

Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 669.18

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

Термодинамічне моделювання процесів газифікації горючої маси твердого палива

Як модель складу та властивостей горючої маси нетрадиційних палив обрано усереднені показники твердих побутових відходів (ТПВ, або MSW), компонентів їх морфологічного складу та похідних від них: палива з відходів (RDF), нормованого регенованого палива (SRF) українського походження та з різних регіонів світу. Розраховано масив довідкових даних: показників стану адіабатичної рівноваги продуктів кисневої та паро-кисневої газифікації компонентів морфологічного складу твердих побутових відходів, усереднених показників горючої маси MSW, RDF, SRF для заданих параметрів рівноваги ($T = 298,15 \text{ K}$, $p = 0,1 \text{ МПа}$) у залежності від співвідношення «горюча маса : маса окислювача». Встановлено значення коефіцієнта α в оптимальному режимі газифікації різних за величиною Q_{HP} груп твердих відходів та інших низькосортних палив. *Бібл. 22, рис. 3, табл. 9.*

Ключові слова: газифікація, теплотворна здатність, горюча маса, тверді побутові відходи.

У роботах [1, 2] розраховані показники процесу паро-кисневої газифікації графіту як моделі, що узагальнює закономірності, притаманні газифікації безлічі твердих палив на основі вуглецю. Така модель має чисельні характеристики, які істотно відрізняються від результатів газифікації реальних палив. Значно ближчими до реальних показників є результати моделювання процесу газифікації горючої маси палива, яка більш наближена до складу твердих побутових відходів (ТПВ), збагачених у результаті попереднього сортування.

Підготовка палива з відходів

Елементний склад будь-якого твердого палива, як природного, так і ТПВ, якщо його розглядати як сировину для термохімічної об-

робки, є сумішшю горючої маси, золи та води. Горюча маса складається з елементів С, Н, О, N, S, з яких останні два внаслідок малих значень не відіграють істотної ролі у тепловому балансі процесів спалювання та газифікації. На відміну від цього великі масові концентрації золи та вологи істотно впливають на результати розрахунків, але врахування їх не дозволило б отримувати узагальнені результати, придатні для оцінки процесів хімічної термообробки (ХТО) різноманітних палив. Тому при виборі узагальноної моделі твердого палива слід враховувати описані нижче процеси.

Роздільний збір та сортування ТПВ.

Непідготовлені ТПВ мало придатні для термохімічної обробки внаслідок низької калорійності, обумовленої високою вологістю,

зольністю, наявністю крупних фракцій негорючих матеріалів, тому первинна обробка ТПВ має здійснювати роздільний збір, сортування, подрібнення, осушення. У процесі сортування вилучаються окремі фракції негорючих (метали, скло, каміння) та деяких інших, придатних до вторинного використання, горючих матеріалів (папір, картон, пластик, гума, деревина). У результаті первинної обробки зольність та вологість ТПВ істотно знижуються.

Паливо з відходів (RDF) та нормоване регенероване паливо (SRF). Ці види палива виробляють подрібненням та зневодненням ТПВ за спеціальною технологією «Waste converter». Вони складаються переважно з горючих та біорозкладних компонентів, тобто за елементним складом наближуються до горючої маси твердого палива.

Торефікація, або «обсмажування».

Процес відбувається при температурі 200–300 °С та відсутності або обмеженій подачі повітря. За цих умов з палива видаляються волога та леткі низькокалорійні продукти, внаслідок чого початкова маса зменшується до 30 %, а початкова енергоємність зберігається на 80–90 %. Енергетична цінність торефікованої біомаси підвищується, наближаючись до показників кам'яного вугілля. Продукт стає стійким до поглинання вологи (яка зберігається на рівні 2 %), тобто за складом також наближається до горючої маси.

Отже, оптимальною моделлю палива можна вважати горючу масу елементного складу С–Н–О, який, з одного боку, притаманний безлічі палив з великою кількістю комбінацій вологості та зольності, а з другого, який з достатнім наближенням узагальнює показники стану адіабатичної рівноваги продуктів газифікації RDF, SRF та торефікатів, що є найбільш перспективними паливами для газифікації.

Вибір кількісного складу системи С–Н–О як моделі палива

Компоненти морфологічного складу.

Вивчення літератури, присвяченої дослідженням властивостей твердих палив, дало змогу відібрати серію прикладів, що мають значні чисельні розбіжності та відрізняються за регіонами походження, авторством та методами досліджень.

У табл.1 наведені характеристики компонентів морфологічного складу ТПВ, за якими можна скласти уявлення щодо властивостей горючої маси окремих компонентів, з яких складаються практично всі побутові відходи, незалежно від сезону та країни походження, а також показники складу, перераховані на оди-

ницю маси вуглецю (Н/С та О/С), що спрощує розгляд вихідних даних та результатів розрахунків, зокрема у графічній формі.

Істотна відмінність показників у групах «Шкіра, гума» та «Інші горючі» [6], яка, можливо, пояснюється помилками експериментального визначення величини С та похідної від неї величини О, що, згідно з методикою, розраховується за рівнянням $O = 100 - C - H$. Тому при розрахунку середніх значень та похибок для вказаних груп ці дані не враховані.

Нижча теплотворна здатність палива $Q_{н^p}$. Найбільш точний метод її визначення — експериментальний (калориметрична бомба), але через складність, довготривалість та високу вартість він неприйнятний при виконанні масових розрахунків. Сучасні дослідники найчастіше застосовують розрахункові методи за формулами, найбільш поширеними з яких є:

— формула Менделеева (у країнах колишнього СРСР), кДж/кг:

$$Q_{н^p} = 339 C_p + 1030 H_p - 109 (O_p - S_p) - 25 W; \quad (1)$$

— формула Дюлонга (переважно у країнах Європи та США), яка у різних публікаціях має дещо несхожий вигляд (при перерахунку з $Q_{в^p}$ на $Q_{н^p}$), кДж/кг:

$$Q_{н^p} = 338 C_p + 1444 (H_p - O_p/8) + 94 S_p - 25 (W_p + 9 H_p) [16]; \quad (2a)$$

$$Q_{в^p} = 338 C_p + 1444 (H_p - O_p/8) + 105 S_p - 25 (W_p + 9 H_p) [17]; \quad (26)$$

$$Q = 337 C + 1442 (H - O/8) + 93 S - 25 (W_p + 9 H_p) [18]; \quad (2в)$$

$$Q = 341 C + 1432 (H - O/8) + 105 S - 25 (9 H + W) [19]. \quad (2г)$$

Формули (1)–(2г) розроблені для вивчення палив, переважно вугілля. Нами не знайдені оприлюднені дані щодо придатності їх до розрахунку теплотворної здатності біопалив (ТПВ, MSW, RDF, SRF) та можливих похибок розрахунку. Між розрахунковими та експериментальними даними є розбіжність, яка при розрахунку за формулою Менделеева досягає 6,7 %, а за формулою Дюлонга — 14,5 %, тобто найкращі розрахункові результати дає формула (1) [19].

Наші розрахунки проведені з використанням формули (1). Наведені результати показують, що найбільші значення $Q_{н^p}$ мають пластики, а також близькі до них гума та шкіра; ве-

Таблиця 1. Характеристики компонентів морфологічного складу ТПВ, % (мас.)

Джерело	С	Н	О	Н/С	О/С	$Q_{H^P}^*$	α_{min}
Папір, картон, $Q_{H^P}(сер) = 17,7 \pm 0,7 (\pm 4 \%)$							
[1]	48,3	6,6	45,1	0,137	0,934	18,3	0,14
[3]	46,6	6,4	47	0,137	1,009	17,3	0,12
[4]	46,5	6,2	47,3	0,133	1,017	17	0,12
[5]	48,9	6,5	44,6	0,133	0,912	18,4	0,15
[6]	46,4	6,2	47,4	0,134	1,022	17	0,11
[8]	47,9	6,7	45,4	0,14	0,948	18,2	0,14
Пластик, $Q_{H^P}(сер) = 33,9 \pm 3,3 (\pm 10 \%)$							
[1]	77,8	10,8	11,4	0,139	0,147	36,3	0,33
[3]	66,7	8	25,3	0,12	0,379	28,1	0,29
[4]	68,7	9,4	21,9	0,137	0,319	30,6	0,29
[5]	77,2	11,9	10,9	0,154	0,141	37,2	0,32
[6]	68,6	9,6	21,8	0,14	0,318	30,8	0,29
[8]	68,7	9,5	21,8	0,138	0,317	30,7	0,29
Шкіра, гума, $Q_{H^P}(сер) = 34,65 \pm 3,45 (\pm 10 \%)$							
[3]	82	10,8	7,2	0,132	0,088	38,1	0,34
[4]	78,8	6	15,2	0,076	0,193	31,2	0,37
[6]	88,2	11,8	0	0,134	0	42,1	0,36
Органічні (харчові та садові) відходи, $Q_{H^P}(сер) = 21,1 \pm 2,4 (\pm 11 \%)$							
[1]	53,4	6,9	39,7	0,129	0,743	20,9	0,20
[3]	52,2	7	40,8	0,134	0,782	20,5	0,19
[3]	52,1	6,5	41,4	0,125	0,795	19,8	0,19
[4]	56,2	8,1	35,7	0,144	0,635	23,5	0,22
[5]	50,4	6,2	43,4	0,123	0,861	18,7	0,17
[6]	56,2	8	35,8	0,142	0,637	23,4	0,22
[8]	55,5	7,7	36,8	0,139	0,663	22,7	0,22
[8]	53,6	6,9	39,5	0,129	0,737	21	0,20
Інші горючі, $Q_{H^P}(сер) = 23,3 \pm 0,35 (\pm 1,5 \%)$							
[1]	57,9	7,3	34,8	0,126	0,601	23,4	0,24
[4]	58,8	6,6	34,6	0,112	0,588	23	0,25
[5]	55,3	8,2	36,5	0,148	0,66	23,2	0,21
[6]	44,4	6,5	49,1	0,146	1,106	16,4	0,08
[8]	58,7	7,3	34	0,124	0,579	23,7	0,24
Відсів, $Q_{H^P}(сер) = 17,2 \pm 0 (0 \%)$							
[4]	46,6	6,3	47,1	0,135	1,011	17,2	0,12
[6]	46,4	6,4	47,2	0,138	1,017	17,2	0,11
Текстиль, $Q_{H^P}(сер) = 23,7 \pm 0,1 (\pm 0,4 \%)$							
[3]	59,3	7,1	33,6	0,12	0,567	23,8	0,25
[4]	59	7,2	33,8	0,122	0,573	23,7	0,25
[6]	59	7,1	33,9	0,12	0,575	23,6	0,25
Деревина $Q_{H^P}(сер) = 20,3 \pm 1,7 (\pm 8 \%)$							
[3]	50,4	6,1	43,5	0,121	0,863	18,6	0,17
[4]	51,2	6,1	42,7	0,119	0,83	19	0,18
[6]	51,2	6	42,8	0,117	0,836	18,9	0,18
[7]	55,1	6,5	38,4	0,118	0,697	21,2	0,22
[7]	56,2	6,8	37	0,121	0,658	22	0,23
Целюлоза $(C_6H_{10}O_5)_n$							
[2]	44,4	6,2	49,4	0,14	1,113	16,1	0,08
Поліетилен $(CH_2)_n$							
[2]	86	14	0	0,163	0	43,6	0,34

Примітка. $Q_{H^P}(сер) = (Q_{max} + Q_{min})/2$. * Величини Q_{H^P} розраховані за формулою Менделєєва, МДж/кг.

Таблиця 2. Характеристика складових компоненту «пластик, гума»

С	Н	О	Н/С	О/С	Q _{нр} , МДж/кг	Примітка*
85,7	14,3	0	0,163	0	43,6	Поліетилен (СН ₂) _n
38,4	4,8	0	0,125	0	–*	Полівінілхлорид (С ₂ Н ₃ Сl)
85,7	14,3	0	0,163	0	43,6	Поліпропілен (С ₃ Н ₆) _n
92,3	7,7	0	0,083	0	39,2	Полістирол (С ₈ Н ₈) _n
62,5	4,2	33,3	0,067	0,533	21,9	Поліетилентерефталат (С ₁₀ Н ₈ О ₄) _n
88,2	11,8	0	0,133	0	42,1	Каучук натуральний (С ₅ Н ₈) _n
44,4	6,2	49,4	0,140	1,113	16,1	Целюлоза (С ₆ Н ₁₀ О ₅) _n

* Формула не враховує вплив елементу Сl.

Таблиця 3. Усереднені характеристики горючої маси компонентів морфологічного складу ТПВ

С	Н	О	Н/С	О/С	Q _{нр} , МДж/кг	α _{min}	Примітка
47,2	6,4	46,4	0,136	0,983	17,5	0,25	Папір, картон, відсів
53,4	6,8	39,8	0,127	0,745	20,8	0,20	Органічні відходи, деревина
58,1	7,3	34,6	0,126	0,596	23,4	0,20	Інші горючі, текстиль
73,6	9,5	16,9	0,129	0,230	32,8	0,42	Пластик, шкіра, гума

лики розбіжності значень Q_{нр} у цій групі пояснюються відмінностями індивідуальних речовин, які входять до неї, як показано у табл.2 (вказане стосується також розбіжностей у показниках для деревини різних порід).

Отже, присутність виробів з ПЕТ, ПЕТФ та целюлози у фрагментах комбінованих пакувань істотно знижують показники компоненту.

Усі інші компоненти мають теплотворну здатність істотно нижчу, ніж у групі «пластик, гума», та мало відрізняються один від одного; при цьому помітна кореляція Q_{нр} з показником О/С, що підтверджується також структурою формули (1).

У табл.3 наведені показники цих компонентів, середні для кожної групи. При достатньо близьких величинах Q_{нр} перших трьох груп (20,6 ± 3) МДж/кг для останньої групи цей показник відповідає рівню кам'яного вугілля (33–37) МДж/кг внаслідок різко зниженого значення О/С при близьких значеннях Н/С для всіх чотирьох груп.

Таблиця 4. Показники стану адіабатичної рівноваги продуктів кисневої газифікації компонентів морфологічного складу ТПВ (мол. долі)

α	Т, К	Н ₂	Н ₂ О	С(с)	СО	СО ₂	СН ₄
4А. Папір, картон, відсів: С 39,297 Н 63,498 О 29,001; k = 1,3014; a = 1; I = -10100; ΔH = -10100 × 2,3014 + 17500 = -5744							
0,15	945	0,324	0,098	0,18	0,242	0,134	0,023
0,2	976	0,35	0,078	0,095	0,339	0,121	0,017
0,25	1003	0,37	0,062	0,009	0,44	0,105	0,013
0,3	1257	0,34	0,107	0	0,462	0,091	0
0,35	1606	0,281	0,166	0	0,463	0,09	0
0,4	1931	0,231	0,215	0	0,455	0,098	0
0,45	2222	0,187	0,257	0	0,44	0,112	0
0,5	2464	0,149	0,289	0	0,418	0,132	0

Киснева газифікація горючої маси компонентів морфологічного складу ТПВ

Для оцінки впливу характеристик компонентів на результати процесу окислювання ТПВ проведені паралельні розрахунки стану адіабатичної рівноваги продуктів кисневої газифікації вказаних груп компонентів (табл.4).

Очевидно, що оптимальний режим газифікації груп 4А–4В відповідає значенню коефіцієнта α = 0,30 (за критерієм максимуму СО + Н₂ при С(с) = 0), при цьому адіабатична температура Т = (1293 ± 35) К; середнє значення Q_{нр} = 20,5 МДж/кг. Для групи 4Г оптимальним є α = 0,35 при Т = 1814 К.

Оскільки перші три групи складають основну масу ТПВ, RDF та SRF, то теплотворність сумішей також є близькою до них. Відхилення у той чи інший бік залежать від концентрацій четвертої групи, які після роздільного збирання та сортування залишаються у незначних кількостях. Показники ТПВ (MSW) та похідних від них RDF та SRF наведені у табл.5.

Продовження табл.4

α	T, K	H ₂	H ₂ O	C(c)	CO	CO ₂	CH ₄
4Б. Органічні (харчові та садові) відходи, деревина: С 44,459 Н 67,467 О 24,876; Ar = 0,002; k = 1,5612; I = -10000; ΔH = - 4812							
0,15	976	0,341	0,07	0,206	0,275	0,09	0,018
0,2	1011	0,365	0,052	0,114	0,382	0,074	0,013
0,25	1046	0,384	0,037	0,021	0,492	0,057	0,009
0,3	1328	0,36	0,071	0	0,515	0,054	0
0,35	1722	0,304	0,127	0	0,508	0,06	0
0,4	2077	0,253	0,178	0	0,497	0,072	0
0,45	2379	0,204	0,222	0	0,478	0,088	0
0,5	2609	0,161	0,254	0	0,453	0,109	0
4В. Інші горючі, текстиль: С 48,372 Н 72,428 О 21,626; k = 1,7812; I = -9990; ΔH = -4384							
0,15	985	0,346457	0,061212	0,237938	0,264893	0,071608	0,017891
0,2	1026	0,371787	0,042787	0,141146	0,376465	0,055961	0,011854
0,25	1069	0,391423	0,027829	0,045259	0,489488	0,038236	0,007764
0,3	1294	0,384	0,044	0	0,537	0,035	0
0,35	1721	0,329	0,099	0	0,527	0,045	0
0,4	2101	0,274	0,153	0	0,514	0,0574	0
0,45	2416	0,222	0,199	0	0,495	0,074	0
0,5	2649	0,175	0,235	0	0,469	0,095	0
4Г. Пластик, шкіра, гума: С 61,277; Н 94,255; О 10,563; k = 2,5458; I = -10000; ΔH = - 2658							
0,15	1036	0,388	0,031	0,295	0,248	0,024	0,014
0,2	1115	0,413	0,014	0,195	0,36	0,011	0,007
0,25	1244	0,429	0,004	0,109	0,458	0,002	0,002
0,3	1435	0,433	0,001	0,028	0,537	0	0,001
0,35	1814	0,401	0,0347	0	0,553	0,012	0
0,4	2239	0,34	0,092	0	0,537	0,027	0
0,45	2558	0,275	0,146	0	0,517	0,043	0
0,5	2777	0,215	0,188	0	0,49	0,062	0

Для подальших розрахунків прийняті середні значення у табл.5, близькі до середніх у групах 4А-4В табл.4. У найбільшій мірі вони відповідають показникам ТПВ Великобританії та близьким до них — Таїланду та Мадриду.

Киснева газифікація горючої маси ТПВ, RDF, SRF

Вихідні дані: С = 55,6; Н = 7,2; О = 37,2;
Q_{HP} = 22,2 МДж/кг.

Таблиця 5. Характеристики ТПВ та одержуваних з них RDF та SRF, % (мас.)

Джерело	С	Н	О	Н/С	О/С	Q _{HP} *, МДж/кг	Примітка
[1]	54,1	7,2	38,7	0,13	0,72	21,5	MSW Norway
[5]	59,7	8,5	31,9	0,14	0,54	25,5	ТПВ Україна
[9]	56,3	8,5	35,2	0,15	0,63	24	SRF Europe (with UK)
[10]	60	8,7	31,3	0,15	0,52	25,9	RDF Norway
[10]	53	7,7	39,3	0,15	0,74	21,6	RDF-A Norway
[10]	50,3	6	43,7	0,12	0,87	18,5	RDF-B Norway
[10]	55,1	8	36,9	0,15	0,67	22,9	MSW Thailand
[10]	55	7,5	37,5	0,14	0,68	22,3	MSW UK
[10]	56,9	8,5	34,7	0,15	0,61	24,3	MSW Kuala Lumpur
[10]	52,1	6,3	41,6	0,12	0,80	19,6	Typical MSW Norway
[11]	56,5	8,4	35,1	0,15	0,62	24	MSW, Mean Crete
[12]	54,5	6,8	38,7	0,13	0,71	21,3	ТПВ Канада
[12]	52,7	6,7	40,6	0,13	0,77	20,3	ТПВ США
[12]	69,3	4,7	26	0,07	0,38	25,5	ТПВ Нідерланди

Продовження табл.5

Джерело	С	Н	О	Н/С	О/С	Q _{нр*} , МДж/кг	Примітка
[12]	51,3	6,7	42	0,13	0,82	19,7	ТПВ Москва
[12]	59,8	6	34,2	0,10	0,57	22,7	ТПВ Мадрид
[12]	52,5	6,6	40,9	0,13	0,78	20,1	ТПВ Свердловськ
–	55,6	7,2	37,2	0,13	0,67	22,2 ± 3,7	С, Н, О – середнє, % (мас.)

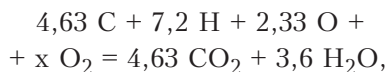
* Розраховано за формулою Менделєєва.

Таблиця 6. Показники стану адиабатичної рівноваги продуктів кисневої газифікації ТПВ, RDF, SRF

α	T, К	H ₂	H ₂ O	C(c)	CO	CO ₂
C 46,291 Н 71,436 О 23,251; k = 1,6807; $\alpha = 1$; I = -10000; $\Delta H = -10000 \times 2,6807 + 22200 = -4607$						
0,15	980	0,348	0,066	0,219	0,268	0,080
0,20	1018	0,373	0,048	0,125	0,377	0,064
0,25	1057	0,393	0,033	0,031	0,488	0,047
0,30	1319	0,376	0,059	0	0,520	0,044
0,35	1728	0,320	0,115	0	0,512	0,052
0,40	2094	0,267	0,168	0	0,500	0,064
0,45	2400	0,216	0,213	0	0,482	0,080

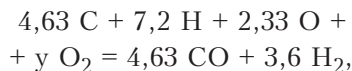
Мінімальне значення α визначається за реакціями:

– повного згоряння



звідки $x = 5,265$;

– часткового окислення



звідки $y = 1,150$.

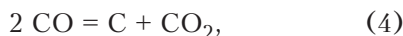
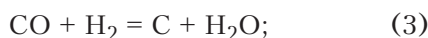
Тоді $\alpha (\text{min}) = 0,22$.

Технологічне значення α має бути дещо вище для одержання синтез-газу, гарантовано вільного від твердого вуглецю: $C(c) = 0$, як це видно з табл.6.

Більш наочне уявлення про характер згаданих закономірностей дають зведені графіки залежності температури та сумарного вмісту відновників від коефіцієнту витрати кисню (рис.1).

Паро-киснева газифікація горючої маси ТПВ, RDF, SRF

Режими газифікації при значеннях α , нижчих за стехіометричне, неможливі для реалізації через наявність залишкового вуглецю або утворення його у газовій фазі за реакціями:



умовами перебігу яких до рівноваги є низькі температури та недостача окислювача. У реальній технології причиною може бути також

випереджаюче протікання їх у прямому напрямку у порівнянні із зворотнім.

З метою «пом'якшення» процесу, тобто зменшення вірогідності утворення твердої фази

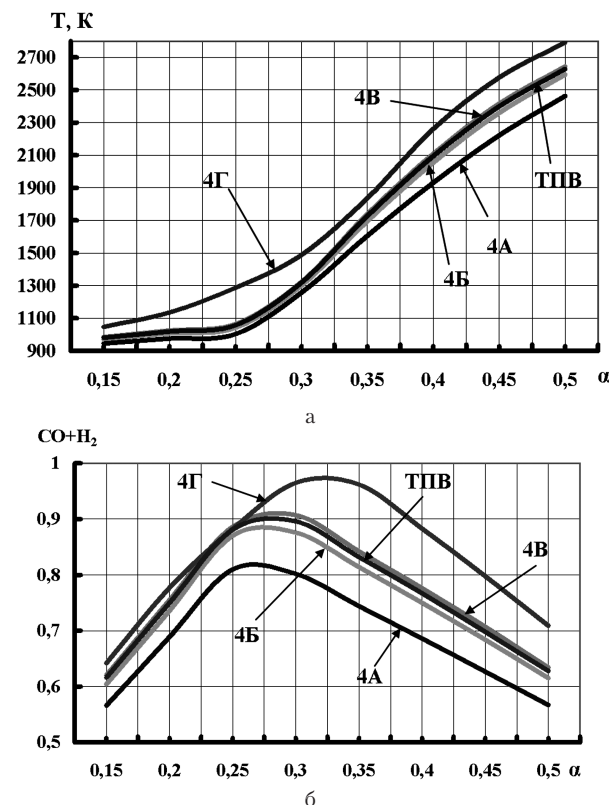
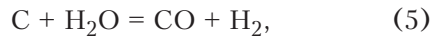


Рис.1. Зведені графіки функцій $T = f(\alpha)$ (а) та $\text{CO} + \text{H}_2 = f(\alpha)$ (б) у процесі кисневої газифікації робочої маси твердих палив, похідних від ТПВ, для відходів: 4А–4Г – груп компонентів морфологічного складу (див. табл.4); ТПВ – відсортованих ТПВ, RDF, SRF.

C(c), у сучасних технологіях як окислювач застосовують суміш кисню з водяною парою. Додаток пари має подвійний ефект: з одного боку, вносить певну кількість додаткової теплоти, усуває залишковий вуглець та збільшує відношення H_2/CO до необхідного для подальшого синтезу, з іншого — в автотермічному процесі знижує температуру внаслідок ендотермічної реакції



що можна компенсувати внесенням додатку теплоти у реакційний простір. Сумарний ефект можна визначити розрахунком стану адіабатичної рівноваги.

Вихідні дані для розрахунку. При проведеному розрахунку водяна пара бере участь як вологість палива та враховується як масове співвідношення $\beta = H_2O : \text{ТПВ}$ (г/г) у вихідній суміші, і тоді вихідне паливо складається з C, H, O, H_2O , де H_2O є умовна вологість палива.

Склад палива для розрахунку: C = 55,6; H = 7,2; O = 37,2; $H_2O = 100 \beta$. У перерахунку на 100 % (мас.): $H_2O = 100 \beta / (\beta + 1)$; вихідні дані для розрахунку наведені у табл.7.

Величина додаткової теплоти розрахована за формулою $Q_{\text{дод}} = 0,01 M_{H_2O} \times Q_{\text{дод}}$, де $Q_{\text{дод}} = 3233$ кДж/кг [2]; Q_{H^P} — за формулою Менделєєва; умовна теплотворна здатність — за формулою $Q'_{H^P} = Q_{H^P} + Q_{\text{дод}}$.

Результати розрахунку

Чисельні значення, наведені у табл.8, узгадальною тенденцією зміни температури та складу продуктів паро-кисневої газифікації модельної горючої маси відсортованих ТПВ, а також RDF, SRF та деяких торефікатів, отриманих в результаті попередньої обробки «сирих» ТПВ.

На рис.2 наведені результати, одержані у залежності від технологічних параметрів процесу паро-кисневої газифікації модельної горючої маси ТПВ. Характер кривих ізо- β та ізо-(CO+ H_2)

Таблиця 7. Склад умовно вологого палива «ТПВ, пара» та додаток теплоти, що вноситься з парою

β	C	H	O	H_2O	$Q_{\text{дод}}$	Q_{H^P}	Q'_{H^P} , кДж/кг
0	55,6	7,2	37,2	0	0	22 209	22 209
0,1	50,6	6,5	33,8	9,1	294	19 936	20 230
0,2	46,3	6,0	31,0	16,7	540	18 079	18 619
0,3	42,8	5,5	28,6	23,1	747	16 479	17 226
0,4	39,7	5,1	26,6	28,6	925	15 097	16 004
0,5	37,1	4,8	24,8	33,3	1077	13 985	15 062
0,6	34,8	4,5	23,3	37,4	1209	12 957	14 166

Таблиця 8. Показники стану адіабатичної рівноваги продуктів паро-кисневої газифікації ТПВ, RDF, SRF та торефікатів

α	T, K	H_2	H_2O	C(c)	CO	CO ₂	CH ₄	CO+ H_2	CO/ H_2
$\beta = 0$; C 46,291H 71,436 O 23,251; k = 1,6807; $\alpha = 1$; I = -10000; $\Delta H = -10000 \times 2,6807 + 22200 = -4607$									
0,15	980	0,348	0,066	0,219	0,268	0,080	0,019	0,616	0,770
0,20	1018	0,373	0,048	0,125	0,377	0,064	0,013	0,750	1,011
0,25	1057	0,393	0,033	0,031	0,488	0,047	0,009	0,881	1,242
0,30	1319	0,376	0,059	0	0,520	0,044	0	0,896	1,383
0,35	1728	0,320	0,115	0	0,512	0,052	0	0,832	1,600
0,40	2094	0,267	0,168	0	0,500	0,064	0	0,767	1,873
0,45	2400	0,216	0,213	0	0,482	0,080	0	0,698	2,231
0,50	2630	0,171	0,247	0	0,457	0,101	0	0,628	2,673
$\beta = 0,1$; C 42,128 H 74,593 O 26,177; k = 1,5260; $\alpha = 1$; I = -10100; $\Delta H = -10100 \times 2,5260 + 20230 = -5283$									
0,15	944	0,343	0,097	0,205	0,215	0,113	0,027	0,558	0,627
0,20	978	0,373	0,076	0,116	0,314	0,101	0,019	0,687	0,842
0,25	1010	0,396	0,058	0,027	0,418	0,085	0,014	0,814	1,056
0,30	1213	0,383	0,087	0	0,458	0,073	0	0,841	1,196
0,35	1588	0,321	0,148	0	0,459	0,071	0	0,780	1,430
0,40	1935	0,268	0,201	0	0,452	0,0783	0	0,720	1,687
0,45	2242	0,219	0,247	0	0,439	0,091	0	0,658	2,005
0,50	2492	0,175	0,284	0	0,418	0,109	0	0,593	2,389

Продовження табл.8

α	T, K	H ₂	H ₂ O	C(c)	CO	CO ₂	CH ₄	CO+H ₂	CO/H ₂
$\beta = 0,2$; C 38,548 H 78,070 O 28,646; k = 1,3997; $\alpha = 1$; Ar = 0,01; I = -10200; $\Delta H = -10200 \times 2,3997 + 18619 = -5858$									
0,15	941	0,367	0,107	0,154	0,222	0,121	0,030	0,589	0,605
0,20	972	0,396	0,085	0,071	0,315	0,110	0,022	0,711	0,795
0,25	1012	0,419	0,073	0	0,401	0,096	0,011	0,820	0,957
0,30	1303	0,373	0,130	0	0,416	0,081	0	0,789	1,115
0,35	1644	0,314	0,189	0	0,419	0,078	0	0,733	1,334
0,40	1960	0,263	0,239	0	0,413	0,084	0	0,676	1,570
0,45	2242	0,217	0,283	0	0,400	0,096	0	0,617	1,843
0,50	2473	0,176	0,318	0	0,382	0,112	0	0,558	2,170
$\beta = 0,3$; C 35,634 H 80,214 O 30,698; k = 1,2908; $\alpha = 1$; Ar = 0,01; I = -10300; $\Delta H = -10300 \times 2,2908 + 17226 = -6369$									
0,15	925	0,369	0,127	0,129	0,200	0,139	0,036	0,569	0,542
0,20	955	0,400	0,104	0,052	0,287	0,131	0,027	0,687	0,718
0,25	1006	0,423	0,098	0	0,355	0,115	0,009	0,778	0,839
0,30	1281	0,370	0,159	0	0,375	0,095	0	0,745	1,014
0,35	1597	0,311	0,219	0	0,381	0,089	0	0,692	1,225
0,40	1894	0,261	0,268	0	0,378	0,092	0	0,639	1,448
0,45	2164	0,216	0,311	0	0,369	0,102	0	0,585	1,708
0,50	2395	0,176	0,346	0	0,352	0,117	0	0,528	2,000
$\beta = 0,4$; C 33,053 H 82,351 O 32,501; k = 1,1964; $\alpha = 1$; I = -10500; $\Delta H = -10500 \times 2,1964 + 16004 = -7058$									
0,15	898	0,355	0,159	0,120	0,157	0,164	0,046	0,512	0,442
0,20	929	0,391	0,133	0,049	0,235	0,158	0,035	0,626	0,601
0,25	971	0,418	0,123	0	0,300	0,144	0,015	0,718	0,718
0,30	1185	0,377	0,178	0	0,328	0,117	0	0,705	0,870
0,35	1479	0,314	0,241	0	0,341	0,104	0	0,655	1,086
0,40	1761	0,262	0,292	0	0,342	0,103	0	0,604	1,305
0,45	2024	0,218	0,336	0	0,335	0,110	0	0,553	1,537
0,50	2260	0,179	0,372	0	0,322	0,122	0	0,501	1,799

у цілому аналогічний характеристикам кисневої газифікації; чисельні показники надані у табл.8. Сукупність наведених даних дає можливість попереднього вибору режиму технологічного процесу та орієнтовної оцінки показників продукту у порівнянні з попередньо отриманими даними з газифікації вуглецю (графіту) [20, 21].

Вплив параметрів процесу газифікації на показник CO/H₂. Найчастіше синтез-газ має застосування у таких напрямках: синтез метанолу, одержання водню, оксиду вуглецю, оксосинтез, синтез Фішера-Тропша. У залежності від сировини та методу одержання синтез-газу відношення CO/H₂ змінюється у широких межах [22]: від 1 : 1 до 1 : 3. Як правило, вміст компонентів у сирому неочищеному газі такий, %: CO – 15–18; H₂ – 38–40; CH₄ – 9–11; CO₂ – 30–32, тобто CO/H₂ = 0,39–0,45. Таке співвідношення є приблизним, оскільки підвищення температури синтезу збільшує вміст CO, а підвищення тиску – H₂ та CH₄. Також зміна показника CO/H₂ відбувається при охолод-

женні газу, особливо (у технологічному процесі) на каталізаторах на основі заліза, за рахунок зсуву рівноваги продуктів реакції водяного газу у бік водню: CO + H₂O = CO₂ + H₂.

Завдяки сучасним розробкам, синтез-газ можна одержувати не тільки з вугілля та нафти, але також газифікацією нетрадиційних джерел вуглецю: ТПВ та сільськогосподарських відходів у процесах утилізації.

Графік на рис.3 демонструє можливості зміни CO/H₂ у більш широких межах за рахунок комбінації основних параметрів процесу (α та β). Кожна горизонталь, яка відповідає певному значенню CO/H₂, перетинає ряд кривих ізо- α та дає змогу вибрати оптимальну комбінацію параметрів. Критерієм оптимізації може бути, наприклад, концентрація суми CO + H₂ у синтез-газі або його теплотворна здатність.

За необхідності подальшого зниження CO/H₂ зі збереженням вибраних параметрів α та β необхідного ефекту можна досягнути зниженням температури синтез-газу на селективно-

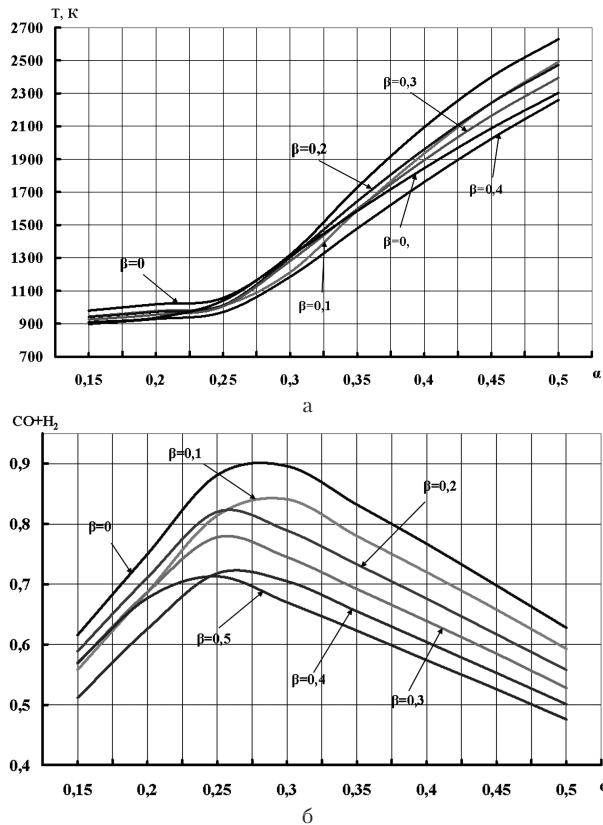


Рис.2. Зведений графік функції $\text{CO}/\text{H}_2 = f(\alpha, \beta)$ (а) та $\text{CO} + \text{H}_2 = f(\alpha, \beta)$ (б) у процесі паро-кисневої газифікації горючої маси ТПВ, RDF, SRF.

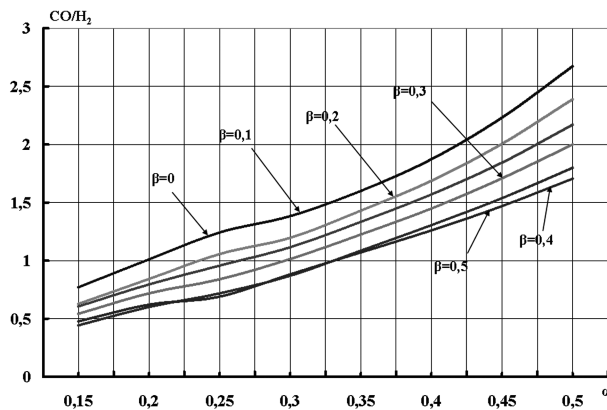


Рис.3. Зведений графік функції $\text{CO}/\text{H}_2 = f(\alpha, \beta)$ у процесі паро-кисневої газифікації горючої маси ТПВ, RDF, SRF.

му катализаторі, який збільшує швидкість реакції водяного газу, практично не змінюючи концентрації решти компонентів. Такий розрахунок виконаний для режиму одержання синтез-газу $\alpha = 0,25$, $\beta = 0,3$ при зниженні температури $T_{\text{ад}}$ від 1006 до 700 К.

Розгляд результатів. Підвищення коефіцієнта α у процесі кисневої газифікації збільшує ступінь окисленості синтез-газу, тобто

Таблиця 9. Залежність концентрацій компонентів реакції водяного газу від температури у стані локальної рівноваги

T, K	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	CO/H ₂
700	0,492	0,033	0,293	0,183	0,596
750	0,480	0,044	0,304	0,171	0,633
800	0,468	0,056	0,316	0,159	0,675
850	0,457	0,067	0,328	0,148	0,718
900	0,446	0,078	0,339	0,137	0,760
950	0,436	0,089	0,349	0,127	0,800
1000	0,426	0,098	0,358	0,118	0,840

зростання суми ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) та відповідне зниження ($\text{CO} + \text{H}_2$). Виключення складає відрізок $\alpha \leq 0,25$ (рис.1, а), де функція $T = f(\alpha)$ має характер $T \approx \text{const}$; на цьому відрізку додаткова кількість кисню витрачається не на повне згоряння до ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), а на конверсію залишкового вуглецю, в результаті чого сума ($\text{CO} + \text{H}_2$) підвищується до максимуму (рис.1, б). При подальшому підвищенні α додаток кисню витрачається на окислення горючих компонентів газової суміші, в результаті чого збільшується сума ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) та підвищується температура.

При газифікації компонентів групи 4Г («пластик, шкіра, гума») підвищення α спричиняє зростання температури, починаючи з найнижчих значень, та досягає максимуму ($\text{CO} + \text{H}_2$), близького до 100 %. Це пояснюється, як сказано вище, істотно вищим енергетичним потенціалом цих компонентів (див. табл.3).

Розгляд результатів, наведених у табл.6, спільно з графіками на рис.1 дає змогу незначно уточнити параметри оптимального режиму кисневої газифікації:

– $\alpha = 0,22-0,28$ для груп 4А–4В та середніх показників ТПВ;

– $\alpha = 0,32-0,33$ для групи 4Г.

У процесі паро-кисневої газифікації характер кривих $T = f(\alpha)$ та $\text{CO} + \text{H}_2 = f_1(\alpha)$ для кожного значення $\beta = \text{const}$ у цілому аналогічний характеристикам кисневої газифікації, але, на відміну від них, адиабатична температура та сума $\text{CO} + \text{H}_2$ знижуються при збільшенні додатку пари. При цьому зменшується відношення CO/H_2 ; подальше зменшення може бути досягнуто завдяки зсуву за реакцією водяного газу.

Висновки

Розрахований масив довідкових даних — показників стану адиабатичної рівноваги продуктів кисневої та паро-кисневої газифікації горючої маси нетрадиційних палив.

Встановлено, що компоненти морфологічного складу ТПВ можуть бути об'єднані у групи з близькими показниками C–H–O та $Q_{HP} = (20,5 \pm 3)$ МДж/кг, за виключенням групи «Пластик, шкіра, гума» — $Q_{HP} = 32,8$ МДж/кг.

Модельний склад для розрахунків вибраний як усереднений за результатами аналізу численних публікацій з ТПВ (MSW, RDF, SRF) українського походження та різних регіонів світу: C = 55,6; H = 7,2; O = 37,2 % (мас.); $Q_{HP} = (22,2 \pm 3,7)$ МДж/кг.

Встановлений показник коефіцієнта α в оптимальному режимі кисневої газифікації:

— для середніх показників ТПВ $\alpha = 0,22-0,28$;

— для групи «Пластик, шкіра, гума» $\alpha = 0,32-0,33$.

У процесі паро-кисневої газифікації характер кривих $T = f(\alpha)$ та $CO + H_2 = f_1(\alpha)$ для кожного значення $\beta = \text{const}$ у цілому є аналогічним характеристикам кисневої газифікації.

Результати розрахунків узагальнюють показники продуктів газифікації модельної горючої маси відсортованих ТПВ, а також RDF, SRF та деяких торефікатів, отриманих в результаті попередньої обробки «сирих» ТПВ. Наведені дані можуть бути корисними при проектуванні промислового обладнання для виробництва синтез-газу та при попередньому виборі технологічного режиму.

Список літератури

- Lars Sorum. Characterisation of MSW for Combustion System. Technical Report. Sintef Energy Research, Norway, 2001. — [Online Resource]. — Access mode: <http://www.energy.sintef.no>
- Joop van Tubergen, Essent Milieu, Dr. Thomas Glorius, RWE Umwelt, Eric Waeyenbergh, Scoribel, Classification Of Solid Recovered Fuels, February 2005. — [Online Resource]. — Access mode: http://erfo.info/fileadmin/user_upload/erfo/documents/standardisation/Classification_report.270205.pdf
- Determining the Chemical Composition of Solid Waste. University of Central Florida, USA. 2001. Last updated July 2004 by Dr. Reinhart. — [Online Resource]. — Access mode: <http://msw.cecs.ucf.edu/Exercise-Chem-composition.pdf>
- Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводов / Министерство ЖКХ РСФСР. — Москва, 1989. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.opengost.ru/iso/13_gosty_iso/13040_gost_iso/1304040_gost_iso/3763
- Шмарин С.Л., Гуца Е. П., Огородник С.С. и др. Динамика изменения морфологического состава твердых бытовых отходов в Киевской области // Міжнар. наук.-практ. конф. «Стале управління ТПВ в Східній Європі : Перспективи на майбутнє», Київ, 19–20 трав. 2011 р. — Київ, 2011.
- Програма «Чисте місто», м. Миколаїв, 2007. — [Електронний ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rtp.com.ua/4business/13/291.html>
- Tharaka Rama K., Chowdary Doddapaneni, Dhipankumar Kanagasabapathi. Reaction Kinetics of Tropical Biomass. University of Boras, School of Engineering, Boras, Sweden, Jan. 2012 to Aug. 2012. — Boras, 2012.
- Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехирев Д.В. Технология отходов (технологические процессы в сервисе). — М. : ГОУВПО «МГУС», 2006. — 411 с.
- Anurag Gard, Richard Smith, Daryl Hill et all. Wastes as Co-Fuels: The Policy Framework for Solid Recovered Fuel (SRF) in Europe, with UK Implications // Environmental Science & Technology. — 2007. — Vol. 41, № 14. — P. 4868–4874. — Access mode: <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es062163e>
- Michael Becidan. Experimental Studies on Municipal Solid Waste and Biomass Pyrolysis. Thesis for the degree of doctor philosophy. — Trondheim : Norwegian University of Science and Technology. 2007. — Access mode: <http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:122892/FULLTEXT01.pdf>
- Gidarakos E., Havas G., Ntzamilis P. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete, 2005. — Access mode: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Gidarakos_Country%20report.pdf
- Пляскина Н.И. Оценка энергетического потенциала утилизации твердых бытовых отходов (на примере Новосибирской области) // VIII Всерос. конф. с междунар. участием «Горение твердого топлива», Новосибирск, 13–16 нояб. 2012 г. — Новосибирск, 2012.
- Сертифікат № 22 генетичних, технологічних та якісних характеристик на вугільну продукцію ВСП «Шахта Степова» ВАТ «Павлоградвугілля» ДП «УкрНИИуглеобогащение», м. Луганськ, 01.01.10.
- Сертифікат № 24 генетичних, технологічних та якісних характеристик на вугільну продукцію ВСП «Шахта Ювілейна» ВАТ «Павлоградвугілля» ДП «УкрНИИуглеобогащение», м. Луганськ, 01.01.10.
- Технологические свойства исходных и обогащенных углей. — Харків : Інститут ДІПРОКОКС, 2013.
- Хоффман Е. Энерготехнологическое использование угля. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 328 с.
- Саранчук В.И., Ошовский В.В., Власов Г.А. Физико-химические основы переработки горючих ископаемых. — Донецк : ДГТУ, 2001.
- Газогенераторы. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gazogenerator.com/effektivnost-ispolzovaniya-topliva/podschet-teploty-sgoraniya>
- Современные проблемы и перспективы рационального лесопользования в условиях рынка // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов, СПб., 10–11 нояб. 2011 г. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://spbftu.ru/UserFiles/smuconf_2011.pdf

20. Снігур О.В., Праженник Ю.Г., Трусов Б.Г. Термодинамічне моделювання процесу кисневої газифікації водо-графітових сумішей // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. — 2014. — № 2. — С. 25–33.
21. Снігур О.В., Праженник Ю.Г., Трусов Б.Г. та ін. Термодинамічне моделювання процесу парокисневої газифікації графіту // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. — 2014. — № 3. — С. 11–20.
22. Синтез-газ : способы получения, производство, состав и применение. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ztbo.ru/o-tbo/stati/gaz>

Надійшла до редакції 09.03.17

**Снігур А.В., Праженник Ю.Г., Марчук Ю.В., канд. техн. наук,
Бондаренко Б.И., акад. НАН України, докт. техн. наук, проф.
Институт газа НАН Украины, Киев**
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: umarch@i.com.ua

Термодинамическое моделирование процессов газификации горючей массы твердого топлива

В качестве модели состава и свойств горючей массы нетрадиционных топлив выбраны усредненные показатели твердых бытовых отходов (ТБО, или MSW), компонентов их морфологического состава и производных от них: топлива из отходов (RDF), нормированного регенерированного топлива (SRF) украинского происхождения и из различных регионов мира. Рассчитан массив справочных данных: показателей состояния адиабатического равновесия продуктов кислородной и паро-кислородной газификации компонентов морфологического состава твердых бытовых отходов (MSW), усредненных показателей горючей массы MSW, RDF, SRF для заданных параметров равновесия ($T = 298,15 \text{ K}$, $p = 0,1 \text{ МПа}$) в зависимости от соотношения «горючая масса : масса окислителя». Установлены значения коэффициента α в оптимальном режиме газификации различных по величине $Q_{нр}$ групп твердых отходов и других низкосортных топлив. *Библ. 22, рис. 3, табл. 9.*

Ключевые слова: газификация, теплотворная способность, горючая масса, твердые бытовые отходы.

**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

Thermodynamic Modeling of Solid Fuel Combustible Weight Gasification Processes

As a model of unconventional fuels combustible mass composition and properties, averages of municipal solid waste (MSW), components of their morphological structure and their derivatives RDF, SRF Ukrainian origin and different world regions are selected. The reference data array: adiabatic equilibrium products state indicators of oxygen and steam-oxygen gasification of municipal solid waste components morphological composition, averages combustible mass of solid waste MSW, RDF, SRF for a given equilibrium parameters: $T = 298.15 \text{ K}$, $p = 0.1 \text{ MPa}$, depending on the ratio of «combustible mass : oxidant mass» is calculated. Coefficient α value for different by $Q_{нр}$ solid waste groups and other low grade fuels optimally gasification mode is determined. *Bibl. 22, Fig. 3, Tab. 9.*

Key words: gasification, calorific value, combustible mass, municipal solid waste.

References

- Lars Sorum. Characterisation of MSW for Combustion System. Technical Report. Sintef Energy Research, Norway, 2001. — [Online Resource]. — Access mode: <http://www.energy.sintef.no>
- Joop van Tubergen, Essent Milieu, Dr. Thomas Glorius, RWE Umwelt, Eric Waeyenbergh, Scoribel, Classification of Solid Recovered Fuels, February 2005. — [Online Resource]. — Access mode: http://erfo.info/fileadmin/user_upload/erfo/documents/standardisation/Classification_report.270205.pdf
- Determining the Chemical Composition of Solid Waste. University of Central Florida, USA. 2001. Last updated July 2004 by Dr. Reinhart. — [Online Resource]. — Access mode: <http://msw.cecs.ucf.edu/Exercise-Chem-composition.pdf>
- Metodicheskie ukazaniya po raschetu vybrosov zagrjaznjajushchih veshchestv v atmosferu ot musoroszhigatel'nyh i musoropererabatyvajushchih zavodov, Moscow : Ministerstvo ZhKH RSFSR, 1989. — [Online Resource]. — Access mode: http://www.opengost.ru/iso/13_gosty_iso/13040_gost_iso/1304040_gost_iso/3763
- Shmarin S.L., Gushha E.P., Ogorodnik S.S., Hoffmann M., Mihajlenko V.P., Martin G.G., Zhuravel' E.V. Dinamika izmenenija morfologicheskogo sostava tverdyh bytovykh othodov v Kievskoj oblasti, *Mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija «Stale upravlinnja TPV v Shidnij Evropi : Perspektivi na majbutne»*, Kiev, 19–20 May 2011, Kiev, 2011. (Rus.)
- Programa «Chiste misto», m. Mikolaev, 2007. — [Online Resource]. — Access mode: <http://www.rtp.com.ua/4business/13/291.html>
- Tharaka Rama K., Chowdary Doddapaneni, Dhpankumar Kanagasabapathi, Reaction Kinetics of Tropical Biomass. University of Boras, School of Engineering, Boras, Sweden, Jan. 2012 to Aug. 2012. — Boras, 2012.
- Shubov L.Ja., Stavrovskij M.E., Shehirev D.V. Tehnologija othodov (tehnologicheskie processy v servise), Moscow : Mgsu, 2006, 411p. (Rus.)
- Anurag Gard, Richard Smith, Daryl Hill, Nigel Simms, Simon Pollard. Wastes as Co-Fuels: The Policy Framework for Solid Recovered Fuel (SRF) in Europe, wit: UK Implications, *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (14), pp. 4868–4874. — Access mode: <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es062163e>
- Michael Becidan. Experimental Studies on Municipal Solid Waste and Biomass Pyrolysis. Thesis for the degree of doctor philosophy. — Trondheim : Norwegian University of Science and Technology. 2007. — Access mode: <http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:122892/FULLTEXT01.pdf>
- Gidaracos E., G. Havas, P. Ntzamilis. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete, 2005. — Access mode: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Gidaracos_Country%20report.pdf
- Pljaskina N.I. Ocenka jenergeticheskogo potenciala utilizacii tverdyh bytovykh othodov (na primere novosibirskoj oblasti). *VIII Vserossijskaja konferencija s mezhdunarodnym uchastiem «Gorenje tverdogo topliva»*, Novosibirsk (Rossia) 13–16 nojabrja 2012 g., Novosibirsk, 2012. (Rus.)
- Sertifikat № 22 genetichnih, tehnologichnih ta jakisnih karakteristik na vugil'nu produkciju VSP «Shahta Stepova» VAT «Pavlogradvugillja» DP «UkrNIUgleobogashhenie», m. Lugans'k, 1.01.2010. (Ukr.)
- Sertifikat № 24 genetichnih, tehnologichnih ta jakisnih karakteristik na vugil'nu produkciju VSP «Shahta Juvilejna» VAT «Pavlogradvugillja» DP «UkrNIUgleobogashhenie», m. Lugans'k, 1.01.2010. (Ukr.)
- Tehnologicheskie svojstva ishodnyh i obogashhennyh uglej, Harkiv : DIPROKOKS, 2013.
- Hoffman E. Jenergotehnologicheskoe ispol'zovanie uglja, Moscow : Jenergoatomizdat, 1983, pp. 328. (Rus.)
- Saranchuk V.I., Oshovskij V.V., Vlasov G.A. Fiziko-himicheskie osnovy pererabotki gorjuchih iskopaemyh, Doneck : Doneckij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2001.
- Gazogenerator. — [Online Resource]. — Access mode: <http://gazogenerator.com/effektivnost-ispolzovaniya-topliva/podschet-teploty-sgoraniya>
- Sovremennye problemy i perspektivy racional'nogo lesopol'zovanija v uslovijah rynka. *Materialy Mezhdunarodnoj naučno-tehnicheskoi konferencii molodyh uchenyh i specialistov*, Sankt-Peterburg, Russia, 10–11 Nov., 2011. — [Online Resource]. — Access mode: http://spbftu.ru/UserFiles/smuconf_2011.pdf
- Snigur A.V., Prazhennik Yu.G., Trusov B.G., Marchuk Yu.V., Nebesnyi A.A., Bondarenko B.I. [Thermodynamic Analysis of Oxygen Gasification of Water-Graphite Mixtures], *Energotehnologii i resursoberezenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2014, (2), pp. 25–33. (Ukr.)
- Snigur A.V., Prazhennik Yu.G., Trusov B.G., Marchuk Yu.V., Nebesnyi A.A., Bondarenko B.I., Pianykh K.Ye. [Thermodynamic Analysis of Steam-Oxygen Gasification of Graphite], *Energotehnologii i resursoberezenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2014, (3), pp. 11–20. (Ukr.)
- Sintez gaz: sposoby poluchenija, proizvodstvo, sostav i primenenie. — [Online Resource]. — Access mode: <http://ztbo.ru/o-tbo/stati/gaz> (Rus.)

Received March 9, 2017