області топки процеси сушки та піролізу відбуваються доволі швидко, процеси спалювання в зоні пневмотранспорту (ЗП) – в НП топки зі щільним

видаються принципово подібними, і можуть бути описані узагальненою моделлю з гомогенним горінням летких речовин і гетерогенним горінням коксового залишку.

У протиточній схемі термохімічної переробки твердого палива воно подається зверху на решітку і пронизується знизу дуттьовим повітрям (рис. 7). Частинки піддаються сушінню, піролізу і спалахують за рахунок теплоти, переданої потоком гарячих газів та випромінюванням НШ і факела, розташованого в НП. При такій організації робочого процесу в топці 80-90% коксового залишку вихідного палива спалюється в НШ, а 10-20% коксового залишку і леткі речовини - в НП.

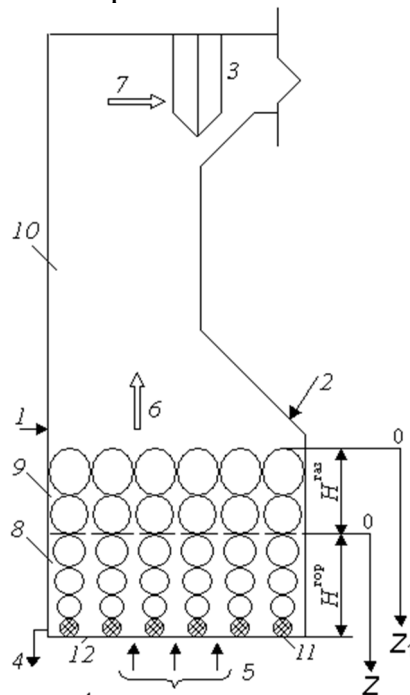


Рис. 7. Схема котлоагрегату з нерухомим шаром: 1 - подача вторинного повітря; 2 - подача вихідного палива; 3 – ширмовий пароперегрівач; 4 - вихід донної золи; 5 - подача первинного повітря; 6, 7 – газоподібні продукти; 8 - окислювальна зона; 9 - відновна зона; 10 - НШ; 11 - золова подушка; 12 – решітка.

НШ можна розділити на дві зони, в кожній з яких конверсія коксового залишку протікає по-різному. Перша (окислювальна) зона характеризується інтенсивним вигоранням окислювача за реакцією $C + O_2 = CO_2$. Висока адіабатність процесів у щільному шарі сприяє розвитку температур понад 2000 К, внаслідок чого горіння протікає в зовнішньодифузійній області реагування. У другій (відновній) зоні, де концентрація кисню незначна, відбувається процес газифікації коксу за реакцією $C + CO_2 = 2CO$ за рахунок теплової енергії димових газів, що залишають окислювальну зону. На виході з НШ CO -вміщуючий газ змішується з продуктами піролізу, і газова суміш разом з дрібними коксозольними частинками допалюється в НП.

На основі математичної моделі згоряння палива розроблена методика розрахунку НШ, базується на таких основних передумовах: 1) процес стаціонарний, 2) тверда фаза і газ рухаються назустріч один одному в режимі ідеального витиснення, 3) стехіометрична схема реакцій включає в себе дві гетерогенних реакції $C + O_2 = CO_2$ і $C + CO_2 = 2CO$, 4) вихід і вигорання газових компонентів летких речовин (CO , H_2 , C_nH_m і т. д.), а також випаровування вологи вихідного палива відбуваються над верхньою межею НШ; 5) газова суміш в шарі складається з кисню, азоту, двооксиду і оксиду вуглецю; 6) дисперсна фаза являє собою монодисперсні коксозольні частинки умовно сферичної форми; 7) зола зосереджена всередині частинки і не впливає на гетерогенне горіння, яке відбувається на поверхні коксових частинок, внаслідок чого їх розмір зменшується до розміру золотого залишку; 8) НШ складається з n горизонтальних шарів, кожен з яких веде себе незалежно від інших.

Система рівнянь включає рівняння нерозривності (в окислювальній зоні – для кисню і коксозольних частинок, у відновній – для CO_2 і коксозольних частинок), рівняння для обчислення аеродинамічних характеристик, включаючи сили тяжіння та аеродинамічного опору, а також рівняння теплового балансу дисперсної фази і несучого середовища. Враховано, що тепло, яке виділяється при горінні коксозольних частинок в першій зоні, витрачається на нагрів газу за рахунок конвективного теплообміну, а також на променистий і кондуктивний теплообмін між коксозольними частинками та настінними екранами топки. В зоні газифікації енергія газу передається коксозольним частинкам за рахунок конвективного теплообміну. Отримана теплова енергія витрачається на гетерогенну реакцію $C + CO_2 = 2CO$, а також на променистий і кондуктивний теплообмін частинок з настінними екранами.

На основі математичної моделі згоряння палива розроблена методика розрахунку ЗП з урахуванням променевого і конвективного теплообміну між газом і частинками, газодисперсним потоком і стінкою реактора, гетерогенних і гомогенних реакцій, сил міжфазної взаємодії, базується на таких основних передумовах: 1) процес стаціонарний, 2) стехіометрична схема реакцій включає в себе три гетерогенних реакції $C + O_2 = CO_2$, $2C + O_2 = 2CO$, $C + CO_2 = 2CO$ і дві гомогенних $2CO + O_2 = 2CO_2$ та $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$; 3) вихід летких речовин (CO , CH_4 , CO_2 та ін.), а також випаровування вологи вихідного палива відбуваються миттєво на вході в ЗП, 4) газова суміш в ЗП складається з кисню, азоту, двооксиду і оксиду вуглецю, метану, водяної пари і двооксиду сірки, 5) дисперсна фаза в ЗП включає в себе M_C фракцій коксових і M_{ash} фракцій золотих частинок умовно сферичної форми, 6) гетерогенне горіння протікає на поверхні коксових частинок, внаслідок чого їх розмір зменшується до розміру золотого залишку. Щодо вхідних умов, для випадку НШ вони розраховуються на підставі зведення матеріально-теплового балансу для

зони подачі вторинного палива і повітря, сушіння і виходу летких речовин за рахунок тепла від продуктів згоряння-газифікації, що виходять з НШ, яка розташована безпосередньо над верхньою межею НШ і має нехтовно малу висоту. Для випадку камерної топки те ж саме виконується для зони кореню факелу, за рахунок тепла від ежектованих продуктів згоряння.

Система рівнянь включає рівняння нерозривності для компонентів газу і частинок коксу, рівняння переносу імпульсу частинок по фракціях розміру, рівняння збереження кількості руху газової фази. Схема теплообміну в ЗП (рис. 8) включає в себе тепловиділення за рахунок гетерогенних і гомогенних реакцій, променистий і конвективний теплообмін між частинками і газом, променистий і конвективний теплообмін між частинками, газом і настінними екранами топки.

СХЕМА ТЕПЛОБМІНУ В НАДШАРОВОМУ ПРОСТОРІ

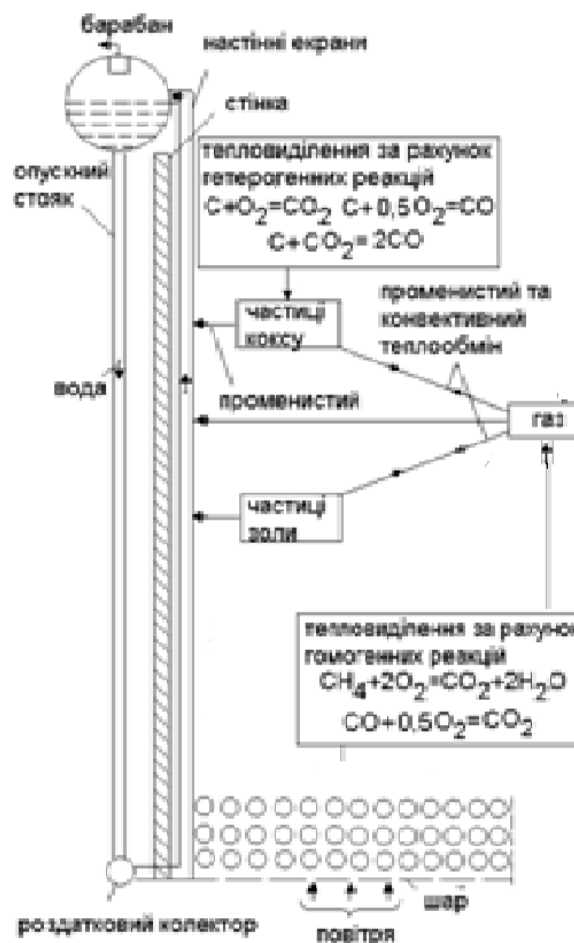


Рис. 8. Схема теплообміну в надшаровому просторі.

Система рівнянь, що описує аеродинаміку, тепло масообмін і хімічне реагування газодисперсного потоку в зоні пневмотранспорту, може бути представлена наступним чином:

рівняння нерозривності :

$$\frac{d(u_g C_{\text{CH}_4})}{dz} = -k_{\text{CH}_4+\text{O}_2} C_{\text{O}_2} C_{\text{CH}_4} \quad (1);$$

$$\frac{d(u_g C_{\text{H}_2\text{O}})}{dz} = 2k_{\text{CH}_4+\text{O}_2} C_{\text{O}_2} C_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

$$\frac{d(u_g C_{CO})}{dz} = 6 \sum_{j=1}^{M_C} \alpha_{D,\theta,j} (C_{CO,j}^w - C_{CO}) \frac{\beta_j K_j}{\delta_{C,j}} - 2k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} \quad (3)$$

$$\frac{d(u_g C_{O_2})}{dz} = -6 \sum_{j=1}^{M_C} \alpha_{D,\gamma,j} (C_{O_2} - C_{O_2j}^w) \frac{\beta_j K_j}{\delta_{C,j}} - k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} - 2k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} \quad (4)$$

$$\frac{d(u_g C_{CO_2})}{dz} = 6 \sum_{j=1}^{M_C} \alpha_{D,\chi,j} (C_{CO_2j}^w - C_{CO_2}) \frac{\beta_j K_j}{\delta_{C,j}} + 2k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} + k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} \quad (5)$$

$$\frac{d(\beta_j u_{p,j})}{dz} = -[\alpha_{D,\theta,j} (C_{CO,j}^w - C_{CO}) + \alpha_{D,\chi,j} (C_{CO_2j}^w - C_{CO_2})] \frac{6\mu_c \beta_j K_j}{\delta_{C,j} \rho_{C,j}} \quad (6)$$

рівняння енергії газу, частинок, коксу та золи

$$\frac{d(\rho_g u_g c_g t_g)}{dz} = 6 \sum_{i=1}^{M_C+M_{ash}} \alpha_{conv,i} (t_{p,i} - t_g) \frac{\beta_i K_i}{\delta_{C,i}} - Q_{g \rightarrow \text{экп}} + \sum_{i=1}^{M_C+M_{ash}} Q_{i \rightarrow g} + k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} Q_{CO+O_2} + k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} Q_{CH_4+O_2} \quad (7)$$

$$\frac{d(\beta_j u_{p,j} c_{p,j} t_{p,j})}{dz} = [(k_{C+O_2j} Q_{C+O_2j} + k_{C+0,5O_2j} Q_{C+0,5O_2j}) C_{O_2j}^w - k_{C+CO_2j} C_{CO_2j}^w Q_{C+CO_2j} - \alpha_{conv,j} (t_{p,j} - t_g)] \frac{6\beta_j K_j}{(\delta_{C,j} \rho_{C,j})} - Q_{j \rightarrow \text{экп}} / \rho_{C,j} - Q_{j \rightarrow g} / \rho_{C,j} \quad (8)$$

$$\frac{d(\beta_s u_{p,s} c_{p,s} t_{p,s})}{dz} = -\alpha_{conv,s} (t_{p,s} - t_g) \frac{6\beta_s K_s}{\delta_s \rho_{ash,s}} - \frac{Q_{s \rightarrow \text{экп}}}{\rho_{ash,s}} - \frac{Q_{s \rightarrow g}}{\rho_{ash,s}} \quad (9)$$

рівняння руху газу та частинок

$$\frac{d(\rho_g u_g^2)}{dz} = -\frac{dP}{dz} - g\rho_g - \sum_{i=1}^{M_C+M_{ash}} F_{a,i} \quad (10) \quad \frac{d(\beta_i u_{p,i}^2)}{dz} = \frac{F_{a,i}}{\rho_{p,i}} - g\beta_i \quad (11)$$

На підставі цих систем рівнянь розроблено програми для розрахунку аеродинаміки, тепломасообмінних процесів та хімічного реагування твердого палива (біомаси окремо або сумісно з вугіллям) в окислювальній та відновній зонах НШ і в ЗП.

Сукупність розроблених методів розрахунку процесів в НШ та НП може бути застосована до низки технологічних схем спалювання біопалив окремо та сумісно з вугіллям спалювання-газифікації лушпиння соняшнику в щільному шарі з допалюванням дисперсного виносу та продуктів газифікації в НП;

- комбіноване спалювання бурого вугілля в щільному шарі і соломи в надшаровому просторі;
- сумісне спалювання пиловидного вугілля і соломи в камерній топці.

Низька, навіть порівняно з лушпинням соняшнику, густина і висока парусність подрібненої соломи заважають її спалюванню в НШ. Тому для організації комбінованого процесу в шар доцільно подавати подрібнене вугілля, а в надшаровий простір – подрібнену солому. В роботі розглянуто варіант IV комбінованого спалювання соломи з бурим вугіллям (рис. 9, б), враховуючи можливість зменшення викидів оксидів сірки з нього за рахунок додавання соломи. В якості вихідних умов прийнято $\rho_p = 510$

кг/м³, $B_{\text{air}} = 8000$ кг/ч, $E_{\text{C+CO}_2} = 215 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, $\delta = 11$ мм, $t_{\text{p0}} = 30^\circ\text{C}$, $C_{\text{CO}} = 0,65$, $C_{\text{ash0}} = 0,35$, $\varphi = 15\%$, температура на виході з НШ $\geq 1000^\circ\text{C}$. При порівнянні результатів розрахунку зі спалюванням лушпиння (табл. 7, варіант І) виявлено, що однакове задане значення $\varphi = 15\%$ обумовлює подібність витратних показників на виході з НШ і однакову витрату прореагувавшего вуглецю. Більший розмір частинок вугілля обумовлює можливість збільшення швидкості газу в НШ і зменшення площі перетину топки майже в 10 разів. При цьому, за рахунок суттєвого збільшення коефіцієнту масообміну, висота окислювальної та відновної зон збільшується всього в 4 рази, а температура частинок на виході з відновної зони зменшується від 1110 до 600°C . За обраною схемою технологічної реалізації процесу на виході з НШ досягається значно більший рівень температур ($900\text{-}950^\circ\text{C}$), ніж при спалюванні бурого вугілля в КШ ($600\text{-}700^\circ\text{C}$) і в ЦКШ ($750\text{-}800^\circ\text{C}$). Це, з одного боку, полегшує організацію теплосприйняття настінними екранами, з іншого – забезпечує умови вигорання коксових частинок та оксиду вуглецю, тобто, зменшення механічного і хімічного недопалу. При цьому вказаний температурний рівень не досягає температур шлакування. Таким чином, результати числових досліджень довели доцільність розробки котлоагрегатів за обраною схемою на бурому вугіллі та твердих біопаливах.

У відомих процесах сумісного факельного спалювання пиловидного вугілля і твердих біопалив частка біомаси зазвичай не перевищує 10-15%. Порівняні витрати пиловидного вугілля та біомаси суттєво змінюють процеси тепло- та масообміну в топці порівняно з пиловидним спалюванням вугілля. Для організації зазначеного процесу необхідно обрати співвідношення витрат біомаси та вугілля, що забезпечує безшлаковочну роботу котла, після чого підібрати оптимальний діаметр частинок вугілля, при якому механічний недопал бінарної суміші був би мінімальним. Вихідні дані для розрахунку чотирьох варіантів сумісного спалювання подрібненої соломи

Числові дослідження робочого процесу в камерних топках показують, що при спалюванні соломи і вугілля частинки БВ розміром 0,3 мм і АШ розміром 0,075 мм в основному згоряють в діапазоні $0 < z < 4,5$ м, а частинки АШ розміром 0,14 мм - на ділянці $0 < z < 12$ м. Швидкість вигорання вуглецевих частинок соломи значно нижча, ніж у АШ, особливо це стосується дрібних фракцій. Коксові частинки соломи і БВ вигоряють переважно в дифузійній області реагування, коксові частинки АШ $\delta_{\text{C, АШ0}} = 0,075$ мм - в кінетичній області, $\delta_{\text{C, АШ0}} = 0,14$ мм - у перехідній.

Існують кілька способів зниження температури на виході з топки. Перший з них полягає в зменшенні частки соломи у бінарній суміші. Другий - у зниженні температури запалювання за рахунок зменшення кратності циркуляції гарячих газів, що ежектуються до кореня факелу, при одночасному збільшенні висоти топки. Другий спосіб реалізовано у

варіанті 4. Розрахунок свідчить, що на відміну від спалювання АШ в топках з рідким шлаковидаленням, де температура підпалюючих газів перевищує 1400°C, при сумісному спалюванні АШ і соломи вона може бути зменшена до 1000°C, тобто, з'являється можливість організації процесу спалювання з твердим шлаковидаленням. Крім зменшення ризику шлакування ширмових поверхонь нагріву, така технологія дозволить істотно скоротити викиди оксидів азоту і сірки в атмосферу. Це доводить доцільність розробки котлоагрегатів з камерною топкою на бурому вугіллі, АШ та твердих біопаливах. Наприкінці розділу використання результатів досліджень і розробок автора.

Стимулювання сумісного спалювання біомаси та вугілля. В роботі [1] пропонується запровадження “зеленого” тарифу на частку електроенергії та встановлення “зеленого” тарифу на частку тепла, що виробляється з біопалива (обґрунтування використано Комітетом Верховної Ради України з питань паливно-енергетичного комплексу, ядерної політики та ядерної безпеки при роботі над внесенням змін до Закону України «Про електроенергетику»). Для практичного врахування частки біопалива при сумісному спалюванні з вугіллям пропонується використання коефіцієнту β , запровадженого раніше Д.М.Хзмалянцем для характеристики властивостей палива, як співвідношення витрати кисню повітря на окиснення вільного водню палива до витрати кисню, що витратився на утворення CO_2 і SO_2 при повному згорянні палива:

$$\beta = 2,35 * \frac{H^P - 0,126 O^P}{C^P + 0,375 S_{op+k}^P}$$

Порівнюючи значення, одержані по елементному складу кожного виду палива в суміші, з тими, що вираховані по газовому аналізу, визначають пропорційне співвідношення палив в суміші.

Висновок. на основі результатів комплексного дослідження фізико-хімічних властивостей різних видів вітчизняної соломи та лушпиння соняшнику видано вихідні дані, розроблено методи розрахунку та виконано числові дослідження процесів термічної переробки твердих біопалив, включаючи їх сумісне спалювання з вугіллям в котлоагрегатах з нерухомим шаром і в камерних топках, з визначенням оптимальних габаритних та режимних характеристик енергоустановок, що забезпечує вирішення важливої та актуальної для теплової енергетики України науково-прикладної задачі – створення нових високоефективних, екологічно чистих технологій термічної переробки соломи та лушпиння соняшнику в енергоустановках, в кінцевому рахунку – зменшення споживання природного газу.

Використані джерела інформації:

1. Матвійчук О.С. Фізико-хімічні властивості соломи і лушпиння соняшнику як твердого біопалива та процеси їх спалювання. Автореф. дис. канд. техн. Наук. – К.: ІВЕ НАНУ, 2014 р. – 23 с.
2. Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив: Монографія/Я.Б. Блюм, І.П. Григорюк, К.В. Дмитрук, та ін.. – «Аграр Медіа Груп, 2014. – 360 с.

References:

1. Matvijchuk O.S. Fiziko-himichni vlastivosti solomi i lushpinnja sonjashniku jak tverdogo biopaliva ta procesi ih spaljuvannja. Avtoref. dis. kand. tehn. Nauk. – K.: IVE NANU, 2014 r. – 23 s.
2. Sistema vikoristannja bioresursiv u novitnih biotehnologijah otrimannja al'ternativnih paliv: Monografija/Ja.B. Bljum, I.P. Grigorjuk, K.V. Dmitruk, ta in.. – «Agrar Media Grup, 2014. – 360 s.

Рецензент: Кисельов В.Б.