

**ГАЗИФІКАЦІЯ НЕКОНДИЦІЙНОГО  
ВУГІЛЛЯ ЛЬВІВСЬКО-ВОЛИНСЬКОГО  
БАСЕЙНУ**

---

© 2010 Брик Д.В., к.т.н.,  
Стефаник Ю.В., д.т.н. (ІТТК НАНУ)

*На стендовій установці досліджено процес піролітичної газифікації некондиційного сапропелітового вугілля Львівсько-Волинського вугільного басейну, які становлять до 30 % загального видобутку вугільної маси, але внаслідок своєї високої зольності складаються у відвали.*

*There is investigated on a model plant the gasification process of the Lvivs'ko-Volyns'kyi coal basin sapropelites which represent to 30 % of outputs but in consequence of their inconditionity find in the dumps.*

Ключові слова: вугілля, сапропеліти, ресурси, вугільний басейн, стендова модельна установка, газифікація, модель вугільного пласта, генераторний газ, смола.

З середини ХХ століття спостерігається поступовий перехід від початкового джерела промислової енергії – вугілля – до нафти, газу, та, частково, атомної енергетики. Однак незабаром окреслились перспективи вичерпання цих джерел, не говорячи вже про мінливість їх цін, зумовлену економічними та політичними кризами. Тому можна вважати, що вугілля, світових запасів якого згідно з оцінками повинно вистарчити на декілька сотень років, ще довго буде залишатись основним джерелом енергії. Проте, одночасно варто враховувати, що його запаси розташовані нерівномірно (особливо це стосується родовищ дешевого відкритого видобутку). В той же час в Україні на сьогодні значно вичерпані найбільш доступні потужні шари вугілля і тепер в експлуатацію вводяться поклади вугілля меншої потужності, що призводить до значних домішок у товарному вугіллі негорючих компонентів пустої породи і, як наслідок, зниження його кондиційності, а в результаті – до появи труднощів при експлуатації.

Одним із доцільних методів використання некондиційного високозольного вугілля є його газифікація. Це також відноситься і до можливості практичного використання такого некондиційного палива, як засолене вугілля [1]. При перетворенні вугілля у суміш горючих газів і її наступному транспортуванні по газопроводах відпадає необхідність у перевезенні значних кількостей баластної пустої породи та полегшуються умови експлуатації енергетичних установок. Крім того, суттєво покращуються екологічні якості такого виду палива. Адже у вугіллі, як правило, міститься значна кількість сірки (до 10 %), як зв'язаної з органічною його частиною, так і піритної чи сульфатної, яка в процесі спалювання перетворюється в діоксид сірки SO<sub>2</sub> [2]. Наприклад, відомо, що в результаті спалювання значної кількості бурого вугілля з великим вмістом сірки на енергетично-хімічному комбінаті "Die schwarze Pumpe" (Мерзебург, Східна Німеччина) у 1950-1980 роках були значно пошкоджені карпатські ліси, особливо смерекові, від Чехії до галицьких Карпат. Незважаючи на численні напрацювання та патенти в галузі очистки газів при спалюванні вугілля в енергетичних установках, ефективність такої очистки дотепер екологічно незадовільна. В той же час, очистка газів з установок газифікації може бути здійснена куди легше, як завдяки значно меншому їх об'єму, так і нижчій температурі.

Нами було експериментально досліджено можливості газифікації такого високозольного палива, як сапропелітове вугілля Львівсько-Волинського басейну (ЛВБ), котре внаслідок високої зольності (50 % і більше), вважається некондиційним, часто відноситься до вугільних сланців, а при видобутку з гумусовим вугіллям його, як правило, складають у відвали разом з пустою породою. Крім того, при нагріванні воно виділяє відносно багато первинної смоли, що утруднює його спалювання в печах – але в той же час це є перевагою при газифікації, тому що смола є цінним продуктом для хімічної промисловості.

Так, сапропеліти Межиріченського та Забузького родовищ ЛВБ при 2 % вологи вміщують золи на суху масу ( $A^d$ ) до 42 %, при цьому вони характеризуються значним виходом летких  $V^{daf}$  – до 46-57 %, досить високою теплою згоряння – в середньому 33 МДж/кг. Такі характеристики дозволяють вважати їх потенційно цінною сировиною для газифікації.

За приблизними даними запаси сапропелітового вугілля нараховують більше 0,1 млрд. т.[3]. В межах басейну дане вугілля залягає в інтервалі глибин від 200 до 1300 м. В продуктивній товщі нижнього і середнього карбону нараховується біля 30 пластів і пропластків сапропелітів, із яких майже 20 найбільш потужних знаходяться в розрізі серпуховського ярусу. Найбільш насичений пластами сапропелітів розріз в південній частині басейну, зокрема в Забузькому та Межиріченському вуглепромислових районах. Потужність пластів сапропелітів лежить в межах 0,5-1,0 м, в окремих місцях вона зростає до 1,5 м і навіть до 2,65 м (пласт п7<sup>В</sup>, свердловина 2174, Забузький вуглепромисловий район).

Петрографічними дослідженнями [3] встановлено, що в басейні найбільш широко розповсюджене вугілля групи сапрогумолітів.

Вугілля класу гуміто-сапропелітів зустрічається рідше, а вугілля класу сапропелітів має обмежене розповсюдження. Перераховані генетичні типи сапропелітового вугілля відрізняються між собою не тільки за петрографічними ознаками, але й за хіміко-технологічними властивостями (табл. 1). В басейні сапропеліти представлені переважно богхедами. Неорганічна складова сапропелітового вугілля в основному репрезентована тонкодисперсним глинистим матеріалом і вкрапленнями мінералів: каоліном, кварцем, піритом і сидеритом.

Зола сапропелітів має наступний склад, % за масою:  $SiO_2$  – 15,1-61,9;  $TiO_2$  – 0,2-0,4;  $Al_2O_3$  – 15,2-39,9;  $Fe_2O_3$  – 5,0-43,3;  $CaO$  – 0,4-9,7;  $MgO$  – 0,1-7,9;  $SO_3$  – 0,6-3,0.

Необхідно відзначити, що в золі сапропелітів ЛВБ зафіксовано 29 мікроелементів, в т.ч. з числа рідкісних та розсіяних: галій, германій, молібден, титан, берилій, лантан, нікель, ітрій, цирконій.

Технічний аналіз сапропелітового вугілля ЛВБ по пластах наведено в табл. 2.

За даними [3], елементний склад сапропелітів ЛВБ на горючу масу є наступним, %: С – 77,8-83,8; Н – 5,3-7,6; N – 1,5-1,8; S – 0,9-1,0; O – 7,0-8,5.

Таблиця 1

Хіміко-технологічні характеристики окремих генетичних типів сапропелітів ЛВБ [3]

Клас	Генетичний тип	Технічний аналіз, %				Елементний склад, %				Вихід первинної смоли, %	Витяжка бітумінів, %	Теплота згоряння, МДж/кг, $Q_b$	Насипна вага, кг/дм <sup>3</sup>	Питома вага, кг/дм <sup>3</sup>
		$W^a$	$A^d$	$S_t^{daf}$	$V^{daf}$	С	Н	N	O					
Сапропеліти	Богхедовий	0,6-1,3	5,8-23,0	3,2	46,2-67,4	81,9-82,3	7,1-8,85	-	7,0-8,8	25,1-40,0	1,2-1,5	31,2-37,2	1,27-1,34	1,33-1,48
Гуміто-сапропеліти	Черемхівий	1,5-1,6	19,4-33,5	1,4-4,8	45,6-57,4	67,01-81,7	6,1-7,0	1,4	8,2-15,0	18,7-23,3	1,3-3,2	33,3-34,2	1,4-1,6	-
Сапропеліто-гуміти	Кеннелевий	1,2-2,0	12,6-42,5	2,7-5,6	46,0-53,0	75,7-78,3	5,3-6,5	1,42	9,2-17,2	9,7-18,1	0,3-2,5	29,2-32,5	1,42	1,69
Сапропелітові аргеліти		1,48	49,5-64,3	0,4-3,8	29,0-39,7	-	-	-	-	0,5-11,5	0,6-1,0	6,4-16,2	1,5-2,6	2,52

Таблиця 2

Результати аналізу деяких пластів сапропелітового вугілля ЛВБ [3]

Пласт	Технічний аналіз, %					Напівкоксування (суха перегонка)			Характеристика коксового залишку	Вміст фенолів у смолі
	W <sup>a</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	S <sub>t</sub> <sup>d</sup>	Q <sub>o</sub> <sup>daf</sup> , МДж/кг	Витяжка бітумів, %	Первинна смола, %	Напівкокс		
n <sub>7</sub> <sup>н</sup>	0,2-2,1	6,1-22,0	41,6-55,1	2,2-3,9	29,3-37,3	-	-	-	спікливий, не спучений	-
n <sub>7</sub>	0,5-3,7	6,8-36,6	49,0-73,0	0,5-3,1	20,1 -34,4	-	11,3-20,2	66,7-68,8	спікливий, не спучений	-
n <sub>7</sub> <sup>в</sup>	0,7-3,6	9,9-37,0	42,0-61,7	0,6-3,2	20,5 -33,5	0,6-1,1	5,4-21,2	71,8-86,3	спікливий, не спучений	-
n <sub>8</sub>	0,4-3,4	17,5-40,0	42,7	0,16-2,1	18,4 -34,4	-	до 16	77,0-89,2	порошкоподібний	до 38 % як виняток
n <sub>8</sub> <sup>в</sup>	0,7-2,3	5,8-30,1	41,7-62,4	1,2-7,8	28,1 -37,3	0,3-2,0	-	-	порошкоподібний	-
n <sub>9</sub>	1,2-2,3	17,9-36,7	30,2-51,2	2,9-8,5	27,8 -33,9	0,7-1,3	0,6-9,7	77,2-90,2	-	-
n <sub>12</sub>	0,8-2,1	42,6-44,3	39,4-51,4	0,3-1,1	17,3 -34,2	-	-	-	-	-

Стосовно первинної смоли, то з богхедів виділяється 25,1-40,0 %, а з кенель-богхедів і богхедів-кенелів – 18,7-23,3 %.

В роботі [4] теж наводиться характеристика сапропелітового вугілля, а саме, %: вологість

(W<sup>a</sup>) – 0,8-2,7; зольність (A<sup>d</sup>) – 40,6-56,3; вихід летких на горючу масу (V<sup>daf</sup>) – 37,5-44,9; вміст сірки на суху масу (S<sub>t</sub><sup>d</sup>) – 0,5-3,0. Для чотирьох шахт ЛВБ характеристика сапропелітів наведена в табл. 3.

Таблиця 3

Характеристика (технічний аналіз і продукти коксування) проб сапропелітового вугілля чотирьох Великомоствіських (“ВМ”) шахт ЛВБ [4]

№ проб	Шахта	W <sup>a</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>a</sup> , %	S <sub>t</sub> <sup>d</sup> , %	Питома вага, кг/дм <sup>3</sup>	Вихід продуктів напівкоксування за масою, %			
							Смола	Надсмоляна вода	Напівкокс	Газ + втрати
1	“ВМ” №1	0,94	40,2	26,0	2,3	1,8	7,0	3,5	82,0	7,5
2		1,26	41,8	25,6	2,4	1,8	1,6	8,4	82,4	7,6
1	“ВМ” №2	1,14	54,5	19,3	2,5	2,1	1,2	6,0	82,4	10,4
2		1,37	55,5	19,0	2,6	2,0	0,8	7,6	80,8	10,8
1	“ВМ” №3	2,12	44,6	20,9	0,8	1,9	1,2	6,4	87,5	4,9
2		2,19	44,3	20,0	0,6	1,8	1,0	5,0	84,2	10,0
1	“ВМ” №7	0,84	44,5	20,9	2,9	2,0	1,6	8,2	84,0	6,2
2		0,77	44,3	21,2	3,0	1,9	0,8	6,4	86,4	6,4



Елементний склад горючої маси, %: С – 81,9-82,3; Н – 7,1-8,9; О – 7,0-8,8.

При напівкоксуванні в реакторі Фішера вихід смол за масою змінюється в межах 2,0-7,0 %. Середній вихід смол на органічну масу (згідно з розрахунком [4]) складає 56 %. Отримана смола напівкоксування має теплоту згоряння (Q) – 16,0 МДж/кг [3].

Наявні дані лабораторних досліджень, виконані УХІНом [5], показують, що сапропелітове вугілля ЛВБ відрізняється від гумусового підвищеним вмістом водню (до 8 %), значно вишим виходом летких на горючу масу (до 52 %). При коксуванні воно виділяє багато первинної смоли, що затруднює їх спалювання в топках котлів.

Вміст петрографічних мікрокомпонентів групи вітриніту складає близько 27 %, тобто майже втричі більше, ніж у звичайному гумусовому вугіллі басейну, що вказує на особливу цінність сапропелітового вугілля ЛВБ як хімічної сировини.

*Експериментальні дослідження процесу газифікації сапропелітового вугілля ЛВБ на стендовій установці*

Установка для термічної переробки твердих палив була нами розроблена і захищена свідоцтвом на винахід [6]. Така установка може застосовуватись як для вивчення процесу в наземних умовах, так і для моделювання підземної газифікації. Схема стендової установки газифікації приведена на рис. 1, а її загальний вигляд – на рис. 2.

Установка складається з вертикального циліндричного реактора-газогенератора 1, футерованого всередині шамотною цеглою, який закритий з двох боків фланцями. В камеру газифікації подається дуття через лінію 13 і (або) лінію А. Одержаний горючий газ через лінію відбору 14 поступає на раптове охолодження в скруббер 8, в який подається технічна вода з лінії В, котра виводиться в лінію відпрацьованої води Е. Частково охолоджений газ поступає для подальшого охолодження в холодильник 9, з якого йде у лінію готової продукції D і на спалювання. Розпалення вугілля в камері горіння

проводиться зверху газогенератора газовим дифузійним пальником 15, котрий працює на суміші природного газу і повітря. Останнє подається компресором 10. Дифузійний пальник має великий діапазон стійких режимів роботи – від нестачі повітря ( $\alpha = 0,1$ ) до його надлишку ( $\alpha = 5,0$ ).

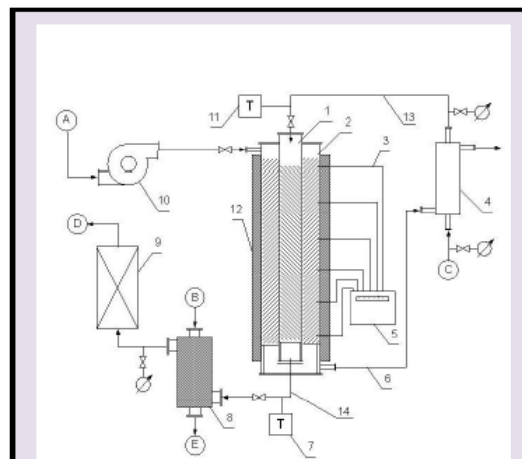


Рис. 1 Схема установки для термічної переробки твердих палив

Подача повітря як реагента теж здійснюється компресором 10 і контролюється витратимірювачем КСД-3. Гарячі цільові гази по лінії 6 частково направляють в теплообмінник 4, де підготована вода, яка поступає по лінії С, перетворюється у водяний пар для потреб газифікації. Для контролю теплового режиму процесу горіння в камеру газифікації вмонтовано шість термопар 3, які підключені до вимірювального приладу 5. Температура водяної пари або води, що поступає на газифікацію, вимірюється термопарою 11, температура отриманого синтез-газу вимірюється термопарою 7. Тиск водяної пари або води контролюється манометром. подача підготованої води для дуття здійснюється насосом з лінії С. Кількість отриманого газу вимірюється витратимірювачем.



**Рис. 2** Загальний вигляд установки для термічної переробки твердих палив

*Методика проведення експериментальних досліджень*

Моделлю подрібненого вугільного пласта є реактор 1 і (з зовнішнім діаметром 0,575 м і висотою 3 м), який завантажений попередньо подрібненим твердим паливом (вугіллям, горючим сланцем, тощо).

Після завантаження і, наприклад, запалювання вугілля зверху газогенератора в зоні горіння і досягнення необхідної температури близько 900-1000 °С, паливник відключається і процес газифікації, а також утворення газу проходить зверху вниз. Після розігріву всього об'єму вугілля переходять на нагнітання власне газифікуючих реагентів (повітря, води, суміші повітря з водою та ін.) з веденням процесу термодеструкції при температурі порядку 1000-1100 °С. Пересування фронту високотемпературної зони по висоті газогенератора, яке проходить в міру вигорання органічної речовини, контролюється шістьма термопарами (крок 0,5 м). В ході експерименту фіксуються всі необхідні

технологічні параметри (тиск, температура, витрата повітря, кількість поданої води, кількість газових та рідких продуктів реакції). Проби генераторного газу відбираються з інтервалом 20-30 хв. Після завершення експерименту припиняють подачу дуття, дають можливість охолонути газогенератору, вивантажують і зважують золу, яка залишилася, а також визначають сумарну кількість смоли, підсмольної води та генераторного газу. Визначають вагу вуглецю, що не прореагував.

Компресор типу ПКС-3,5 продуктивністю 250 м<sup>3</sup>/год. використовується для подачі повітря як в реактор під тиском до 0,7 МПа, так і на паливник, а також (як резерв) для подачі у балон з водою для вприску водяного реагенту в реактор-газогенератор. В установці передбачена також лінія для подачі кисню в реактор.

Рідкі продукти процесу газифікації накопичуються в сепараторі, а цільовий газ поступає на замірну апаратуру, а далі в газгольдер і на спалювання.

На установці передбачена можливість проводити відбір проб отриманого газу як на виході з реактора-газогенератора, так і з його зон. Для цього на зовнішній стороні реактора передбачені окремі пробовідбірники (6 штук), які суміщені з кожною кишенею термопар. Це дає можливість прослідкувати за газоутворенням при моделюванні процесу підземної газифікації вугілля для отримання генераторного газу.

Для подачі води в реактор, окрім насоса, використовувати можна і балон з водою, котрий обладнаний витратовимірною системою. Регулювання подачі води в реактор ведеться за допомогою двох вентилів і контролюється двома манометрами. Точне дозування здійснюється за допомогою капілярної трубки, встановленої на виході з сифону. При необхідності подачу води або іншого рідкого реагенту можна здійснювати у кожен конкретну зону моделі вугільного пласта через пробовідбірники на корпусі реактора. Таким чином, існує можливість моделювати водопритік у зону газифікації при вивченні процесу підземної газифікації

вугілля (ПГВ), тобто виявляти вплив підземних вод на показники ПГВ, а також знаходити шляхи підвищення ефективності останнього.

Врахувати всі явища при моделюванні такого складного процесу, яким є підземна газифікація вугілля, доволі складно, однак за допомогою описаної вище моделі ПГВ можливе детальне вивчення фізико-хімічних перетворень у вугільному пласті і проведення оптимізації технологічних параметрів підземної газифікації вугілля для отримання цільового газу.

Для проведення експериментів вертикальний шахтний реактор-газогенератор завантажується певною кількістю сапропелітового вугілля відомої марки та відомих фізико-хімічних характеристик. Кількість завантаженого вугілля ( $G$ ) зважується (в кг) і на основі цього вираховується, скільки в ньому знаходиться води, золи, горючих і летких компонентів, вуглецю, а також кількість кисню і, відповідно, повітря, необхідного для термічної переробки цього вугілля.

Проби синтезованого газу, відібрані в ході експерименту, зольний залишок процесу газифікації, смола та підсмольна вода підлягають в подальшому хімічному аналізу.

Макропористість вугілля в газогенераторі становитиме:

$$m = G / (\rho \cdot V), \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина пластового вугілля;  $V$  – об'єм завантаження газогенератора, у нашому випадку  $0,15 \text{ м}^3$ .

Середня проникність завантаження:

$$K_{\text{ср}} = \frac{2\mu_{\text{пов}} l Q_{\text{пов}}}{F_{\text{газ}} (P_{\text{вх}}^2 - P_{\text{вих}}^2)}, \quad (2)$$

де  $\mu_{\text{пов}} = 0,0181 \text{ сПз}$  – в'язкість повітря при температурі  $20^\circ \text{C}$  (на час заміру);  $l$  – довжина заправки вугілля в газогенераторі;  $F_{\text{газ}}$  – площа робочого поперечного перетину газогенератора,  $\text{см}^2$ ;  $Q_{\text{пов}}$  – витрата повітря,  $\text{см}^3/\text{сек}$ ;

$P_{\text{вх}}$  і  $P_{\text{вих}}$  – тиск в газогенераторі відповідно на вході і виході,  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Питома макроповерхня вугілля,  $\text{м}^2/\text{см}$ , розраховується за формулою (3) [7]:

$$S_{\text{мрт}} \cong 200 \sqrt{\frac{\text{м}^3}{K_{\text{ср}}}} \quad (3)$$

Швидкість газової фази в газогенераторі:

$$V = \frac{Q_{\text{пов}} T P_0}{m F_{\text{газ}} T_0 P}, \quad (4)$$

де  $T_0$ ,  $P_0$  – нормальні значення температури і тиску;  $T$ ,  $P$  – температура і тиск в газогенераторі.

Зазначимо, що під час розпаду вугілля, при роботі дифузійного пальника метан згоряє до  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  з виходом  $\sim 1,5 \text{ кг}$  випарів води на  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ , що згорів. Фіксують кількість витраченого метану і води, що утворилася при його згорянні, яка не входить в баланс продуктів реакції. Наприклад, якщо для формування реакційної зони витрачено  $10 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ , з якого виділилося  $15 \text{ кг H}_2\text{O}$ , а отримано в сепараторі  $18 \text{ кг}$  конденсату, то в баланс продуктів реакції входить лише  $3 \text{ кг H}_2\text{O}$ .

#### Стисла характеристика вихідної сировини

Вихідний матеріалом для газифікації було некондиційне сапропелітове вугілля ЛВБ Межирічинського родовища пласта  $\text{п}_8^{\text{в}}$ , яке можна віднести до класу кеннелів. Макроскопічно воно є тверде, темного кольору, тонкозернисте, блиск матовий. Вугілля складене майже непрозорою основною масою (ОМ) темно-бурого кольору. Мікроспори жовтого кольору (10-60 %) розподілені в ОМ нерівномірно. Петрографічний склад (% на безмінеральну речовину): вітриніт – 27,0; семівтриніт – 17,9; ліптиніт – 48,1; фюзиніт – 11,4.

Технічний аналіз досліджуваного вугілля (% за масою), в середньому:  $W^{\text{a}}$  – 1,6;  $A^{\text{d}}$  – 44,8;  $S^{\text{d}}$  – 0,7;  $V^{\text{daf}}$  – 41,2.  $Q_{\text{с}}^{\text{daf}}$  – 34,6 МДж/кг.



При сухій перегонці вихід первинної смоли в середньому складає до 15 % і напівпівкоксу – 84 %.

Елементний склад (%), в середньому: С – 75,9; Н – 5,4; S – 1,03; N – 0,4; O – 17,27 (за різницею).

*Аналіз результатів експериментальних досліджень*

На стендовій установці було проведено низку експериментів з термічної переробки сапропелітового вугілля на повітряному і водоповітряному дутті. У верхній частині газогенератора створювалась реакційна (розігріта) зона і за рахунок подачі дуття здійснювався процес газифікації вугілля. При цьому потік гарячих газів, виходячи із цієї зони, пошарово нагрівав вугілля, що було розташоване нижче. Це призводило до виділення з нього парів смоли та води, які потім поступали в холодильник і конденсувалися. Разом з рідкою фазою в процесі газифікації утворювався горючий газ з теплотворною здатністю близько 3,7 МДж/м<sup>3</sup>. Аналіз результатів експериментів показав, що сапропелітове вугілля, не дивлячись на його високу зольність, є доброю сировиною для термічної переробки.

Газогенератор стендової установки дозволяє максимально завантажити (в залежності від кусковості) до 220 кг товарного вугілля. Для спалювання цієї кількості вугілля необхідно до 2200 м<sup>3</sup> повітря або, відповідно, 440 м<sup>3</sup> кисню. На даній установці загалом було проведено 14 експериментів, з них 6 на повітряному дутті, 7 – на водоповітряному дутті і один пробний на перекисі водню. В результаті експериментів було прогазифіковано понад 2140 кг вугілля, отримано 1150 кг золи, більше від 222 кг смоли та відібрано для аналізу 74 проби генераторного газу.

*Повітряне дуття*

В ході експериментів виявилось, що процес пошарової газифікації сапропелітового вугілля на повітряному дутті з витратою повітря 70-170 м<sup>3</sup>/год. проходить досить стійко з високим екзотермічним ефектом. Завдяки цьому температура в реакційній зоні часто досягала величини, більшої від 1100 °С. Це призводило до прогорання кожухів термопар, які тому доцільно виготовляти із спеціальної жаростійкої сталі (табл. 4).

Таблиця 4

**Зведені результати газифікації сапропелітового вугілля на повітряному дутті**

№ експерименту	Завантажено вугілля, кг	Вихід основних продуктів газифікації				Середня теплота згоряння газу за складом, МДж/м <sup>3</sup>
		зола		смола		
		кг	% на масу вугілля	кг	% на масу вугілля	
3	172	102	59,3	15,1	8,8	2,71
4	168	77	45,8	14,9	8,9	3,66
8	169	85,5	50,6	11,7	6,9	4,71
9	148	81,0	54,7	10,1	6,8	4,76
10	170	104,0	61,2	11,7	6,9	2,76
11	166	79,0	47,6	10,3	6,2	3,67
Всього	993	528,5	53,2	73,8	7,4	3,73

Для зниження температури в зоні горіння доводилось припиняти подачу повітря і подавати воду. Варто зауважити, що під час

короткочасової (3-4 хв.) подачі в реактор води близько 10 дм<sup>3</sup>/хв. або 60 кг/год., було отримано чистий «водяний» газ з теплотою



згорання в середньому 12,3 МДж/м<sup>3</sup> з вмістом горючих компонентів в середньому 87 %. Вміст метану збільшувався з пониженням температури і з підвищенням тиску. Вихід смоли у всіх експериментах на повітряному дутті змінюється в межах 6,2-9,3 % за масою і становив в середньому 8 %. Теплотворна

здатність генераторного газу в середньому становила 3,73 МДж/м<sup>3</sup>.

*Водоповітряне дуття*

Витрата повітря становила в середньому 95 м<sup>3</sup>/год. (зміна подачі від 50 до 150 м<sup>3</sup>/год.), а води в середньому – 8,2 кг/год. або 0,2 кг на 1 кг вугілля (табл. 5).

Таблиця 5

**Зведені результати газифікації сапропелітового вугілля на водоповітряному дутті\***

№ експерименту	Завантажено вугілля, кг	Вихід основних продуктів газифікації				Середня теплота згорання газу за складом, МДж/м <sup>3</sup>
		зола		смола		
		кг	% на масу вугілля	кг	% на масу вугілля	
1	170,5	86	50,4	20,4	12,0	4,62
2	152	83	54,6	18,5	12,2	5,83
5	168,5	72,5	44,2	20,7	12,3	4,76
6	214,0	80	37,4	25,4	11,9	4,50
7	113,4	49,7	43,8	14,3	12,6	3,28
12	203	120	59,1	23,8	11,7	4,48
13	109	59	54,1	11,8	10,8	4,35
14	119	68	51,2	13,6	11,2	6,01
Всього	1249,4	626,2	50,1	148,5	11,9	4,94

\* Середні значення: витрата повітря – 75 м<sup>3</sup>/год. (експ. № 12-14), 100 м<sup>3</sup>/год. (експ. № 1-7); витрата води – 8,2 кг/год. (або 0,2 кг/кг вугілля); тиск – 0,25 МПа; температура – 850 °С.

Співвідношення витрат води і повітря становило в середньому 165 г води на 1 м<sup>3</sup> повітря (теоретично цей показник становить 150 г води на 1 м<sup>3</sup> повітря). Теплотворна здатність генераторного газу була вищою в порівнянні з теплотою згорання газу, отриманою на повітряному дутті, і становила в середньому 4,9 МДж/м<sup>3</sup>. Вищим був також і вихід смоли, який в середньому становив 11,9 % (на повітряному дутті цей показник складав 8 %). Хоч були завантажені куски різних фракцій крупності (1-70 мм), при візуальному огляді визначалося, що зола є однорідною.

Застосування водоповітряного дуття дозволило знизити температуру реакційної зони в газогенераторі до рівня ≤1000 °С, і, крім цього, дало змогу регулювати температуру в зоні реакції шляхом зміни співвідношення кількості води і повітря, які подаються в газогенератор. Виявилось також, що співвідношенням компонентів вода-

повітря при водоповітряному дутті можна в якійсь мірі впливати на якість одержуваного генераторного газу, досягаючи певного значення його теплоти згорання (наприклад 4,6-5,6 МДж/м<sup>3</sup>, експерименти №№5, 7), і на вихід кам'яновугільної смоли, доводячи цей показник до 15 % від маси завантаженого вугілля (враховуючи при цьому, що вихід смоли збільшується із зменшенням тиску в реакторі).

*Водяне дуття*

Під час проведення експериментів було відмічено, що перехід на цикл подачі у газогенератор самої лише води призводить до значного, але короткого зростання теплоти згорання газу – у середньому до величини 10,4 МДж/м<sup>3</sup>, але при цьому падає температура газифікації. Тому потрібно чітко витримувати тривалість газифікації повітрям і тривалість подачі самої лише води у реактор (табл. 6).

Зведені результати газифікації сапропелітового вугілля водою

№ експерименту	№ проби	Об'ємний склад генераторного газу, %								Теплота згорання за складом, МДж/м <sup>3</sup>
		негорючі компоненти			горючі компоненти					
		N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Сума	
8	5	7,31	0,98	10,39	40,59	35,31	1,09	0,13	81,18	9,95
9	6	3,38	0,22	4,19	63,97	26,94	1,19	0,04	92,14	10,97
1	7	7,36	0,95	10,41	44,63	35,27	1,11	0,18	81,07	9,99
2	6	3,44	0,20	4,22	64,03	26,91	1,18	0,03	92,15	11,22
14	5	6,79	0,56	8,49	43,14	39,92	1,01	0,09	84,16	10,21
14	6	8,83	0,55	9,40	47,67	32,36	1,08	0,11	81,22	10,02
Середнє значення									83,65	10,39

Для підвищення кількості і якості смоли варто використати основні положення роботи [8], котрі захищені авторським свідоцтвом на винахід.

Для більш повного розуміння процесу газифікації наведемо детальніший аналіз експерименту № 7. В газогенератор завантажено 119 кг вугілля, в якому міститься: %: вологи – 1,84; горючих компонентів – 48,2. Зольність цього вугілля складає 49,8 %. Таким чином, в газогенератор завантажено  $119 \cdot 0,018 = 2,1$  кг води;  $119 \cdot 0,498 = 59,5$  кг золоутворюючих компонентів та  $119 \cdot 0,482 = 57,3$  кг горючих компонентів. Елементний склад горючої речовини, %: С – 76,0; Н – 6,6; S – 1,0; N – 0,4; O – 16,2 (за різницею), тобто в газогенератор завантажено: вуглецю –  $57,3 \cdot 0,76 = 43,6$  кг; водню – 3,7 кг; сірки – 0,57 кг і азоту – 0,2 кг.

Експеримент тривав 3,5 год. За цей час в реактор було подано 210 м<sup>3</sup> повітря, 23 кг води і отримано на виході 13,6 кг смоли, 68 кг золи, 40 кг підсмольної води та майже 245 м<sup>3</sup> горючого газу. Середній тиск в реакторі – 0,2 МПа, середня температура – 830 °С, витрата повітря була на рівні 50-55 м<sup>3</sup>/год і середня витрата води – 7,5 кг/год. В перших пробах склад і калорійність генераторного газу були відносно стабільними з невеликими відхиленнями. Перед відбором проби № 4 припинили подачу в газогенератор води. Якість горючого газу погіршилась. Перед відбором проб №№ 5 і 6 припинили подачу

повітря, подавали лише воду і було отримано «водяний» вугільний газ дуже значної калорійності (близько 11,6 МДж/м<sup>3</sup>).

Стабільний період синтезу проходив при наступних параметрах (в середньому): витрата повітря – 55 м<sup>3</sup>/год, витрата води – 7,5 дм<sup>3</sup>/год, об'ємний склад горючого, %: N<sub>2</sub> – 67,3; O<sub>2</sub> – 2,51; CO<sub>2</sub> – 2,48; CO – 19,23; H<sub>2</sub> – 6,91; CH<sub>4</sub> – 1,19; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> – 0,29. Відповідно, елементний склад одного кубічного метру газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>: N<sub>2</sub> – 0,673 ; O<sub>2</sub> – 0,135; H<sub>2</sub> – 0,103, C – 0,105. Середня калорійність газу склала 3,65 МДж/м<sup>3</sup>. Звертає увагу відсутність сірки у складі газу. Сірка, скоріше за все, перейшла в кам'яновугільну смолу та підсмольну воду (конденсат).

Загальний об'єм кисню у закачаному в реактор об'ємі повітря (210 м<sup>3</sup>) складає 43 м<sup>3</sup> (210·0,204), а в генерованому газі – всього 33 м<sup>3</sup> (245·0,135). Різниця складає 43 - 33 = 10 м<sup>3</sup>. Цей кисень швидше всього був витрачений на утворення конденсату в кількості 20 м<sup>3</sup> газової фази або 15 дм<sup>3</sup> води в конденсаті. Крім того, 2,1 дм<sup>3</sup> води виділилося з вугілля і біля 22 дм<sup>3</sup> було закачано в реактор разом з водоповітряним дуттям. Отже, водний баланс процесу практично збігається.

Деякий надлишок води в реакторі утворився, мабуть, внаслідок реакції кисню з воднем летких компонентів вугілля. В наших умовах не може бути зворотного процесу, тобто розкладу води з наступним утворенням H<sub>2</sub> і CO, тому що середня температура в

реакторі (830 °С) є недостатньою. Для покращення умов синтезу необхідно підняти температуру в реакторі до 850-1100 °С.

Середнє відношення витрати води до витрати повітря, тобто питома витрата води в ході експерименту, підтримувалася на рівні 137 г/м<sup>3</sup> повітря, що є близьким до розрахункової величини 150 г/м<sup>3</sup>. Перевищення цього значення у випадку розкладу води призводить до зниження температури в реакторі і до затухання процесу синтезу. Тому перевищення цієї межі і наступне збільшення питомої витрати води є недоцільним. Реальний шлях покращення умов синтезу – це попередній розігрів реакційної зони в достатньо великому об'ємі до високих температур (> 900 °С).

Необхідно відзначити, що, при завантаженні газогенератора неоднорідним кускоподібним вугіллем, після завершення експерименту візуально було видно: не все вугілля прогазифіковане. У ньому утворилися прохідні канали, через які реагенти «проскакували», не вступаючи в реакцію. Очевидно, що газогенератор необхідно завантажувати більш однорідним паливом, наприклад, крупністю 10-30 мм, і дуття проводити рівномірно по всій площі поперечного перерізу газогенератора.

Відзначимо також, що внаслідок байпасів в газогенераторі в експерименті був задіяний не весь вуглець вугілля. Так, у газову фазу перетворилося лише  $245 \cdot 0,105 = 26$  кг вуглецю, у рідку фазу, тобто смолу і підсмольну воду, перейшло не більше від 10 кг вуглецю. Разом це становить 36 кг, тобто близько 68 % від кількості завантаженого в реактор вуглецю (53,7 кг). Залишок вуглецю – 17,7 кг – вивантажили разом із золою з реактора після завершення експерименту. Покращити вступ вуглецю в реакцію можна як за рахунок більш рівномірного конвективного переносу зони синтезу, так і шляхом підвищення її температури.

Як видно, вихід смоли доволі стабільний в межах одного типу дуття в розрахунку на вихідне вугілля. В той же час, розбіжності кількості залишку, що не згорів (золи) та теплотворної здатності цільового газу коливаються в широких межах. Очевидно, що це пов'язано як з неоднорідністю вихідних проб, так і з різним температурним режимом експериментів. Як приклад, типові дані наведено у табл. 7. Однак, варто враховувати, що на вплив температури і відповідно складу проб буде впливати і просування фронту горіння по довжині реактора, що змінює локальні умови в часі.

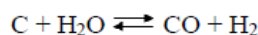
Таблиця 7

Температура в реакторі і склад основних компонентів газу (експеримент № 4)

№ п/п	Температура, °С	Об'ємний склад генераторного газу, %						Теплота згорання, МДж/м <sup>3</sup>
		N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Вищі вуглеводні	
1	950	69,66	4,17	8,73	14,28	1,48	0,1	3,31
2	850	66,74	3,58	23,44	3,51	0,84	0,1	3,56
4	880	68,58	2,80	20,56	2,97	1,06	0,1	3,23
3	910	67,33	1,66	21,30	6,41	1,23	0,1	3,77
5	860	61,79	2,85	24,70	7,64	1,46	0,1	4,44

Завантажено вугілля – 168 кг; золоутворюючих компонентів – 77 кг, смоли – 15,1 кг. Дуття – повітря. Тиск газифікації – 0,21 МПа, середня температура в реакторі – 890 °С.

Привертає увагу доволі помітна кількість наявного водню, навіть і без подачі зовнішньої води. Він, певно, утворюється за наступною реакцією:



Збільшення кількості водню в газі і сприяє підвищенню калорійності останнього.



Таким чином, проведені експерименти вказують на перспективність термічної переробки сапропелітового вугілля, яке на даний час складається у відвали. Для уникнення затрат на перевезення золоутворюючих компонентів, процес доцільно здійснювати в місцях видобутку. Середній вміст горючих компонентів отриманого газу становитиме, %: CO – 20-25; H<sub>2</sub> – 5-10. Це лише незначно нижче від вмісту їх у газогенераторному газі, який одержується з кондиційних сортів вугілля (відповідно 54-56 % та 10-13 %) [9]. Близькі також величини теплотворної здатності генераторного газу із сапропелітового вугілля (4,5-5,5 МДж/м<sup>3</sup>) та з гумусового вугілля (4,2-5,7 МДж/м<sup>3</sup>).

Особливо варто звернути увагу на значну кількість смоли, що утворюється – до 12 % на масу сапропелітового вугілля. Це цінна сировина – вона може бути використана безпосередньо як компонент дорожнього бітуму для асфальтних покриттів, чи як додаток до котельного палива. Однак, більш економічно доцільною видається її глибока хімічна переробка – наприклад, одержання з неї шляхом гідрування синтетичного рідкого палива. Подібні процеси відомі для смоли коксування [10].

Дослідженнями складу отриманих зразків смоли виявлено значні кількості фенолів, що містяться в ній [11-14]. Феноли можуть знайти кваліфіковане використання.

#### Висновки

Встановлено, що газифікація некондиційного сапропелітового вугілля – стійкий екзотермічний процес, при якому температура синтезу досягала температури плавлення золи. В процесі пошарової газифікації сапропеліту на водоповітряному дутті реально отримати горючий газ калорійністю до 6 МДж/м<sup>3</sup>, а вихід смоли довести до 150 кг на тону товарного вугілля.

Показано, що таке некондиційне паливо, як сапропелітове вугілля, є прекрасною сировиною для газифікації як в наземних, так і в підземних умовах.

#### Бібліографічний список

1. Білецький В. Проблеми переробки солоного вугілля // Праці наук. тов. ім Шевченка. – 2003. – Т. 10. Хемія і біохемія. – С. 205-227.
2. Гиссен Д. Формы серы вуглях // Сб. Химия твердого топлива. Ч.1. – М: ИЛ, 1951. – С. 70-101.
3. Кушнірук В.О., Бартошинська Є.С. Сапропеліти Львівсько-Волинського басейну. – Київ: Наукова думка, 1971. – 137 с.
4. Сидорович Я.Й. та ін. Дослідження процесу термічної деструкції сапропелітових сланців Львівсько-Волинського басейну з метою отримання рідких та газоподібних вуглеводнів: звіт про НДР / Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України. – № ДР2403Ф. – Львів, 1997. – 38 с.
5. Аронов С.Г., Скляр М.Г. Изучение методов химической переработки сапропелитов Львовско-Волинского бассейна: отчет о НИР / УХИН. – Харьков, 1991. – 282 с.
6. Гвоздевич О.В., Брык Д.В., Кухар Я.З., Бутин А.З. А.с. СССР № 1506113, МКИ С10J 5/00. Стенд для моделирования процесса подземной газификации угля. // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 33. – С. 3.
7. Чекалюк Э.Б. Основы пьезометрии нефти и газа. – К.: Гостоптехиздат, 1981. – 292 с.
8. Чекалюк Э.Б., Стефаник Ю.В., Брык Д.В. А.с. СССР № 1460072, МКИ С 10В 49/02, С10J3/14. Способ переработки высокозольного топлива. // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 7. – С. 3.
9. Менковский М.А. Химическая технология угля. – М.: Углетехиздат, 1953. – 46 с.
10. Groggins P.H. Procesy jednostkowe w syntezie organicznej. – Warszawa: Wyd. Naukowo-tech., 1966. – S. 606-609.
11. Брык Д.В., Гавенко В.А., Иванчишин О.П. и др. Характеристика смолы газификации сапропелитового угля Львовско-Волинского бассейна // Химия твердого топлива. – 1986. – № 5. – С. 63-68.
12. Брык Д.В., Гавенко В.А., Куречко Н.И. др. Исследование легких фракций смолы водовоздушной газификации сапропелитового

угля // Деп. ВИНТИИ – 1987. № 894. – В 87. – С. 11.

**13. Брик Д.В.** Смола продукт газификации твердых горючих ископаемых как сырье для химической технологии // Сб. науч. тр. Геология и геотехнология энергетических ресурсов Украины. – 1988. – С. 121-127.

**14. Брик Д.В.** Характеристика смолы, отриманої при моделюванні процесу підземної газифікації вугілля // Углехимический журнал. – 2005. – № 5-6. – С. 45-49.

Рукопис поступив в редакцію 02.02.2010