

УДК 622.278

*А.Ф. Булат<sup>а</sup>, С.Л. Давидов<sup>а</sup>, С.О. Опарін<sup>б</sup>, Л.Т. Холявченко<sup>а</sup>, Е.С. Ключев<sup>а</sup>*

## ПІДГОТОВКА ЕКОЛОГІЧНО ПРОБЛЕМНИХ ЕНЕРГОНОСІЇВ ДО ЇХ МАСОВОГО І БЕЗПЕЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ШЛЯХОМ ВПЛИВУ ЕНЕРГІЇ ПАРОВОЇ ПЛАЗМИ

<sup>а</sup> Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро, Україна<sup>б</sup> ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Запропоновано вирішення актуальної проблеми, пов'язаної з розробкою методів і засобів підготовки до масового і безпечного використання екологічно «брудної» вуглецевмісної сировини, шляхом перетворення її в синтез-газ – енергоносію, який альтернативний нафті і природному газу. Рішення базується на аллотермічному методі перетворень за допомогою енергії парової плазми в сумішених у часі і просторі процесах плазмоутворення і перетворення середовища і генерації окиснювача з води. Наведено результати теоретичних досліджень процесу плазмових перетворень вуглецевмісних середовищ, встановлено закономірності впливу температури процесу перетворень на якісні та кількісні показники отримання газової фази з урахуванням елементного складу середовища. Складено енергетичний баланс процесу пароплазмових перетворень та доведено, що аллотермічні пароплазмові процеси відрізняються універсальністю до сировини, що переробляється, екологічною безпекою, низькою металоємністю обладнання. Показано, що вони можуть стати основою для подальшого розвитку технологій термічних перетворень вуглецевмісних середовищ, в тому числі твердих побутових відходів.

**Ключові слова:** вуглецевмісне середовище, пароплазмова газифікація, плазмогаз, енергоносію, екологічна безпека.

**DOI:** 10.32434/0321-4095-2020-130-3-46-52

### *Вступ*

Нафта і газ широко використовуються в теплоенергетиці, хімічному синтезі, в металургії та інших галузях виробництва. Подальший розвиток світової економіки збільшує споживчий попит на ці паливно-енергетичні ресурси, веде до нарощування їх видобутку і, як наслідок, до неминучого виснаження запасів. Частка використання нафти в світовому енергетичному балансі вже до 2015 р. становила 35%, а річний обсяг видобутку зріс до 4580 млн т. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства зростання видобутку нафти припиниться вже до 2030 р.<sup>1</sup> За цих умов пошук джерел енергії альтернативних нафті і газу, розвиток енергозберігаючих технологій стають незворотними і перетворюються в актуальну задачу, особливо в галузях, де використовується до 70% видобутої

нафти [1]. Альтернативою нафті і газу є вугілля, світові запаси якого оцінюються в трильйони тон та рівномірно розподілені по регіонах земної кулі. При нинішніх темпах споживання, його вистачить на 250–300 років при відносно високій стабільності його ціни. Перехід світової енергетики на альтернативні джерела енергії, в тому числі на вугілля, є неминучим [2].

Проблема переходу до альтернативних джерел енергії актуальна і в Україні, де запаси нафти практично вичерпані або її видобуток обмежений складністю залягання на великих глибинах. У той же час Україна має значні запаси кам'яного та бурого вугілля, що становить більш як 100 млрд. тон, а розвіданих і підтверджених (за даними British Petroleum Statistical) більше 33,8 млрд т<sup>2</sup>. Однак вугілля – це «проблемний» енергоносію, що проявляється в технологіях його

<sup>1</sup> The Oil Crunch – Second report of the UK Industry Taskforce on Peak Oil & Energy Security (ITPOES), February, 2010.

<sup>2</sup> BP Statistical Review of World Energy, June, 2011.

видобутку і подальшого використання. Безперервно знижуються видобувні горизонти, збільшується газонасиченість і напружений стан масиву, що проявляється викидами вугілля і газу, безперервно знижується його якість, збільшується диспропорція в балансі розвіданого і того, що добувається, багатого і бідного, коксівного, енергетичного і бурого вугілля. Основну частину (близько 65%) балансових запасів вугілля України складають низькометаморфізоване вугілля марок Б, Д, ДГ, енергетичне вугілля низької калорійності, вугілля з підвищеною вологістю, зольністю, сірчистістю і засоленістю, мало пристосоване до використання в технологіях прямого спалювання. До того ж, вугілля – екологічно «брудна» енергетична сировина. При його збагаченні і подальшому використанні прямим спалюванням загрозованими темпами накопичуються шлами, зола, а тони пилу, шкідливі і токсичні сполуки викидаються в навколишнє середовище. Очевидно, що для широкого і безпечного застосування вугілля на зміну технологіям прямого їх спалювання повинні прийти нові, екологічно чисті, комплексні технології їх перероблення і підготовки.

Відомі автотермічні технології попередньої підготовки вуглецевмісних середовищ шляхом переведення їх в газоподібний стан і подальше використання в теплоенергетиці, металургії і виробництві синтетичного моторного палива (СМП). Розроблені на початку минулого століття технології Lurgi, Winklera, Koppers-Totzek, Техасо (Перше покоління) і наступні варіанти їх розвитку і вдосконалення: Ryr-gaz, KRW, U-gaz, Shell, Prenflo, British-gaz, тощо (друге покоління), побудовані на основі прямого спалювання частини газифікованої сировини для запуску і підтримання ендотермічних реакцій термоперетворень. Розроблені в першій половині ХХ століття автотермічні технології відіграли позитивну роль у вирішенні низки проблем, в тому числі екологічних. Проте вони характеризуються високим рівнем капіталовкладень через громіздке та металоємне обладнання термоперетворень і виробництва окиснювального середовища – кисню високого (95%) ступеня очищення, низькою швидкістю термоперетворень, недостатнім рівнем деструкційних процесів шкідливих і токсичних сполук, що обумовлено низькою температурою  $(1,4-1,8) \cdot 10^3$  К в реакційному просторі. Через пряме спалювання вугілля, що застосовується для підтримання ендотермічних реакцій процесу, в атмосферу викидається 12–20%  $\text{CO}_2$ , що провокує низку еко-

логічних проблем, а корисний продукт засмічується баластними продуктами прямого спалювання. Ці недоліки є основною перешкодою на шляху широкого поширення автотермічних технологій. Їх усунення може бути досягнуто шляхом створення в реакційному просторі високотемпературних, керованих за рядом теплофізичних параметрів локальних зон, що відрізняються високими параметрами робочих режимів. Найбільш повно цьому відповідають технології третього покоління – аллотермічні. Їх особливість – енергія для запуску і підтримання реакцій термоперетворень надходить із зовні від незалежного і керованого джерела [3,4]. Ці технології розробляються, удосконалюються і певною мірою впроваджуються у виробництво. Певне місце серед них займають плазмохімічні технології, де як енергія із зовні може застосовуватися енергія низькотемпературної плазми [5]. В цьому випадку можуть створюватися потоки енергії щільністю  $(10^3-10^4)$  Вт/см<sup>2</sup> і високотемпературні  $(2-8) \cdot 10^3$  К зони, де найбільш повно проявляються каталітичні ефекти термоперетворень.

Подальшого розвитку аллотермічні процеси перетворення вуглецевмісного середовища в газ під впливом енергії повітряної і парової плазми, знайшли в роботах ІГТМ НАНУ [5,6]. Встановлено, що повне перетворення вуглецю в газовий стан відбувається при нагріванні дисперсної частинки вугілля (незалежно від розміру) до температури 1800–1900 К. Показники виходу газової фази термоперетворень, її якість залежать від кількості вуглецю в органічній частині вугілля, якості окиснюючого середовища і від співвідношення мас реагуючих компонентів. В цьому випадку мінеральна частина залишається за реакційними процесами і виділяється у вигляді зольного залишку вільного від вуглецю.

Метою даної роботи було встановлення впливу типу і якості окиснюючого середовища на якість кінцевого продукту перетворень і його енергетичні показники, виконаний розрахунок енергетичного балансу процесу перетворень і його енергетичного ККД.

#### *Експериментальна частина*

Дослідження здійснювались на прикладі енергетичного вугілля АШ-1, елементний склад якого наведено в табл. 1. Дисперсність сухої вугільної маси становила 50–150 мкм.

Дослідження здійснювались на експериментальному реакторі потужністю 35–40 кВт, який виконано за схемою суміщених в часі і просторі процесів плазмоутворення, термоперетворення

Таблиця 1

## Вихідний склад вугілля марки АШ-1

Органічна частина, мас.%							Мінеральна частина, мас.%					
A	W	S	C	H	O	N	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O
18,96	7,50	1,55	68,02	1,47	1,91	0,59	9,60	4,43	2,77	0,87	0,64	0,64

вуглецю і генерації окиснювача (кисню) з води. Схема реактора наведена на рис. 1. У реакторах суміщеного типу теплообмінні процеси відбуваються безпосередньо в зоні горіння дуги, а накладені зовнішні магнітні поля інтенсифікують процеси, поліпшують перемішування потоків окиснювача і середовища.

Об'єднання в єдиному просторі джерела

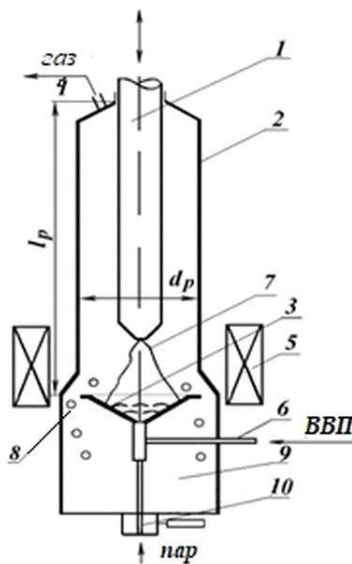


Рис. 1. Принципова схема експериментального плазмохімічного реактора суміщеного типу: 1 – катод; 2 – реактор; 3 – анод; 4 – корпус; 5 – соленоїд; 6 – система подавання водовугільної суміші; 7 – дуговий розряд; 8 – діафрагма; 9 – золонакочувач

енергії (дуговий розряд) та її приймача (середовище перетворення і окиснювач) прискорює теплообмінні процеси за рахунок збільшення радіаційної складової теплового потоку енергії, що вводиться, підвищує енергетичний ККД і продуктивність процесу.

**Результати та обговорення**

Встановлено вплив окиснюючого середовища на показники процесу перетворень. Максимальний вихід газу можна отримати, застосовуючи повітряне окиснюче середовище ( $\Sigma V_i = 3,88 \text{ м}^3/\text{кг}$  вугілля) (табл. 2). Але частина горючих компонентів газової фази ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) в цьому випадку не перевищує 37%, решта 60% – це нейтральний азот з окиснювача (баласт). Калорійність такого газу складає (4,0–4,6) МДж/м<sup>3</sup>, що в 2,5 рази нижче, ніж в кисневому або паровому середовищі, а енергетичний ККД процесу не перевищує 0,6 (табл. 2). Мінімальний вихід газу в кисневому середовищі складає понад 1,55 м<sup>3</sup>/кг вугілля. Основними компонентами газової фази є CO, вихід якого становить 80% від загального обсягу газу, і H<sub>2</sub> (14,19%). Синтез-газ в кисневому середовищі є переважаючим і становить 94% від загального обсягу газу, калорійність – 11,5–12,0 МДж/м<sup>3</sup>. Недоліки кисневого дуття – низький вихід газу, незадовільний (нижче 1) показник водно-оксидного числа (H<sub>2</sub>/CO) і висока вартість спеціального обладнання для виробництва окиснювача.

У разі застосування в якості окиснюючого середовища водяної пари, питомий вихід газової

Таблиця 2

## Показники якості і кількості газової фази перетворення вугілля АШ-1 в різних окиснюючих середовищах при дії енергії плазми

Окиснювач*		Склад газу								Теплота згоряння Q <sub>c</sub> , МДж/м <sup>3</sup>	Енергетичний ККД	
		CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> C	Загальний об'єм $\Sigma V_i$			CO+H <sub>2</sub>
Повітря	М <sup>3</sup> /кг	0	0,01	1,20	0,01	0,25	2,33	0,08	3,88	1,45	4,6	0,58–0,60
	%	0	0,26	30,93	0,26	6,44	60,05	2,06	100,00	37,37		
Кисень	М <sup>3</sup> /кг	0	0,04	1,24	0,04	0,22	0,01	0	1,55	1,46	11,3	0,75–0,78
	%	0	2,58	80,00	2,58	14,19	0,65	0	100,00	94,19		
Водяна пара	М <sup>3</sup> /кг	0	0	1,27	0,001	1,39	0,01	0	2,67	2,66	11,7	0,96–0,98
	%	0	0	47,55	0,04	52,04	0,37	0	100,00	99,59		

Примітка: \* – об'єми (м<sup>3</sup>) тут і далі наведені за нормальних умов.

фази на 52% вище кисневого ( $\Sigma V_i = 2,67 \text{ м}^3/\text{кг}$  вугілля) за рахунок водню з окиснювача, синтез-газ в ньому становить 98–99%, енергетичний ККД близький 1, а водно-окисне число більше 1, що позитивно оцінюється в технології хімічного синтезу рідких вуглеводнів.

Результати досліджень у вигляді встановлених залежностей процесу зміни кількості і складу газової фази перетворень, енергоємності процесу і показників якості продукту від температури в реакційному просторі наведені на рис. 2.

Температура є основним фактором впливу на процеси перетворень гетерогенного середовища в газовий стан. Оптимальним є нагрів полідисперсної частки, незалежно від її розміру, до температури повної конверсії вуглецю 1800–2000 К. При температурі спостерігаються максимальні значення основних показників процесу – вихід газової фази, її теплотворна здатність і ступінь перетворення вуглецю яка досягає 100% (рис. 2).

При паровому окиснюючому середовищі і цій температурі питомий вихід газу, що становить  $2,67 \text{ м}^3/\text{кг}$  вугілля, на 50–55% більше, ніж при кисневому дутті, його енергетична складова ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) досягає 98–99%, за рахунок водню з окиснювача на 50–55%. Склад газової фази, її якісні показники, в тому числі калорійність, залежать від співвідношення мас реагуючих ком-

понентів (коефіцієнта витрати окиснювача,  $\alpha$ ). Для більшості типів вугілля, де процентний вміст вуглецю мало відрізняється,  $\alpha$  змінюється в діапазоні 0,9–0,96, що відповідає стехіометричному співвідношенню мас вуглецевмісного і окиснюючого середовищ.

Змінення  $\alpha$  у порівнянні зі стехіометричною величиною веде до погіршення якості і кількості кінцевого продукту. Енергетичні показники процесу перетворень вуглецевмісного середовища (на прикладі АШ-1), з урахуванням його енергії, представлені в табл. 3. Результати досліджень і розрахунків [6,7] показують, що при пароплазменних перетвореннях вуглецевмісних середовищ, враховуючи потенційну енергію цього середовища, енергія перетворення практично дорівнює значенню енергії продуктів перетворення, де розподілена таким чином: в обсязі отриманої газової фази – 79–80%; в температурі цих газів – 18%; в температурі зольного залишку – 1,1–1,2%. Практичне використання цієї енергії залежить від ступеню утилізації (регенерації) тепла газів, що утворюються.

Комплексна переробка вугілля або відновлення його мінеральної частини ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , тощо) відбувається при температурі 2500–3000 К. При температурі цій компоненти мінеральної частини залишаються в твердому зольному залишку, вільному від вуглецю.

Повний аналіз термодинамічного моделю-

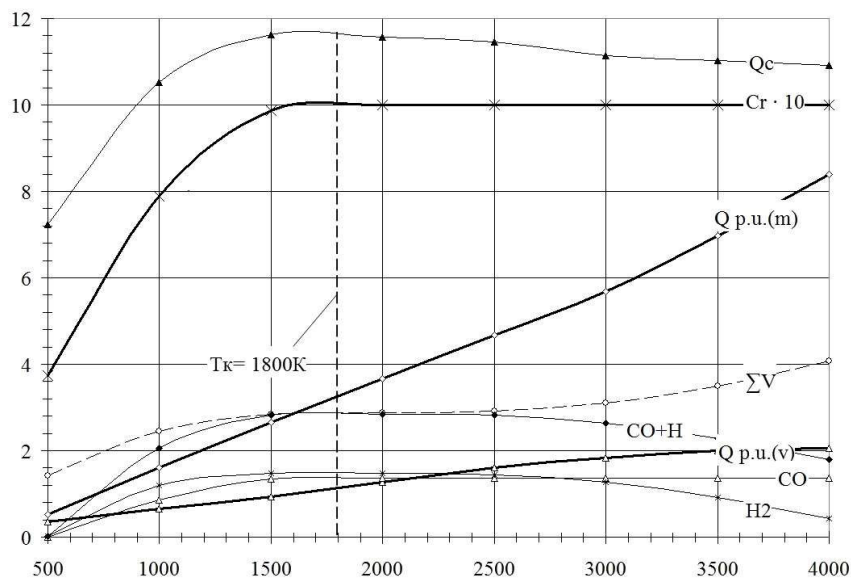


Рис. 2. Температурні залежності основних показників процесу перетворень під впливом енергії парової плазми (на прикладі вугілля АШ-1):  $Q_{\text{плт}(m)}$ , кВт·год/кг – питомі енерговитрати на 1 кг абсолютно сухого вугілля;  $Q_{\text{зд}(v)}$ , кВт·год/м<sup>3</sup> – питомі енерговитрати на 1 м<sup>3</sup> отриманої газової суміші;  $Q_c$ , МДж/м<sup>3</sup> – теплота згоряння отриманої газової суміші;  $V_{\text{зг}}$ , м<sup>3</sup>/кг – загальний об'єм газової суміші з 1 кг вугілля;  $\text{CO}$ , м<sup>3</sup>/кг – об'єм  $\text{CO}$  з 1 кг вугілля;  $\text{H}_2$ , м<sup>3</sup>/кг – об'єм  $\text{H}_2$  з 1 кг вугілля;  $\text{Сп-10}$ , % – ступінь переробки вуглецю

Таблиця 3

## Баланс енергії перетворень в газ вугілля АШ-1\*

Одиниця вимірювання	Вхідна енергія					Енергія продуктів			
	$Q_{\text{у}}^{\text{н}}$ ( $T_{\text{н}}=273 \text{ K}$ )	$Q_{\text{ок}}^{\text{н}}$ ( $T_{\text{н}}=273 \text{ K}$ )	$Q_{\text{у.вн}}$	$Q_{\text{в.г}}$	$\Sigma Q_{\text{прих}}$	$Q_{\text{г.вн}}$	$Q_{\text{г}}^{\text{к}}$	$Q_{\text{зола}}^{\text{к}}$	$\Sigma Q_{\text{расх}}$
кВт·год	0,0050	0,0003	7,9700	3,6600	11,6353	9,2400	2,1000	0,1320	11,4720
%	0,04300	0,00256	68,49800	31,45600	100,00000	79,41400	18,04900	1,13400	98,59700

Примітка: \* – розходження між енергіями  $\Delta=1,4035\%$ .

вання та експериментальних досліджень процесу перетворення вугілля різного складу, встановлені закономірності перетворень в залежності від температури і щільності теплового потоку в реакційному просторі, якості окиснюючого середовища і співвідношення мас реагуючих компонентів, розрахунки кількості та якості продуктів перетворень показують, що парове окиснююче середовище найбільш повно відповідає вимогам якості корисного продукту, раціональному використанню сировини, повною мірою вирішує проблеми екологічної безпеки, які гостро стоять при прямому спалюванні твердого палива, що супроводжується викидами в навколишнє середовище великої кількості токсичних і шкідливих сполук (сірчисті з'єднання, оксиди азоту, діоксини, фурані, зола). Концентрації їх викидів в навколишнє середовище значно перевищують допустимі норми (табл. 4), а повна заміна газу і нафти в світовій економіці прямим спалюванням вугілля і може загрожувати важкими екологічними наслідками. Приведення середовища до вимог європейських стандартів трудомісткий і дорогий захід. Автотермічні технології переведення твердого палива в газовий стан, до певної міри, вирішують екологічні проблеми, знижуючи шкідливі викиди в навколишнє

середовище. Проте 13–30% газовой фази (табл. 4) складає  $\text{CO}_2$ , що впливає з основи цих технологій – прямого спалювання частини газифікованого палива. Через порівняно низьку температуру термоперетворень (800–1600 K), недостатню для повної деструкції шкідливих і токсичних сполук, в навколишнє середовище можуть потрапляти смоли, мазут, пил, ароматичні вуглеводні, високореакційні зольні залишки. Застосування повітря в якості окиснюючого середовища на 50–60% наповнюють газову фазу баластовим азотом.

Аллотермічні пароплазмові технології підготовки вугілля, що відрізняються великою концентрацією енергії в одиниці об'єму реакційного простору ( $10^2\text{--}10^3 \text{ Вт/см}^2$ ) і високою температурою ( $(2\text{--}5)\cdot 10^3 \text{ K}$ ), можуть на порядок і більше знизити концентрацію шкідливих сполук (табл. 4 і 5) і привести їх у норми, нижче європейських стандартів.

За цих умов «брудні» вуглецевмісні середовища з різними фізико-хімічними характеристиками переробляються шляхом деструкції їх хімічних елементів. При оптимальному співвідношенні вуглецю і окиснювача при температурі в реакційному просторі більш 1700 K забезпечується деструкція шкідливих і токсичних

Таблиця 4

## Концентрація викидів в газовій фазі в деяких технологіях термоперетворень твердого палива

Шкідливі викиди, $\text{мг/м}^3$			Продукти термоперетворень, %				Викиди
Хімічна сполука	Норми ЄС	Фактичне значення	Хімічний склад	$V_{\text{к}}, \%$	$V_{\text{к}}, \%$		$\text{мг/м}^3$
пил	<10	16	$\text{H}_2$	35–45	30–31	54–60	6
HCl	<10	35	CO	20–40	34,1	35–40	0,3
$\text{NO}_x$	<400	362	$\text{C H}_4$	0–10	0	0	0–110
$\text{CO}_2$	<50	48	$\text{CO}_2$	13–27	28	0,3	2–10
$\text{SO}_2$	<50	65	$\text{N}_2$	–	20–30	0	20
Pb	<0,10	0,19	$\text{H}_2+\text{CO}$	57,00–85,00	65,10	95,00–99,00	0,02
Важкі метали	<0,1	0,1	пил та інше	–	пил	–	0,01
Діоксини, фурані	<0,1	0,5	–	–	–	–	0,001
Зольний залишок		високореакц.		малореакц.	нейтральний		нейтральний
Атмосферні викиди		високі		середні	низькі		дуже низькі

Таблиця 5

## Характеристики деяких технологій термоперетворення твердого палива

Показники	Технологія термічних перетворень			
	Пряме спалювання	Автотермічні	Аллотермічні плазмові	
Окиснювач	повітря	O <sub>2</sub> +пара	повітря	пара
Вихід газу, V <sub>к</sub> , м <sup>3</sup>	–	1,8–2,1	3,0–4,0	2,6–3,2

чних сполук. Сірка, при високих температурах, утворює сполуки, які переходять в зольний залишок, звідки легко видаляється. Зольні залишки через відсутність в них вуглецю хімічно нейтральні і придатні до використання в будівельній індустрії, захоронення або подальшої комплексної переробки.

**Висновки**

Аналізуючи склад газової фази плазмових перетворень вуглецевмісних середовищ різного хімічного складу в паровому окиснювальному середовищі можна зробити висновок, що у всіх випадках газова фаза на 98–99% складається з синтез-газу (CO+H<sub>2</sub>). Молекулярний водень, в результаті деструкції молекул води і реакції C+H<sub>2</sub>O=CO+H<sub>2</sub>, поповнює газову фазу. Це є свідченням селективності процесу стосовно продуктів перетворення. З іншого боку, вуглецевмісні середовища різного хімічного складу перетворюються в той же синтез-газ на 98–99%, що є свідченням універсальності процесу перетворення в паровому середовищі до вуглецевмісної сировини різного елементного складу. Такі характеристики дозволяють повністю вирішити проблему дисбалансу вугілля, що добувається, і того, що використовується в енергетиці, хімічному синтезі і в металургії прямого відновлення заліза, шляхом раціонального використання вихідної сировини за рахунок переходу в кінцевий продукт високоентальпійного водню зі складу окисного середовища. При реалізації плазмохімічних процесів, де в реакційному просторі температура становить 2000–5000 К і швидкість термоперетворень зростає на декілька порядків, перетворення проходять в потоці, а обладнання відрізняється малими габаритами і металоємністю. Це знижує капітальні витрати, які в автотермічних технологіях є стримуючим фактором їх подальшого поширення, а можливість повної автоматизації процесу перетворень дозволяє помітно знизити операційні витрати.

Таким чином, аллотермічна пароплазмова технологія, що відрізняється універсальністю до сировини що переробляється, екологічною безпекою, малими металоємністю обладнання та капітальними витратами, може стати основою подальшого розвитку технологій термоперетворень вуглецевмісних середовищ.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Кучеренко М.А. Аналіз сучасного стану паливно-енергетичного комплексу України // Економічний вісник університету. – 2017. – Вип. 34(1). – С.61-79.
2. Канило П.М., Шубенко А.Л. Теплоэнергетика. Топливо-экологические проблемы и перспективы развития // Проблемы машиностроения. – 2017. – Т.20. – № 1. – С.69-77.
3. Макогон Ю.В. Инновации в сфере энергетики в Украине // Збірник наукових праць УкрДГРІ. – 2016. – № 3. – С.87-97.
4. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С. та інші. – К.: Гнозис, 2013. – 308 с.
5. Bulat A., Voloshyn O., Zhevzhik O. Plasma reactor for thermochemical preparation of coal-air mixture before its combustion in the furnaces. // Mining of Mineral Deposits. – 2013. – P.39-44.
6. Давыдов С.Л. Расчётные показатели переработки углей и отходов их обогащения методом пароплазменной газификации // Геотехнічна механіка. – 2013. – Вип. 108. – С.179-184.
7. Опарин С.А., Давыдов С.Л., Холявченко Л.Т. Расчет энергоёмкости процесса пароплазменной газификации углеродсодержащих сред // Вопросы химии и хим. технологии. – 2012. – № 1. – С.89-94.

Надійшла до редакції 22.02.2020

**THE PREPARATION OF ENVIRONMENTALLY PROBLEMATIC ENERGY SOURCES FOR THEIR FURTHER SAFE USE BY STEAM-PLASMA TREATMENT**

O.F. Bulat <sup>a</sup>, S.L. Davydov <sup>a</sup>, S.O. Oparin <sup>b, \*</sup>,  
L.T. Kholyavchenko <sup>a</sup>, E.S. Klyuev <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

<sup>b</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

\* e-mail: oparinsa1977@gmail.com

*The article addresses an actual problem associated with the development of methods for processing environmentally «dirty» carbon-containing raw materials, including coal, with the aim of preparing them for safe use in industry as an energy carrier that is an alternative to oil and gas. The article presents the results of theoretical and experimental studies of the process of plasma transformations of carbon-containing media. The prospects of a further development of the allothermic method of converting ecologically problematic raw materials into gas using the energy of vapor plasma are shown. This method involves the processes of plasma formation that combine thermal transformations and the generation of an oxidizing agent from water. The influence of the temperature of vapor-plasma on the characteristics of the resulting gas phase is established taking into account the elemental composition of a medium. The energy balance for the process of vapor-plasma transformations of carbon-containing media into gas is made up. It is shown that vapor-plasma allothermic processes are universal to treat raw materials; they are environmentally safe and low metal consuming. Therefore, these processes can be the basis for the further development of technologies for thermal transformations of carbon-containing media, including solid waste.*

**Keywords:** carbon-containing environment; steam-plasma gasification; plasma gas; energy resource; environmental safety.

**REFERENCES**

1. Kucherenko M.A. Analiz suchasnogo stanu palyvno-energetychnogo kompleksu Ukrainy [Analysis of up-to-date fuel-energy complex of Ukraine]. *Ekonomichnyi Visnyk Universytetu*, 2017, no. 34(1), pp. 61-79. (in Russian).
2. Kanilo P.M., Shubenko A.L. Teploenergetika. Toplivno-ekologicheskie problemy i perspektivy razvitiya [Heat power engineering: fuel and environmental problems and prospects of development]. *Problemy Mashinostroeniya*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 69-77. (in Russian).
3. Makogon Yu.V. Innovatsii v sfere energetiki v Ukrainie [Innovations in Ukrainian energy sector]. *Zbirnyk Naukovykh Prats' UkrDGRI*, 2016, no. 3, pp. 87-97. (in Russian).
4. Volchin I.A., Dunaevska N.I., Gaponich L.S., *Perspektyvy vprovadzhen'ya chystykh vugil'nykh tekhnologii v energetyku Ukrainy* [Prospects of implementation of clear coal technologies in Ukrainian energy sector]. Gnozis Publishers, Kyiv, 2013. 308 p. (in Ukrainian).
5. Bulat A., Voloshyn O., Zhevzhik O. Plasma reactor for thermochemical preparation of coal-air mixture before its combustion in the furnaces. In: Pivnyak G., Bondarenko V., Kovalevs'ka I., Illiashov M. (eds.) *Mining of Mineral Deposits*, CRC Press, London, 2013, pp. 39-44.
6. Davydov S.L. Raschetnye pokazateli pererabotki uglei i otkhodov ikh obogascheniya metodom paroplazmennoi gazifikatsii [Calculated parameters of the treatment of coals and their wastes by means of plasma gasification]. *Geotekhnicheskaya Mekhanika*, 2013, no. 108, pp. 179-185. (in Russian).
7. Oparin S.A., Davydov S. L., Holyavchenko L.T. Raschet energoemkosti protsessa paroplazmennoi gazifikatsii uglerodsoderzhaschikh sred [Calculation of energy capacity of plasma gasification of carbon-containing media]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 89-95. (in Russian).