

## Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 662.747

**Снігур О.В., Праженнік Ю.Г., Марчук Ю.В.,** канд. техн. наук,  
**Бондаренко Б.І.,** акад. НАН України, докт. техн. наук, проф.  
**Інститут газу НАН України, Київ**  
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: umarch@i.com.ua

### Термодинамічний аналіз методів забезпечення автотермічності процесів повітряної газифікації комбінованих палив

Для аналізу обрано модель горючої маси комбінованого палива, утвореної з двох компонентів: а) біопалива, склад горючої маси якого усереднений за результатами аналізу численних публікацій щодо твердих побутових відходів (MSW, RDF, SRF) українського походження та різних регіонів світу, з величиною  $Q_{H\Gamma} = (22,21 \pm 3,7)$  МДж/кг; б) збагаченого вугілля шахти Білоріченська (Україна) з  $Q_{H\Gamma} = 35,02$  МДж/кг. Ефект когазифікації простежувався через розрахунки масиву показників стану адіабатичної рівноваги для складів палива від  $\Pi = 0$  (вугілля) до  $\Pi = 1,0$  (біомаса) та коефіцієнта витрати повітря  $\alpha(\min)$  в околі стехіометричних значень за реакцією неповного окислення. Для досягнення необхідного температурного рівня адіабатичного процесу (1473 К) розраховано та порівняно три варіанти технологічних заходів: підвищення коефіцієнта витрати повітря, що негативно впливає на калорійність газу; підвищення температури повітря, у тому числі за рахунок утилізації теплоти вихідного газу; додаток кисню до повітря, що знижує концентрацію азоту, а також комбінація двох заходів. Встановлено оптимальні значення параметрів когазифікації. *Бібл. 14, рис. 3, табл. 8.*

**Ключові слова:** когазифікація, комбіноване паливо, горюча маса, теплотворна здатність, біопаливо, вугілля.

Підвищена увага дослідників до проблем газифікації низькокалорійних видів твердого палива пояснюється загальною ситуацією на світовому ринку енергоносіїв. Висока вартість та дефіцит викопних палив, у першу чергу, природного газу, шкідливі для екології викиди змушують шукати альтернативні види сировини для енергетики, хімічної промисловості, виробництва водню та ін. До таких видів сировини належать тверді побутові відходи (ТПВ), відходи сільського господарства, деревооброб-

ної промисловості, деякі промислові відходи, в окремих випадках низьковартісні викопні палива, наприклад, торф.

Газифікація альтернативних палив має як істотні переваги, так і недоліки. Переваги, наприклад, за інформацією [1], такі. Українська компанія ТОВ «КлієнтГаз» розробляє та постачає модельний ряд генераторів ППД для газифікації відходів біопалив потужністю 230–6550 кВт; паливо: скіпа, лігніт, пелети з деревини, торфу, лузги соняшника, рису, відходи

гуми, курячий послід, антрацит, брикети пісного вугілля.

У залежності від палива нижча теплота згоряння генераторного газу може становити від 4,2 до 6,7 МДж/м<sup>3</sup>. Склад генераторного газу, % (об.): CO – 12–30; H<sub>2</sub> – 10–25; CH<sub>4</sub> – 0,5–5. Склад балласта, % (об.): N<sub>2</sub> – 35–55; CO<sub>2</sub> – 8–15; H<sub>2</sub>O – 2–20. Газифікація цих палив має такі позитивні якості: усі органічні з'єднання розщеплюються та газифікуються всередині апарату; газ не містить смолистих речовин. Внаслідок низької швидкості фільтрації немає виносу твердих часток з шару, оскільки апарат працює як зернистий фільтр. Генераторний газ можна використовувати без попереднього очищення. Одержаний зольний залишок у більшості випадків у залежності від виду твердого палива має більшу вартість, ніж вихідне паливо, та може бути класифікований у кожному конкретному випадку як напівкокс, активоване вугілля, бездимне паливо, коагулянт та ін. Ця технологія безвідходна та може бути застосована для утилізації підготованих відходів, які містять вуглець.

До недоліків біопалив з відходів можна віднести складну підготовку: роздільне збирання, сортування, подрібнення, виготовлення пелет або брикетів, у багатьох випадках доведення до стану стандартизованих палив RDF та SRF, а також зміну складу та теплотворної здатності генераторного газу при зміні палива.

Останнім часом спостерігається істотна дослідницька цікавість до когазифікації вугілля та різних сумішей біомаси для удосконалення процесу зменшення вмісту смол у газовому продукті; крім того, присутня у біомасі зола є каталізатором газифікації вугілля [2].

Проведені такі експериментальні дослідження: спільної газифікації відходів біомаси та коксохімічних сумішей у газифікаторі типу «entrained flow» [3]; виробництва синтез-газу спільною газифікацією вугілля та біомаси у псевдозрідженому шарі [4]; впливу біомаси на ефективність використання енергії та елементів при спільній газифікації з вугіллям [5]. У дослідженні [6] оцінювався потенціал спільної газифікації сумішей біомаси з вугіллям за джерелами, відомими у Бразилії, для цілей когенерації та хімічного синтезу. Використана модель термодинамічної рівноваги, яка потребує зменшеного обсягу інформації. Модель виявилася задовільною при співставленні з досяжними у літературі експериментальними даними при температурах (1000 < t < 1150) °C. Склади продуктів показали лінійну залежність від вмісту біомаси.

Когазифікація вугілля та біомаси має певну синергію [7]. Спільна газифікація вугілля та біомаси дає можливість поєднувати позитивні характеристики обох палив та призводить до більш чистого використання вугілля [6]. Цей процес не тільки забезпечує низький вуглецевий слід у навколишньому середовищі, але також покращує співвідношення H<sub>2</sub>/CO у газовому продукті, що потрібно, наприклад, для синтезу рідкого палива.

У дослідженні [8] розглянуті причини та технічні проблеми, пов'язані зі спільним спалюванням біомаси та вугілля у котлах для спалювання вугілля. Детальний розгляд показав, що спільне спалювання біомаси та вугілля є короткостроковим, низькоризиковим, недорогим та стійким варіантом поновлюваних джерел енергії, який обіцяє ефективне скорочення викидів CO<sub>2</sub>, CO<sub>x</sub>, часто NO<sub>x</sub>, а також інші соціальні переваги.

Позитивні ефекти когазифікації можуть бути різними у залежності від співвідношення біомаси та вугілля у складі комбінованого палива [9]:

– *при малій долі біомаси* у вихідному паливі вона практично не впливає на технологічний цикл при спалюванні у шаровому та у киплячому шарі. Виключається необхідність у спеціальних заводах для спалювання та газифікації сміття. Комбіновані палива з малою змінною долею біомаси доцільно використовувати у потужних установках безперервної дії;

– *при великій долі біомаси* подача вугілля як насипного матеріалу дає можливість вирішити одразу дві проблеми: створення киплячого шару та підтримання необхідної температури за рахунок поступового згоряння вугілля. Такі паливні суміші доцільно застосовувати у малих енергетичних установках періодичної дії, орієнтованих на певний вид відходів, які встановлюються безпосередньо на підприємствах, де ці відходи утворюються. У таких випадках виключається необхідність у сортуванні відходів. (Останнє твердження, на нашу думку, не завжди прийнятне.)

Найбільш екологічно безпечним паливом (після природного газу) є деревина [10], яка вважається CO<sub>2</sub>-нейтральним паливом: якщо замість утилізації вона з перебігом часу згниє, то при цьому утвориться така ж кількість CO<sub>2</sub>, як і при спалюванні. З екологічних міркувань у розвинутих країнах практикують спільне спалювання та газифікацію біомаси та вугілля в установках 10–80 МВт-год. Відносно невеликий додаток біомаси до основного вугільного палива (до 15 % (мас.)) дає можливість

**Таблиця 1. Кількість додаткового палива у залежності від теплоти згоряння відходів**

Теплота згоряння відходів (ТПВ) $Q_{н^p}$ , МДж/кг	Витрата природного газу $X_r$ , м <sup>3</sup> /кг	Витрата дизельного палива $X_m$ , кг/кг
4,00	0,0054	0,0056
3,80	0,0107	0,0111
3,60	0,0161	0,0161
3,40	0,0214	0,0220

витримати жорсткі екологічні вимоги без істотної модернізації котлів. У сфері житлово-комунального господарства заміна мазуту та вугілля для опалювання на деревину дає можливість знизити викид оксидів азоту на 21–58 %, сажі на 34–80 %, бенз(а)пірену на 98,6–99 %, повністю видалити оксиди ванадію та практично повністю оксиди сірки.

При спалюванні низькокалорійного палива для підвищення величини  $Q_{н^p}$  може бути застосоване, крім твердого, газове або рідке паливо. За методикою, розробленою інститутом ВНИИГАЗ (Москва) [11], при спалюванні ТПВ з  $Q_{н^p} < 4,0$  МДж/кг для стабілізації процесу горіння використовують додаткове паливо: природний газ або дизельне паливо. Елементарний склад всієї маси відходів розраховують у припущенні адитивності його компонентів. Величину  $Q_{н^p}$  окремих компонентів ТПВ розраховують за формулою Менделєєва. У табл.1 наведені дані щодо типу та кількості додаткового палива у залежності від теплоти згоряння відходів. Теплотворність дизельного палива  $Q_{н^p} = 39,8$  МДж/кг, природного газу  $Q_{р^h} = 37,3$  кДж/м<sup>3</sup>.

Термодинамічний аналіз процесів газифікації низькокалорійних палив із застосуванням

газового та рідкого палив як додаткових для підвищення величини теплотворної здатності потребує окремого дослідження.

### Вихідні дані компонентів

Для проведення розрахунків вибраний модельний склад горючої маси біопалива як усереднений за результатами аналізу численних публікацій щодо ТПВ (MSW, RDF, SRF) українського походження та різних регіонів світу [12]: С = 55,6, Н = 7,2, О = 37,2 % (мас.);  $Q_{н^g} = (22,21 \pm 3,7)$  МДж/кг.

Як додаткове паливо прийняте збагачене вугілля шахти Білоріченська (Україна) з такими показниками:  $C^d = 69,28$ ;  $H^d = 4,63$ ;  $N^d = 1,52$ ;  $S_t^d = 3,96$ ;  $O_d^d = 5,21$ ;  $A^d = 15,40$ ;  $Q_{г^r} = 24,30$  МДж/кг (за інформацією ГИПРОКОКС, м. Харків). Після перерахунку на модельну горючу масу (С–Н–О) отримуємо С = 87,50; Н = 5,90; О = 6,60;  $Q_{н^g} = 35,02$  МДж/кг, за формулою Менделєєва, що співпадає з ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76) [13].

### Комбіноване паливо

Розрахунки були проведені за допомогою програми ТЕРРА [14]. Ефект когазифікації про стежувався через розрахунки масиву показників стану адіабатичної рівноваги, як наведено нижче: від малої до великої долі біомаси. Вихідні дані та проміжні результати розрахунку показників стану адіабатичної рівноваги продуктів газифікації горючої маси комбінованих палив надані у табл.2. Склад горючої маси комбінованих палив розрахований у припущенні адитивності масових відсотків компонентів.

**Таблиця 2. Вихідні дані та проміжні результати розрахунку показників стану адіабатичної рівноваги продуктів газифікації горючої маси комбінованих палив**

П, кг/кг	С <sub>r</sub> , % (мас.)	Н <sub>r</sub> , % (мас.)	О <sub>r</sub> , % (мас.)	$Q_{н^g}$ , МДж/кг	$\alpha$ (min)	$k_0$	$I_{п.с.}$	$\Delta H_f$	I
0	87,50	5,90	6,60	35,020	0,402	11,64	-2830	-764	-134
0,1	84,31	6,03	9,66	33,739	0,391	11,20	-2860	-1142	-212
0,2	81,12	6,16	12,72	32,458	0,378	10,75	-2890	-1493	-295
0,3	77,93	6,29	15,78	31,177	0,364	10,30	-2930	-1930	-617
0,4	74,74	6,42	18,84	29,896	0,349	9,77	-2960	-1991	-449
0,5	71,55	6,55	21,90	28,615	0,333	9,40	-3010	-2696	-653
0,6	68,36	6,68	24,96	27,334	0,314	8,95	-3060	-3124	-820
0,7	65,17	6,81	28,02	26,053	0,294	8,51	-3110	-3509	-1002
0,8	61,98	6,94	31,08	24,772	0,272	8,06	-3160	-3848	-1206
0,9	58,79	7,07	34,14	23,491	0,247	7,61	-3220	-4229	-1469
1,0	55,60	7,20	37,20	22,210	0,219	7,16	-3290	-4636	-1805

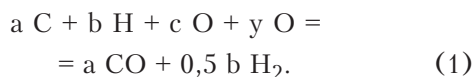
Примітка. П – кількість біомаси у суміші, П = 0 – при газифікації вугілля, П = 1,0 – при газифікації біомаси.

**Таблиця 3. Показники стану адіабатичної рівноваги продуктів повітряної газифікації комбінованих палив**

П	Т, К	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	C(c)	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO + H <sub>2</sub>	Q <sub>н.г.</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
0,0	1311	0,127	0	0,556	0	0,315	0	0	0,442	5341
0,1	1269	0,135	0,001	0,545	0	0,318	0,001	0	0,453	5465
0,2	1227	0,145	0,001	0,531	0,002	0,320	0,001	0	0,465	5598
0,3	1181	0,155	0,002	0,516	0,004	0,320	0,003	0	0,475	5706
0,4	1140	0,165	0,003	0,500	0,007	0,319	0,005	0,001	0,484	5837
0,5	1093	0,175	0,005	0,483	0,014	0,311	0,010	0,001	0,486	5845
0,6	1058	0,186	0,009	0,462	0,025	0,299	0,017	0,002	0,485	5848
0,7	1031	0,197	0,014	0,439	0,037	0,283	0,026	0,003	0,480	5802
0,8	1010	0,210	0,020	0,414	0,051	0,263	0,035	0,004	0,473	5726
0,9	987	0,222	0,028	0,384	0,070	0,243	0,047	0,006	0,465	5676
1,0	965	0,234	0,040	0,349	0,093	0,215	0,061	0,009	0,449	5560

Примітка. П – кількість біомаси у суміші, П = 0 – при газифікації вугілля, П = 1,0 – при газифікації біомаси.

Розрахунки проведені для стехіометричних значень коефіцієнта витрати повітря  $\alpha(\min)$  за реакцією неповного окислення:



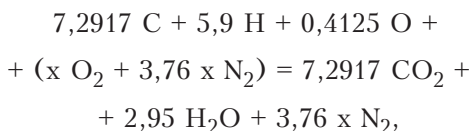
Наприклад, для П = 0 розрахунок значення  $\alpha(\min)$  виглядає таким чином.

Кількість моль на 100 г горючої маси:

$$C = 87,5 : 12 = 7,2917; H = 5,9 : 1 = 5,9;$$

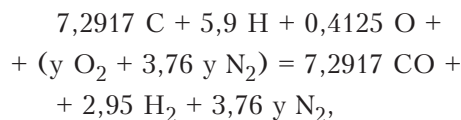
$$O = 6,6 : 16 = 0,4125.$$

Реакція повного окислення:



де  $x = 7,2917 \times 2 + 2,95 - 0,4125 = 17,1209$ .

Реакція неповного окислення:



де  $y = 7,2917 - 0,4125 = 6,8792$ .

Коефіцієнт  $\alpha(\min) = 6,8792 : 17,1209 = 0,402$ .

### Результати розрахунків для $\alpha(\min)$

Проміжні результати розрахунків, наведені у табл.2, дають додаткове уявлення про залежність показників системи від кількості біомаси у суміші. З табл.2 видно, що залежність цих показників від величини П відповідає теоретичним уявленням: зменшення  $k_0$  обумовлено істотним зростанням кисню у складі палива, який при газифікації бере участь у «самоокисленні» вуглецю та водню; зростання  $I_{п.с}$  залежить тільки від величини відношення CO<sub>2</sub> :

H<sub>2</sub>O; величини  $\Delta H_f$  та I істотно знижуються при переході від більш калорійного вугілля до менш калорійного біопалива.

Результати розрахунків показників стану адіабатичної рівноваги продуктів повітряної газифікації комбінованих палив з долею біомаси П = (0–1,0), одержаних при  $\alpha = \alpha(\min)$ , наведені у табл.3.

Зміна основних показників газоподібного продукту наочно демонструється графіками на рис.1, які мають подібний характер, зростаючи при низьких значеннях П та досягаючи максимуму при П = (0,4–0,6), після чого знижуються до П = 1,0. Вказаний

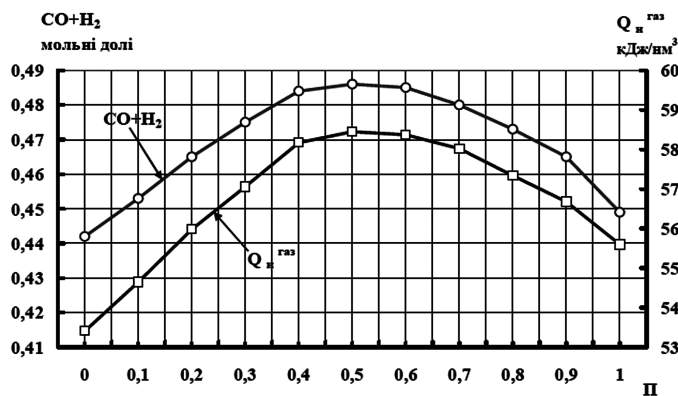


Рис.1. Графіки функцій  $Q_{н.г.газ} = f_1(\Pi)$  та  $(CO + H_2) = f_2(\Pi)$  у стані адіабатичної рівноваги.

**Таблиця 4. Вплив величини  $\alpha > \alpha(\min)$  на показники стану адіабатичної рівноваги продуктів повітряної газифікації комбінованих палив**

$\alpha$	T, К	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	C(c)	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO + H <sub>2</sub>	Q <sub>пг</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
4а. $\Pi = 0$										
0,40	1309	0,127	0	0,555	0,002	0,315	0	0	0,442	5351
0,42	1379	0,118	0,006	0,567	0	0,302	0,007	0	0,420	5089
0,44	1454	0,108	0,014	0,578	0	0,287	0,014	0	0,395	4790
0,46	1522	0,098	0,020	0,589	0	0,273	0,020	0	0,371	4509
4б. $\Pi = 0,5$										
0,34	1096	0,174	0,005	0,488	0,007	0,315	0,009	0,001	0,489	5892
0,36	1151	0,168	0,008	0,501	0	0,310	0,013	0	0,478	5727
0,38	1236	0,156	0,015	0,515	0	0,295	0,019	0	0,451	5410
0,40	1315	0,144	0,023	0,527	0	0,281	0,025	0	0,425	5104
0,42	1387	0,132	0,030	0,540	0	0,268	0,029	0	0,400	4808
0,44	1455	0,120	0,038	0,551	0	0,257	0,034	0	0,377	4540
0,46	1518	0,109	0,045	0,562	0	0,245	0,038	0	0,354	4272
4в. $\Pi = 1,0$										
0,22	965	0,234	0,040	0,350	0,092	0,215	0,061	0,009	0,458	5564
0,24	973	0,231	0,036	0,369	0,068	0,231	0,057	0,007	0,469	5665
0,26	981	0,228	0,032	0,388	0,046	0,246	0,054	0,006	0,480	5781
0,28	989	0,224	0,029	0,405	0,026	0,261	0,050	0,006	0,491	5933
0,30	996	0,221	0,026	0,421	0,006	0,274	0,047	0,005	0,495	6087
0,32	1035	0,216	0,029	0,434	0	0,274	0,046	0,001	0,490	5790
0,34	1110	0,202	0,038	0,448	0	0,264	0,047	0	0,466	5513
0,36	1187	0,186	0,048	0,462	0	0,255	0,049	0	0,441	5232
0,38	1260	0,171	0,057	0,475	0	0,245	0,051	0	0,416	4937
0,40	1328	0,157	0,066	0,488	0	0,236	0,054	0	0,393	4676
0,42	1391	0,144	0,074	0,500	0	0,227	0,055	0	0,371	4419
0,44	1451	0,131	0,081	0,512	0	0,219	0,057	0	0,350	4196
0,46	1508	0,120	0,088	0,523	0	0,210	0,059	0	0,330	3946

ефект пояснюється протилежним впливом двох факторів: зменшенням вмісту азоту, що надходить з повітрям, та істотним зниженням

адіабатичної температури, що спричиняє також утворення вільного вуг- лецю та слідів метану.

Максимальна кількість горючих компонентів утворюється за умови співвідношення вихідних компонентів, близького до стехіометричного, за реакцією (1), де  $\alpha = \alpha(\min)$ , як показано вище на прикладі для  $\Pi = 0$ . Проте повітряна газифікація не дає змоги досягти необхідного температурного рівня навіть за умови адіабатичного процесу, тим більше у реальній технології з помітними втратами теплоти. Рішення знаходять, як правило, застосовуючи різні варіанти технологічних заходів: 1) підвищення коефіцієнта витрати повітря, що негативно впливає на калорійність газу; 2) підвищення температури повітря, у тому числі за рахунок утилізації теплоти вихідного газу; 3) додаток кисню до повітря, що знижує концентрацію азоту; комбінацію кількох заходів. Нижче наведені приклади розрахунків стану адіабатичної рівноваги для вказаних варіантів.

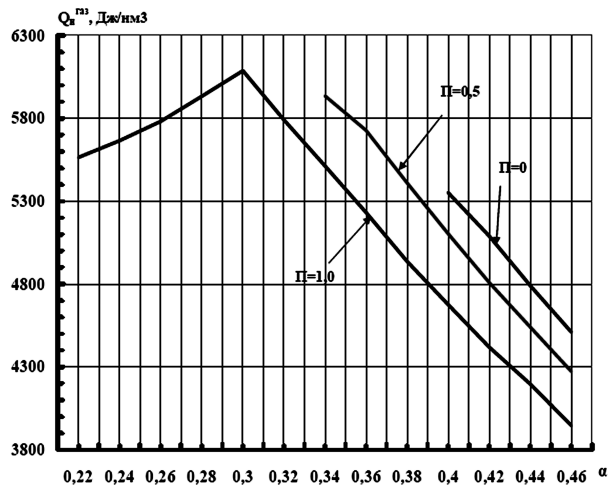


Рис.2. Графіки функції  $Q_{пг} = f(\alpha)$  в інтервалах  $\alpha = \alpha(\min) = 0,46$ .



**Таблиця 5. Показники стану адіабатичної рівноваги для системи реагентів при  $\Pi = 1,0$  у залежності від ентальпії реагентів**

$Q_{\text{дод}}, \%$	$Q_{\text{кДЖ}}^*, \text{кг}$	T, K	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{N}_2$	C(c)	CO	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	CO + $\text{H}_2$	$Q_{\text{кДЖ}}^{\text{газ}}, \text{м}^3$
0	22210	965	0,234	0,040	0,349	0,093	0,215	0,061	0,009	0,449	5560
5	23321	1018	0,256	0,023	0,347	0,051	0,285	0,034	0,005	0,541	6543
10	24431	1103	0,274	0,008	0,345	0,016	0,344	0,010	0,003	0,618	7411
15	25542	1290	0,284	0,001	0,344	0,001	0,368	0,001	0,001	0,652	7750
20	26652	1542	0,286	0	0,343	0	0,370	0	0	0,656	7761

\* Умовна теплотворна здатність горючої маси,  $Q = Q_{\text{н}}^{\text{г}} + Q_{\text{дод}}$ .

#### Варіант 1. Залежність результатів від $\alpha$

З табл.4 видно, що при газифікації вугілля ( $\Pi = 0$ ) у результаті підвищення коефіцієнта витрати окислювача монотонно знижується сума  $\text{CO} + \text{H}_2$  та підвищується адіабатична температура продуктів, але при застосуванні комбінованого палива або біопалива концентрація цієї суми проходить через максимум (48,9 % (об.) для  $\Pi = 0,5$  та 49,5 % (об.) для  $\Pi = 1,0$ ) внаслідок того, що на початкових стадіях підвищення  $\alpha$  відбувається конверсія вільного вуглецю та метану з додатковим повітрям.

Характер функціональної залежності  $Q_{\text{н}}^{\text{газ}} = f(\alpha)$  простежується на рис.2. Якщо вважати, що для задовільного перебігу технологічного процесу потрібна температура 1400–1500 K, то цей показник забезпечується проведенням процесу при значеннях коефіцієнта витрати повітря  $\alpha \approx 0,445$  в усьому діапазоні сумішей  $\Pi = (0-1,0)$ , для яких ізотерма  $T = 1473$  K розташована вертикально.

#### Варіант 2. Вплив підігрівання повітря

Підвищення температури повітря можливе при утилізації теплоти газоподібного продукту газифікації або незалежного нагрівання за рахунок додаткового палива. Оптимальний спосіб вибирають на стадії проектування з урахуванням економічної доцільності.

У програмі TERPA ентальпію нагрітого повітря можна врахувати, додавши теплоту до теплотворної здатності палива на стадії розрахунку  $\Delta H_{\text{г}}$ . У табл.5 наведені характеристики стану адіабатичної рівноваги продуктів повітряної газифікації біопалива ( $\Pi = 1,0$ ) з найнижчою температурою 965 K та додатковою теплою  $Q_{\text{дод}} = (5-20) \%$  від  $Q_{\text{н}}^{\text{г}}$ .

Як показують розрахунки, для забезпечення температури, потрібної для зняття кінетичних обмежень, необхідно і достатньо підвищення ентальпії вихідних компонентів, зокрема, нагріванням повітря на величину 15–20 % від нижчої теплотворної здатності горючої маси.

#### Варіант 3. Вплив збагачення повітря киснем

У програмі TERPA склад повітря зафіксований як константа брутто-формулою  $\text{N}54.63\text{O}14.67$ , сума 69,30 моль/кг, що у перерахунку дає  $\text{N} = 78,8$ ,  $\text{O} = 21,2 \%$  (мол.). Розрахунки цього варіанта виконані за умови збагачення повітря киснем до вмісту  $\text{O} = 100 \%$  (мол.). Результати наведені для чистого біопалива ( $\Pi = 1,0$ ), тобто для палива з найнижчою початковою температурою (див. табл.3).

При збагаченні повітря киснем збільшується відношення  $\text{O} : \text{N}$  та відповідно змінюється брутто-формула суміші. Брутто-формули киснево-повітряних сумішей та результати розрахунків у залежності від вмісту кисню наведені у табл. 6 та 7.

Як показано на прикладах, результати, отримані при різних значеннях  $\Pi$  для мінімальних значень коефіцієнта витрати окислювача, не забезпечують температури, необхідної для автотермічної технології, навіть за умови використання кисню замість повітря. Однак, застосування кисню зменшує вміст азоту в одержаній газовій суміші (та підвищує  $Q_{\text{н}}^{\text{газ}}$ ), тому може бути корисним як додаток у перших двох варіантах. З цієї причини розглянуто застосування киснево-повітряної суміші з одночасним підвищенням величини  $\alpha$  (табл.8).

**Таблиця 6. Брутто-формула киснево-повітряної суміші для газифікації біопалива ( $\Pi = 1,0$ )**

O	N	Брутто-формула
<b>21</b>	79	<b>N54.63O14.67*</b>
20	80	N55.529O13.889
25	75	N51.699O17.242
30	70	N47.922O20.549
35	65	N44.197O23.810
40	60	N40.521O27.028
50	50	N33.317O33.335
59,95	40,05	N26.338O39.445
100	0	O62.502

\* Брутто-формула повітря у програмі TERPA.

Таблиця 7. Показники стану адіабатичної рівноваги продуктів повітряно-кисневої газифікації біопалива

O, %	T, K	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	C(c)	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO + H <sub>2</sub>	Q <sub>H, газ</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
Π = 1,0										
<b>21,2*</b>	<b>965</b>	0,234	0,040	0,349	0,093	0,215	0,061	0,009	0,449	5562
40	999	0,305	0,042	0,177	0,094	0,310	0,062	0,01	0,615	7565
50	1009	0,327	0,042	0,125	0,093	0,342	0,061	0,010	0,669	8211
100	1033	0,382	0,041	0	0,088	0,420	0,057	0,011	0,802	98.25
Π = 0,6										
<b>21,2*</b>	<b>1093</b>	0,175	0,005	0,483	<b>0,014</b>	<b>0,311</b>	<b>0,010</b>	<b>0,001</b>	<b>0,486</b>	<b>5852</b>
40	1064	0,253	0,016	0,257	0,041	0,402	0,028	0,003	0,655	7919
50	1084	0,280	0,015	0,188	0,037	0,453	0,025	0,003	0,733	8852
59,95	1095	0,300	0,0146	0,134	0,036	0,489	0,024	0,004	0,789	9557
99	1148	0,354	0,010	0	0,023	0,596	0,015	0,003	0,950	11459

\* Брутто-формула повітря у програмі ТЕРРА.

Таблиця 8. Показники стану адіабатичної рівноваги продуктів киснево-повітряної газифікації біопалива (Π = 1,0) за умови α &gt; α(min)

α	T, K	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	C(c)	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO + H <sub>2</sub>	Q <sub>H, газ</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
O = 100 % (брутто-формула O62.502)										
0,225	959	0,328	0,085	0	0,177	0,270	0,120	0,020	0,598	7665
0,250	977	0,342	0,075	0	0,130	0,325	0,112	0,017	0,667	8406
0,275	993	0,354	0,065	0	0,082	0,381	0,104	0,014	0,735	9133
0,300	1008	0,365	0,057	0	0,034	0,437	0,095	0,012	0,802	9901
0,325	1046	0,374	0,056	0	0	0,479	0,086	0,005	0,853	10267
0,350	1225	0,349	0,086	0	0	0,483	0,081	0	0,832	9870
0,375	1427	0,316	0,119	0	0	0,484	0,080	0	0,800	9526
0,400	1621	0,286	0,150	0	0	0,483	0,082	0	0,769	9191
O = 60 % (брутто-формула N26.303O39.475)										
0,225	952	0,299	0,077	0,091	0,163	0,242	0,111	0,017	0,541	6897
0,250	968	0,308	0,068	0,099	0,120	0,287	0,104	0,015	0,595	7486
0,275	983	0,315	0,059	0,108	0,077	0,332	0,096	0,012	0,647	8026
0,300	997	0,321	0,052	0,116	0,036	0,377	0,088	0,011	0,698	8620
0,325	1020	0,327	0,047	0,123	0	0,416	0,080	0,007	0,743	9035
0,350	1159	0,309	0,070	0,130	0	0,415	0,076	0	0,724	8575
0,375	1330	0,279	0,097	0,138	0	0,411	0,075	0	0,690	8205
0,400	1494	0,251	0,121	0,146	0	0,406	0,076	0	0,657	7839
0,425	1650	0,225	0,144	0,154	0	0,399	0,079	0	0,624	7468
O = 40 % (брутто-формула N40.521O27.028)										
0,225	941	0,266	0,072	0,183	0,153	0,206	0,104	0,016	0,472	6044
0,250	955	0,271	0,063	0,199	0,115	0,242	0,098	0,013	0,513	6446
0,275	969	0,275	0,055	0,213	0,077	0,277	0,091	0,011	0,552	6861
0,300	982	0,277	0,048	0,228	0,041	0,312	0,084	0,009	0,589	7254
0,325	994	0,279	0,042	0,242	0,006	0,346	0,077	0,008	0,625	7669
0,350	1077	0,272	0,053	0,252	0	0,349	0,073	0,001	0,621	7383
0,375	1218	0,246	0,075	0,265	0	0,343	0,072	0	0,589	6991
0,400	1355	0,220	0,095	0,278	0	0,335	0,073	0	0,556	6607
0,425	1484	0,196	0,113	0,290	0	0,327	0,074	0	0,523	6259
0,450	1605	0,175	0,129	0,301	0	0,317	0,077	0	0,492	5892

Як показано на рис.3, максимум значень Q<sub>H, газ</sub> досягається при α = 0,325 незалежно від концентрації кисню у киснево-повітряній су-

міші, тобто там, де закінчуються (або майже закінчуються) твердий вуглець та метан у продуктах газифікації. Однак, максимальне зна-

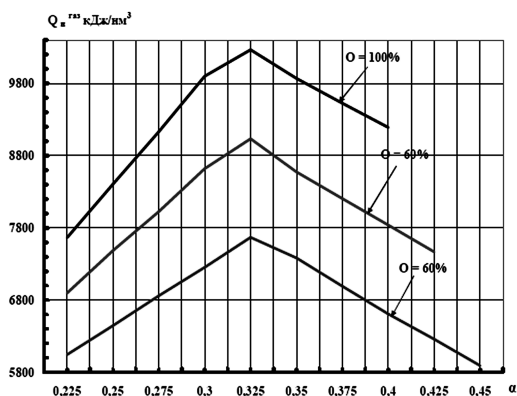


Рис.3. Графіки функції  $Q_{n, \text{газ}} = f(\alpha)$  для різних показників складу киснево-повітряної суміші.

чення величини  $Q_{n, \text{газ}}$  істотно підвищується при підвищенні концентрації кисню у киснево-повітряної суміші внаслідок зменшення вмісту баластного азоту.

Комбінуючи варіанти 2 та 3 для підвищення температури процесу, можна для кожного складу комбінованого палива знайти оптимальне сполучення параметрів технологічного процесу за критерієм максимуму ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), або теплотворності виробленого газу, або мінімальної вартості виробництва.

### Висновки

Розраховано масив показників стану адіабатичної рівноваги продуктів газифікації горючої маси комбінованих палив у повному діапазоні складів вихідної суміші: від 0 до 100 % кожного компоненту. Результати доповнено розрахунком трьох варіантів заходів з метою досягнення технологічно прийнятної температури процесу  $T_{\text{ад}} = 1473 \text{ K}$ .

Встановлено, що для забезпечення повної газифікації оптимальне значення  $\alpha = 0,445$  незалежно від складу комбінованого палива (варіант 1). Показано, що така сама температура досяжна при  $\alpha = \alpha(\text{min})$  за рахунок підігрівання повітря на 17–18 % від  $Q_{n, \text{г}}$ . При цьому теплотворність газу підвищується на 40–48 % (варіант 2).

Показано, що збагачення повітря киснем при високих концентраціях біопалива (від 100 до 60 %) не забезпечує автотермічного перебігу процесу навіть при застосуванні чистого кисню (варіант 3), але може бути корисним за умови оптимального сполучення додатку кисню та підвищення  $\alpha$ .

### Умовні позначення

$Q_{n, \text{г}}$	—	нижча теплотворна здатність горюча
$Q_{n, \text{р}}$	—	нижча теплотворна здатність робоча

$Q_{n, \text{газ}}$	—	нижча теплотворна здатність газової суміші
RDF	—	Refuse Derived Fuel (паливо з твердих відходів)
SRF	—	Solid Recovered Fuel (тверде відновлюване паливо)
ТПВ	—	тверді побутові відходи
MSW	—	Municipal Solid Waste (ТПВ)
КПС	—	киснево-повітряна суміш
$\alpha$	—	коефіцієнт витрати повітря, кисню, КПС
$\Pi$	—	доля біомаси у комбінованому паливі
$k_0$	—	стехіометричне відношення маси повітря до маси палива при $\alpha = 1$
$I_{\text{п.с}}$	—	ентальпія продуктів повного згорання при нормальних умовах
$\Delta H_f$	—	ентальпія утворення 1 кг комбінованого палива
$I$	—	повна ентальпія продуктів газифікації

### Список літератури

1. Замещение потребления природного газа генераторным газом из твердых видов топлива / Компания ООО «КлиентГаз». — <http://klientgas.com/o-tehnologii>
2. Brar J.S., Singh K., Wang J., Kumar S. Cogasification of Coal and Biomass: A Review International Journal of Forestry Research Volume, 2012, Article ID 363058, 10 p. — <http://dx.doi.org/10.1155/2012/363058>
3. Hernandez J.J., Aranda-Almansa G., Serrano C. Co-gasification of biomass wastes and coal-coke blends in an entrained flow gasifier: An experimental study. *Energ. Fuel.* 2010. 24 (4). P. 2479–2488.
4. Li K., Zhang R., Bi J. Experimental study on syngas production by co-gasification of coal and biomass in a fluidized bed. *Intern. J. Hydrogen Energy.* 2010. 35 (7). P. 2722–2726.
5. Song Y., Feng J., Ji M., Ding T., Qin Y., Li W. Impact of biomass on energy and element utilization efficiency during co-gasification with coal. *Fuel. Process. Technol.* 2013. 115. P. 42–49.
6. Rodrigues R., Muniz A.R., Marcilio N.R. Evaluation of Biomass and Coal Co-Gasification of Brazilian Feedstock Using a Chemical Equilibrium Model. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 2016. 33 (2). P. 401–414.
7. Sjöström K., Chen G., Yu Q., Brage C., Rosen C. Promoted reactivity of char in cogasification of biomass and coal: synergies in the thermochemical process. *Fuel.* 1999. 78 (10). P. 1189–1194.
8. Larry Baxter, Jaap Korpejan. Biomass-coal Co-combustion: Opportunity for Affordable Renewable Energy. — <http://doc.sciencenet.cn/upload/file/20131238543221.pdf>
9. Ефимов Н.Н., Федорова Н.В., Миргородский А.И., Коломийцева А. Газификация органических топлив и биомасс. *Успехи современного естествознания.* 2007. № 1. С. 15–21. — <http://docplayer.ru/39654511-Gazifikaciya-organicheskih-topliv-i-biomass.html>
10. Силин В.Е. Совершенствование технологии термохимической подготовки древесного топлива для малых ТЭС : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2008. — <http://www.disscat.com/content/sovershenstvovanie-tekhnologii-termokhi->



- micheskoi-podgo-tovki-drevesnogo-topлива-dlya-malykh-t
11. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов (по заданию РАО «Газпром»). — М. : ВНИИГАЗ, 1998. — <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59543/index.htm>
  12. Снігур О.В., Праженнік Ю.Г., Марчук Ю.В., Бондаренко Б.І. Термодинамічне моделювання процесів газифікації горючої маси твердого палива. *Енерготехнології і ресурсосбереження*. 2017. № 1. С. 27–38.
  13. ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. Введ. 01.01.95.
  14. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах. *III Междунар. симпозиум по теорет. и приклад. плазмохимии*. Иваново, 2002. Т. 1. С. 217–220.

Надійшла до редакції 23.01.2018

**Снігур А.В., Праженнік Ю.Г., Марчук Ю.В., канд. техн. наук, Бондаренко Б.І., акад. НАН України, докт. техн. наук, проф. Інститут газу НАН України, Київ**  
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: [umarch@i.com.ua](mailto:umarch@i.com.ua)

## Термодинамический анализ методов обеспечения автотермичности процессов воздушной газификации комбинированных топлив

Для анализа выбрана модель горючей массы комбинированного топлива, образованной из двух компонентов: а) биотоплива, состав горючей массы которого усреднен по результатам анализа многочисленных публикаций по твердым бытовым отходам (MSW, RDF, SRF) украинского происхождения и разных регионов мира, с величиной  $Q_{нГ} = (22,21 \pm 3,70)$  МДж/кг; б) обогащенного угля шахты Белореченская (Украина) с  $Q_{нГ} = 35,02$  МДж/кг. Эффект когазификации прослеживался посредством расчетов массива показателей состояния адиабатического равновесия для составов топлива от  $\Pi = 0$  (уголь) до  $\Pi = 1,0$  (биомасса) и коэффициента расхода воздуха  $\alpha(\min)$  в окрестности стехиометрических значений по реакции неполного окисления. Для достижения необходимого температурного уровня адиабатического процесса (1473 К) рассчитаны и сравнены три варианта технологических методов: повышение коэффициента расхода воздуха, что отрицательно влияет на калорийность газа; повышение температуры воздуха, в том числе за счет утилизации теплоты выходящего газа; добавление кислорода к воздуху, что понижает концентрацию азота, а также комбинация двух методов. Установлены оптимальные значения параметров газификации. *Библ. 14, рис. 3, табл. 8.*  
**Ключевые слова:** когазификация, комбинированное топливо, горючая масса, тепло-творная способность, биотопливо, уголь.

**Snigur A.V., Prazhennik Yu.G., Marchuk Yu.V., Candidate of Technical Sciences, Bondarenko B.I., Academician of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor**  
**The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**  
39, Degtyarevskaya Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: [umarch@i.com.ua](mailto:umarch@i.com.ua)

## Thermodynamic Analysis of Methods for Providing Autothermicity of Combined Fuels Air Gasification Processes

For the analysis, a model of combustible mass of combined fuel composed of two components was selected: (a) biofuel, the composition of the combustible mass is averaged based

on the analysis of numerous publications on MSW, RDF, SRF of Ukrainian origin and various regions of the world, with Lower Heating Value (LHV) of  $(22.21 \pm 3.70)$  MJ/kg; (b) enriched coal from Belorechenskaya mine (Ukraine) with LHV of 35.02 MJ/kg. The effect of co-gasification was traced by calculating the array of indicators of the adiabatic equilibrium state for fuel compositions from  $\Pi = 0$  (coal) to  $\Pi = 1.0$  (biomass) and air flow coefficient values  $\alpha(\min)$  in the vicinity of stoichiometric by reaction of partial oxidation. To achieve the necessary temperature level of the adiabatic process (1473 K), three variants of technological methods were calculated and compared: an increase in the airflow coefficient, which adversely affects the caloric value of the gas; increase in air temperature, including at the expense of heat recovery of the exhaust gas; adding oxygen to the air, which lowers the concentration of nitrogen, or a combination of the two methods. Optimum values of gasification parameters are determined. *Bibl. 14, Fig. 3, Tab. 8.*

**Key words:** co-gasification, combined fuel, combustible mass, calorific value, biofuel, coal.

### References

1. Replacement of natural gas consumption with generator gas from solid fuels. Company LLC «ClientGaz». — <http://klientgas.com/o-tehnologii> (Rus.)
2. Brar J.S., Singh K., Wang J., and Kumar S. Cogasification of Coal and Biomass: A Review International Journal of Forestry Research Volume, 2012, Article ID 363058, 10 p. — <http://dx.doi.org/10.1155/2012/363058>
3. Hernandez J.J., Aranda-Almansa G. and Serrano C. Co-gasification of biomass wastes and coal-coke blends in an entrained flow gasifier: An experimental study. *Energ. Fuel.* 2010. 24 (4). pp. 2479–2488.
4. Li, K., Zhang, R. and Bi, J., Experimental study on syngas production by co-gasification of coal and biomass in a fluidized bed. *Intern. J. Hydrogen Energy*, 2010. 35 (7), pp. 2722–2726.
5. Song, Y., Feng, J., Ji, M., Ding, T., Qin, Y. and Li, W., Impact of biomass on energy and element utilization efficiency during co-gasification with coal. *Fuel. Process. Technol.* 2013. 115. pp. 42–49.
6. Rodrigues R., Muniz A.R., and Marcilio N.R., Evaluation of Biomass and Coal Co-Gasification of Brazilian Feedstock Using a Chemical Equilibrium Model. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 2016. April-June. 33 (2). pp. 401–414.
7. Sjöström K., Chen G., Yu Q., Brage C., and Rosen C. Promoted reactivity of char in cogasification of biomass and coal: synergies in the thermochemical process. *Fuel.* 1999. 78 (10). pp. 1189–1194.
8. Larry Baxter, Jaap Koppejan. Biomass-coal Co-combustion: Opportunity for Affordable Renewable Energy. — <http://doc.sciencenet.cn/upload/file/20131238543221.pdf>
9. Efimov N.N., Fedorova N.V., Mirgorodsky A.I., Kolomiytseva A. [Gasification of Organic Fuels and Biomass]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. [Successes of Modern Natural Science]*. 2007. No. 1. pp. 15–21. — <http://docplayer.ru/39654511-Gazifikaciya-organicheskikh-topliv-i-biomass.html> (Rus.)
10. Silin V.E. [Perfection of technology of thermochemical preparation of wood fuel for small thermal power plants]. Ekaterinburg, 2008. — <http://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-tehnologii-termokhimicheskoi-podgotovki-drevesnogo-topliva-dlya-malykh-t> (Rus.)
11. [Methodical guidelines for the calculation of pollutant emissions into the atmosphere from small-capacity plants for the thermal processing of solid household waste and industrial waste (on behalf of RAO Gazprom)]. Moscow, 1998. — <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59543/index.htm> (Rus.)
12. Snigur O.V., Prazhennik Yu.G., Marchuk Yu.V., Bondarenko B.I. [Thermodynamic modeling of gasification processes of combustible mass of solid fuel]. *Energotechnologii i Resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 1. pp. 27–38. (Ukr.)
13. GOST 147-95 (ISO 1928-76). [Tomlively hard mineral. Determination of the highest calorific value and calculation of the net calorific value]. Enter. 01.01.95. (Rus.)
14. Trusov B.G. [TEPPA software system for modeling phase and chemical equilibria in plasma chemical systems]. *3d International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry.* Ivanovo. 2002. 1. pp. 217–220. (Rus.)

Received January 23, 2018