

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«Харківський політехнічний інститут»

Мірошніченко Д.В., Головка М.Б.

**ВПЛИВ ЕЛЕМЕНТНОГО ТА ПЕТРОГРАФІЧНОГО СКЛАДІВ ВУГІЛЛЯ
І ШИХТ НА ВИХІД ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ**

Монографія

*Рекомендовано Вченою радою
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»*

Харків 2020

УДК 662.749.2

М 64

Рецензенти:

С.В. Пиш'єв, доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології переробки нафти та газу НУ «Львівська політехніка»

Ф.Ф. Чешко, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, вчений секретар Державного підприємства «Український державний науково-дослідний вуглекислотний інститут (УХІН)»

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ»

(протокол № 4 від .03.07.2020 р.)

Мірошниченко Д.В., Головка М.Б.

Вплив елементного та петрографічного складів вугілля і шихт на вихід основних продуктів коксування: монографія / Мірошниченко Д.В., Головка М.Б. – Х : НТУ «ХПІ», 2020. – 115 с.

ISBN

У монографії наведено результати виконання комплексного дослідження впливу елементного та петрографічного складів вугілля і вугільних шихт на вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування.

ISBN

УДК 662.614.2

© Д.В. Мірошниченко, М.Б. Головка 2020 р.

© ТОВ «Планета–Прінт»

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИХОДУ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ	7
1.1 Сучасний стан прогнозування виходу основних продуктів коксування	7
1.2 Вплив елементного і петрографічного складів вугілля на вихід основних продуктів коксування	14
Висновки за розділом 1	28
РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВИХОДУ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ	29
Висновки за розділом 2	44
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕМЕНТНОГО І ПЕТРОГРАФІЧНОГО СКЛАДІВ ВУГІЛЛЯ (ШИХТИ) З ВИХОДОМ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ	45
3.1 Дослідження залежності між показниками петрографічного аналізу вугілля і виходом основних продуктів коксування	45
3.2 Теоретичне обґрунтування впливу елементного складу, структурних параметрів і петрографічних характеристик вугілля України, Росії та США на вихід основних продуктів коксування	49
3.3 Розробка математичних моделей прогнозу виходу основних продуктів коксування згідно даних петрографічного аналізу вугілля України, Росії та США	60
3.4 Апробація розроблених математичних моделей прогнозу виходу основних продуктів коксування на міжбасейнових шихтах	69
Висновки за розділом 3	75

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ПЕТРОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ ВУГІЛЛЯ І ШИХТ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИХОДУ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ	76
4.1 Оцінка технологічних властивостей і петрографічних характеристик виробничих шихт і виходу основних продуктів коксування	76
4.2 Розробка коефіцієнтів перерахунку виходу основних продуктів коксування від лабораторних значень до промислових	82
4.3 Порівняльний аналіз прогнозу виходу основних продуктів коксування за даними петрографічного аналізу і виходу летких речовин	84
Висновки за розділом 4	86
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88
ДОДАТОК І. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВИХОДУ КОКСУ ТА ОСНОВНИХ ХІМІЧНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ В УМОВАХ ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС»	100

ВСТУП

Вихід і якість основних видів коксохімічної продукції є одними з найважливіших факторів, що визначають техніко-економічні показники роботи коксохімічного виробництва. Аналіз літературних джерел показав, що розробці методів прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, починаючи з 30-х років минулого століття по теперішній час, приділяється велика увага [1–29].

Останнім часом прогноз виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування ускладнився внаслідок істотних змін складів вугільних шихт, що обумовлено все більшою участю в сировинній базі коксохімічних підприємств України імпортного вугілля. Більшість вугілля, що завозиться в Україну, неоднорідне за петрографічним складом, внаслідок чого відрізняється від донецького вугілля технологічними властивостями, елементним складом і особливостями поведінки під час коксування.

Зазначене вище підтверджується даними робіт [30, 31], в яких показано збільшення частки імпортного вугілля в шихті для коксування коксохімічних підприємств України в період з 1980 по 2018 р.р. (з 1980 по 1991 р.р. – завезення з республік, що входять до складу СРСР) (табл 1).

Таблиця 1 – Динаміка зміни вмісту імпортного вугілля в шихті для коксування заводів України

Роки	Частка імпортного вугілля в шихті, %
До 1970	–
1980	15,0
1990	11,5
2000	15,1
2010	29,8
2015	60,3
2018	82,0

Наведені дані свідчать, що до 70-х років минулого століття в шихті для коксування взагалі було відсутнє імпортоване вугілля, в той час як починаючи з 80-х років, його частка постійно нарощується і досягла у 2018 році 82,0 %.

З огляду на викладене, вважаємо за доцільне більш глибоко вивчити особливості виходу основних продуктів коксування з вугілля різних родовищ, що має різний елементний і петрографічний склад.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИХОДУ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ

1.1 Сучасний стан прогнозування виходу основних продуктів коксування

Планування виробництва основних видів продукції на коксохімічних підприємствах України здійснюється відповідно до Методичних рекомендацій, розроблених ДП «УХІН» і затверджених Радою директорів УНПА «Укркокс» 24 травня 2002 року [21].

В основу зазначених методичних рекомендацій закладений принцип прогнозу виходу основних продуктів коксування на основі отриманих раніше даних. Як параметр, що застосовується в прогнозних рівняннях, використано показник виходу летких речовин з шихти.

Відповідно до Методичних рекомендацій при невизначеній сировинній базі коксування (обмежених даних щодо марочного та басейнового складів шихти) вихід сухого валового коксу B_k^d з шихти визначається за формулою:

$$B_k^d = 94,84 - 0,635V_{uu}^d, \quad (1.1)$$

для батарей з пічами висотою 7,0 м:

$$B_k^d = 48,6 + 0,418 \frac{100 - V_{uu}^d}{100 - V_k^d} 100, \quad (1.2)$$

для батарей с пічами висотою до 6,0 м включно:

$$B_k^d = 47,1 + 0,421 \frac{100 - V_{uu}^d}{100 - V_k^d} 100, \quad (1.3)$$

де $V_{ш}^d$ – вихід летких речовин з шихти на суху масу, %;

V_k^d – вихід летких речовин з коксу на суху масу, %.

Необхідно відзначити, що існує ще досить велика кількість розрахункових формул, які дозволяють з тією чи іншою вірогідністю прогнозувати вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з вугілля та вугільних шихт за показником виходу летких речовин.

В роботах [17–19] наведені квадратичні залежності виходу коксу від виходу летких речовин з шихти, які розроблені на основі даних, отриманих в лабораторних і заводських умовах. На думку авторів, квадратична форма рівняння краще враховує вторинні процеси піролізу парогазових продуктів при коксуванні вугільних шихт:

для батареї №1-біс КХВ ПАТ «МК «Азовсталь»:

$$B_{\kappa}^d = \frac{100 - V_{ш}^d}{100 - V_k^d} 100 - 0,004(V_{ш}^d)^2 + 0,27V_{ш}^d - 1,14 \quad (1.4)$$

для батареї №6 КХВ ПАТ «МК «Азовсталь»:

$$B_{\kappa}^d = \frac{100 - V_{ш}^d}{100 - V_k^d} 100 - 0,004(V_{ш}^d)^2 + 0,26V_{ш}^d - 1,16 \quad (1.5)$$

для батареї №5 ПАТ «АКХЗ»:

$$B_{\kappa}^d = \frac{100 - V_{ш}^d}{100 - V_k^d} 100 - 0,002(V_{ш}^d)^2 + 0,13V_{ш}^d - 0,57 \quad (1.6)$$

Крім того, розроблено ряд рівнянь, в яких в якості додаткових параметрів присутні кінцева температура коксування, температура в контрольних вертикалах тощо.

За уточненою формулою ДП «УХІН», з урахуванням температури обігріву і кінцевої температури в центрі коксового пирогу [20, 21]:

$$B_{\kappa}^d = 94,48 - 0,02 \cdot (t_{\kappa} - 0,8 \cdot t_{об}) - 0,698 \cdot V_{\text{ш}}^d, \quad (1.7)$$

де t_{κ} – кінцева температура коксування по осі коксового пирогу, °С;

$t_{об}$ – середня температура на машинній і коксовій сторонах (м.с., к.с.) по контрольним вертикалам, °С;

За японською формулою [23]:

$$B_{\kappa}^d = 103,19 - 0,75 \cdot V_{\text{ш}}^d - 0,0067 \cdot t_{\kappa} \quad (1.8)$$

Вихід смоли $B_{см}$ та сирого бензолу $B_{б}$ визначають за формулами С.Г. Аронова та Р.Л. Мішуловича [28]:

$$B_{см} = -18,36 + 1,53V^{daf} - 0,0236(V^{daf})^2, \quad (1.9)$$

$$B_{б} = -1,61 + 0,144V^{daf} - 0,0016(V^{daf})^2. \quad (1.10)$$

Ці рівняння, отримані в середині минулого століття, знаходять застосування і зараз, хоча відбулися істотні зміни, що стосуються умов коксування і властивостей шихти, в результаті чого спостерігається розбіжність між експериментальними і прогнозними значеннями.

В даний час планування виробництва смоли та бензолу, а також коксового газу на коксохімічних підприємствах України здійснюється за такими формулами [22]:

для батарей з пічами висотою 7,0 м:

$$B_{cm} = 7,69 - 0,52V_{uu}^d + 0,0135(V_{uu}^d)^2, \quad (1.11)$$

$$B_{\bar{o}} = -1,74 + 0,138V_{uu}^d + 0,0016(V_{uu}^d)^2, \quad (1.12)$$

$$B_z = 3,93\sqrt{V_{uu}^d} - 6,90, \quad (1.13)$$

для батарей з пічами висотою до 6,0 м включно:

$$B_{cm} = 8,23 - 0,55V_{uu}^d + 0,0144(V_{uu}^d)^2, \quad (1.14)$$

$$B_{\bar{o}} = 2,91 - 0,199V_{uu}^d + 0,0044(V_{uu}^d)^2, \quad (1.15)$$

$$B_z = 2,80\sqrt{V_{uu}^d}. \quad (1.16)$$

За даними робіт [17–19]:

для батареї №1-біс КХВ ПАТ «МК «Азовсталь»:

$$B_{cm} = 7,69 - 0,52V_{uu}^d + 0,0135(V_{uu}^d)^2, \quad (1.17)$$

$$B_{\bar{o}} = 3,58 - 0,22V_{uu}^d + 0,00505(V_{uu}^d)^2, \quad (1.18)$$

$$B_z = 4,54 \cdot \sqrt{V_{uu}^d} - 7,9, \quad (1.19)$$

для батареї №6 КХВ ПАТ «МК «Азовсталь»:

$$B_{cm} = 7,33 - 0,49V_{uu}^d + 0,0128(V_{uu}^d)^2, \quad (1.20)$$

$$B_{\bar{o}} = 2,54 - 0,155V_{uu}^d + 0,0036(V_{uu}^d)^2, \quad (1.21)$$

$$B_z = 4,27 \cdot \sqrt{V_{uu}^d} - 7,43, \quad (1.22)$$

для батареї №5 ПАТ «АКХЗ»:

$$B_{cm} = 8,23 - 0,55V_{uu}^d + 0,0144(V_{uu}^d)^2, \quad (1.23)$$

$$B_{\bar{o}} = 3,83 - 0,23V_{uu}^d + 0,0054(V_{uu}^d)^2, \quad (1.24)$$

$$B_z = 4,88 \cdot \sqrt{V_{uu}^d} - 8,45. \quad (1.25)$$

Для зіставлення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування (смоли, бензолу, прямого коксового газу), розрахованих за наведеними вище рівняннями, обрані наступні значення якості шихти, коксу і технологічних параметрів:

- вихід летких речовин з шихти на суху масу $V_{uu}^d = 26,0-30,0$ %;
- зольність шихти $A^d = 8,4$ %;
- вихід летких речовин з коксу на суху масу $V_k^d = 1,0$ %;
- кінцева температура коксування по осі коксового пирога $t_k = 1050$ °С;
- середня температура в контрольних вертикалах $t_{\bar{o}\bar{o}} = 1300$ °С;

У табл. 1.1 наведені розрахункові значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, отримані для вугільних шихт, що характеризуються вмістом летких речовин V_{uu}^d від 26,0 до 30,0 %.

Таблиця 1.1 – Розрахункові значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування

№ рівняння	Вихід летких речовин з шихти V^d , %				
	1	2	3	4	5
	26,0	27,0	28,0	29,0	30,0
1	2	3	4	5	6
Вихід коксу, B^d_k , %					
(1.1)	78,33	77,70	77,06	76,43	75,79
(1.2)	79,84	79,42	79,00	78,58	78,16
(1.3)	78,57	78,14	77,72	77,29	76,87
(1.7)	76,13	75,43	74,74	74,04	73,34
(1.8)	76,66	75,91	75,16	74,41	73,66
(1.4)	77,92	76,97	76,01	75,04	74,07
(1.5)	77,64	76,68	75,71	74,73	73,75
(1.6)	76,21	75,22	74,23	73,24	72,24
min	76,13	75,22	74,23	73,24	72,24
max	79,84	79,42	79,00	78,58	78,16
Δ^1	3,71	4,20	4,77	5,34	5,92
Вихід смоли, $B^d_{см}$, %					
	1	2	3	4	5
(1.9)	5,47	5,75	5,98	6,16	6,30
(1.11), (1.17)	2,96	3,09	3,23	3,40	3,59
(1.20)	2,92	3,04	3,18	3,35	3,53
(1.14), (1.23)	3,30	3,44	3,60	3,78	3,99
min	2,92	3,04	3,18	3,35	3,53
max	5,47	5,75	5,98	6,16	6,30
Δ	2,55	2,70	2,80	2,82	2,77

¹ Δ =max-min

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6
Вихід сирогобензолу, B_{cb}^d , %					
(1.10)	1,05	1,11	1,17	1,22	1,27
(1.12)	0,64	0,69	0,75	0,80	0,84
(1.15)	0,67	0,68	0,70	0,73	0,76
(1.18)	1,20	1,23	1,26	1,30	1,35
(1.21)	0,89	0,91	0,93	0,96	1,00
(1.24)	1,44	1,47	1,51	1,56	1,62
min	0,64	0,68	0,70	0,73	0,76
max	1,44	1,47	1,51	1,56	1,62
Δ	0,80	0,79	0,81	0,83	0,85
Вихід газу, B_g^d , %					
(1.13)	13,14	13,52	13,90	14,26	14,63
(1.16)	14,28	14,55	14,82	15,08	15,34
(1.19)	15,25	15,69	16,12	16,55	16,97
(1.22)	14,34	14,76	15,16	15,56	15,96
(1.25)	16,43	16,91	17,37	17,83	18,28
min	13,14	13,52	13,90	14,26	14,63
max	16,43	16,91	17,37	17,83	18,28
Δ	3,29	3,39	3,48	3,57	3,65

Аналізуючи дані таблиці 1.1, слід зазначити, що різниця між максимальними та мінімальними значеннями виходу коксу при виході летких речовин V_{ui}^d в інтервалі від 26,0 до 30,0 % коливається від 3,71 до 5,92 %, виходу смоли від 2,55 до 2,82 %, виходу сирого бензолу від 0,80 до 0,85 %, виходу прямого коксового газу від 3,29 до 3,65 %.

Такі розбіжності в значеннях виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, розрахованих за різними формулами, є наслідком використання для розробки розглянутих формул даних, отриманих для різної сировинної бази коксування, умов підготовки та коксування вугільних шихт.

В даний час сировинна база коксування українських коксохімічних заводів різко змінилася в частині збільшення використання в ній імпортного [32], в тому числі, петрографічно неоднорідного вугілля, з урахуванням чого розроблені раніше математичні залежності прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування є не завжди адекватними.

1.2 Вплив елементного і петрографічного складів вугілля на вихід основних продуктів коксування

В роботі [33] показано, що деяке кузнецьке вугілля, що має однаковий вихід летких речовин, але різний петрографічний склад, утворює різну кількість коксу і основних хімічних продуктів коксування і, навпаки, при близькому виході коксу і основних хімічних продуктів коксування, деяке вугілля має різний вихід летких речовин.

В роботі [34] наведені результати дослідження бінарних сумішей з різною участю вугілля ш. «Ім. Скочинського» (марка «Ж») та ш. «Червоноармійська Західна № 1» (марка «К»). Компонентний склад, технологічні властивості та петрографічні характеристики досліджених бінарних сумішей наведені у табл. 1.2, 1.3, а в табл. 1.4 наведено вихід з них коксу і основних хімічних продуктів коксування.

Таблиця 1.2 – Компонентний складі технологічних властивості досліджених вугільних сумішей

Варіант шихти	Склад шихти, %		Технічний аналіз, %			Товщина пластичного шару, мм <i>y</i>
	ш. ім. Скочинського	ш. «Червоно-армійська Західна №1»	A^d	S_t^d	V^{daf}	
1	100	0	8,3	1,12	32,0	19
2	70	30	8,4	1,03	31,0	17
3	50	50	8,5	0,98	30,3	16
4	30	70	8,6	0,92	29,6	15
5	0	100	8,7	0,83	28,5	14

Таблиця 1.3 – Петрографічна характеристика досліджених вугільних сумішей

Варіант шихти	Середній показник відбиття вітриніту, %	Петрографічний склад (без мінеральних домішок), %					Стадія метаморфізму вітриніту, %		
	R_o	Vt	Sv	I	L	ΣOK	0,65–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39
1	1,04	87	0	11	2	11	3	95	2
2	1,06	87	0	11	2	11	2	91	7
3	1,08	87	0	11	2	11	2	88	10
4	1,10	87	0	11	2	11	2	85	13
5	1,12	87	0	11	2	11	1	81	18

Таблиця 1.4 – Вихід основних продуктів коксування з вугільних сумішей

Варіант шихти	Вихід основних продуктів коксування (d), %		
	кокс	смола	сирий бензол
1	74,40	4,30	1,36
2	75,00	4,11	1,31
3	75,50	3,93	1,29
4	76,00	3,90	1,24
5	76,70	3,88	1,20

Результати дослідження доводять, що збільшення виходу коксу з одночасним зниженням виходу смоли і сирого бензолу відбувається внаслідок зменшення виходу летких речовин, обумовленого зниженням вмісту у вугільній суміші складових вітриніту, відповідних стадіям метаморфізму вітриніту від 0,65 до 0,89 %, при одночасному збільшенні частки вітриніту, що характеризується значенням від 1,20 до 1,39 %, який має знижений вихід летких речовин порівняно з менш метаморфізованими складовими.

Виконано дослідження з визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування з українського та імпорного вугілля, що має близький

вихід летких речовин, але розрізняється за вмістом суми фюзенізованих компонентів ΣOK (табл. 1.5). Внаслідок того, що вихідне вугілля розрізняється за величиною зольності, вихід коксу розраховано як на сухий, так і на сухий знезолений стан¹.

Таблиця 1.5 – Вплив вмісту фюзенізованих компонентів вдослідженому вугіллі на вихід основних продуктів коксування

Найменування	Технічний аналіз, %		Сума фюзенізованих компонентів, %	Вихід основних продуктів коксування, %			
	A^d	V^{daf}	ΣOK	Кокс ²	Смола	Сирий бензол	Газ
Шахта «Ювілейна» (Україна)	8,2	39,5	32	$\frac{68,11}{65,26}$	$\frac{5,84}{6,36}$	$\frac{1,44}{1,57}$	$\frac{16,90}{18,41}$
Шахта «Новодонецька» (Україна)	11,1	39,8	4	$\frac{67,23}{63,14}$	$\frac{6,31}{7,10}$	$\frac{1,72}{1,93}$	$\frac{14,99}{16,86}$
Розріз «Кедровський» (Росія)	6,5	24,6	78	$\frac{80,66}{79,32}$	$\frac{1,80}{1,93}$	$\frac{0,70}{0,75}$	$\frac{11,26}{12,04}$
Wolverine (Канада)	8,4	24,4	39	$\frac{79,42}{77,53}$	$\frac{3,25}{3,55}$	$\frac{0,83}{0,91}$	$\frac{11,14}{12,16}$
Розріз «Кедровський» (Росія)	5,1	22,2	83	$\frac{82,43}{81,49}$	$\frac{1,77}{1,87}$	$\frac{0,60}{0,63}$	$\frac{11,45}{12,07}$
Малі розрізи Нерюнґрі(Росія)	13,3	22,9	1	$\frac{81,86}{79,08}$	$\frac{2,30}{2,65}$	$\frac{0,68}{0,78}$	$\frac{9,70}{11,19}$

Можна констатувати, що вміст фюзенізованих компонентів у вугіллі істотно впливає на вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування.

Більший вміст фюзенізованих компонентів при одному рівні виходу летких речовин у вугіллі призводить до збільшення виходу коксу і газу з одночасним зниженням виходу смоли і бензолу. Необхідно відзначити, що чим

¹Перерахунок виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування на сухийзнезолений стан наведено у розділі 2

²В чисельнику– на сухий стан (d), в знаменнику – на сухий знезолений стан (daf)

більша різниця у вмісті суми фюзенізованих компонентів у вугіллі з рівним вмістом летких речовин, тим більш різко відрізняється вихід отриманого з них коксу.

Так, при виході летких речовин на рівні 39,5–39,8 % (вугілля шахт «Ювілейна» і «Новодонецька»), вихід коксу і газу на сухий і сухий знезолений стан вище на 0,88 % (2,12 %) і 1,91% (1,55 %) з того вугілля, в якому сума фюзенізованих компонентів більше на 28 %. Одночасно вихід смоли і бензолу відповідно нижче на 0,47 % (0,74 %) і 0,28 % (0,36 %) з вугілля з великим вмістом фюзенізованих компонентів (ш. «Ювілейна»).

До теперішнього часу накопичено великий матеріал, який доводить, що різні мікрокомпоненти по різному впливають на ті чи інші властивості вугілля [35–37]. На рис. 1.1 наведені графічні залежності впливу петрографічних характеристик на деякі хіміко-технологічні параметри вугілля.

Наведені графічні залежності доводять, що зі збільшенням ступеня метаморфізму вугілля, що виражене середнім довільним показником відбиття вітриніту, відбувається зниження з різною швидкістю виходу летких речовин і теплоти згоряння для різних мацералів, а збільшення вмісту фюзенізованих компонентів при одній стадії метаморфізму значно знижує товщину пластичного шару вугілля.

Однією з причин того, що петрографічні компоненти вугілля характеризуються різними технологічними властивостями, є відмінність їх елементного складу [38].

Так, у вугіллі найбільша кількість вуглецю міститься в інертиніті, а у вітриніті і ліптиніті його вміст помітно нижче. З підвищенням ступеня метаморфізму вміст вуглецю збільшується в усіх мікрокомпонентах, але неоднаково. Більш різко він підвищується в вітриніті, а менш – в інертиніті. Зі збільшенням ступеню зрілості вміст вуглецю в вітриніті і інертиніті все більш зближується, але навіть в антрацитах він не збігається.

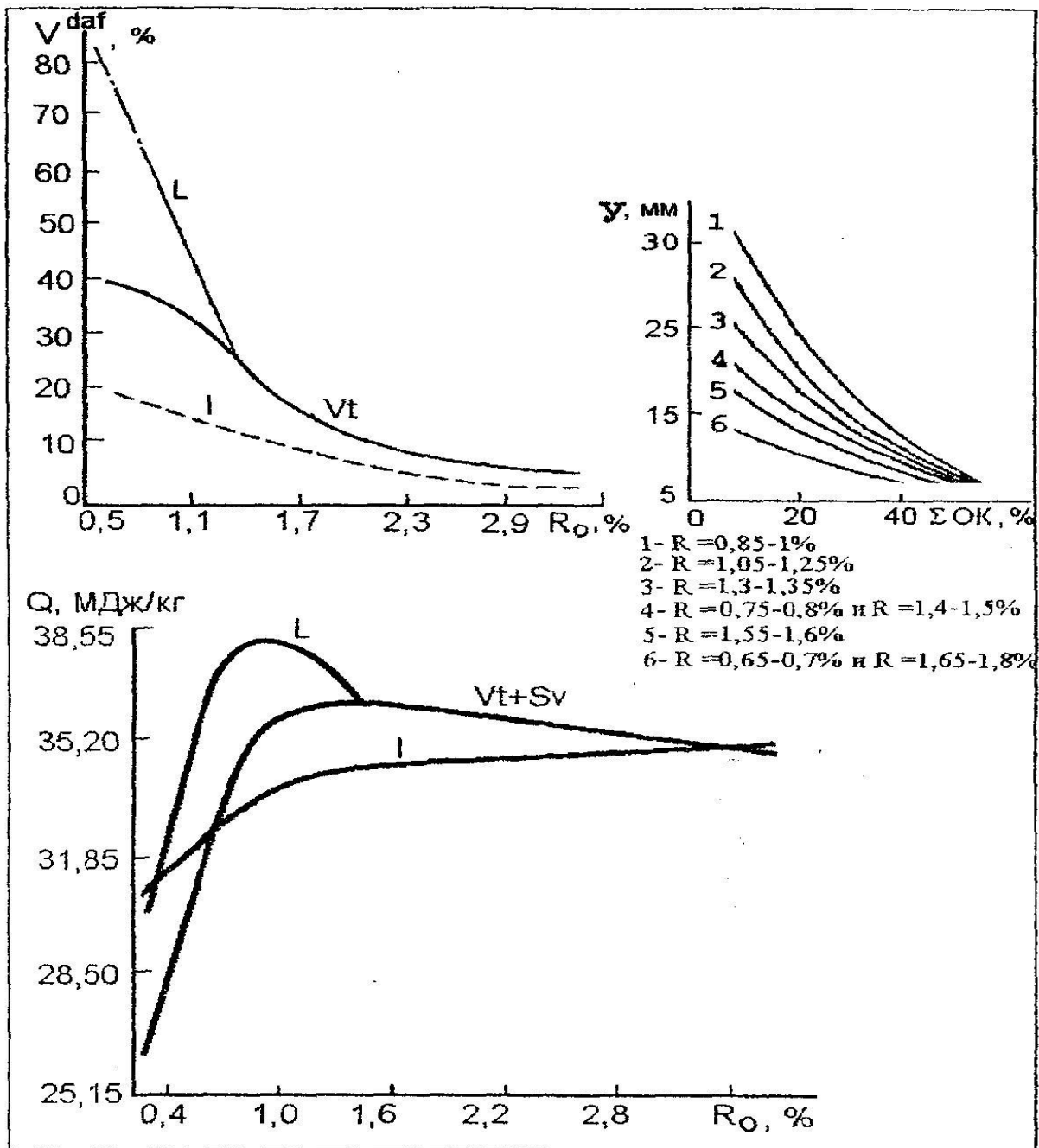


Рис. 1.1 – Особливості впливу петрографічних характеристик на деякі хіміко-технологічні параметри вугілля

Найбільша кількість водню в одному і тому ж вугіллі міститься в ліптиніті, а найменше – в інертиніті. З підвищенням ступеня хімічної зрілості вугілля вміст водню зменшується більш різко для ліптиніту і менш різко для інертиніту. За кількістю водню в одному і тому ж вугіллі вітриніт займає проміжне положення між ліптинітом і інертинітом. Найбільша кількість кисню в одному і тому ж вугіллі містить вітриніт, а найменше – ліптиніт. З

підвищенням ступеня зрілості вугілля вміст кисню зменшується у всіх мікрокомпонентах. У ліптиніті він змінюється незначно. Найбільш помітно зменшується кількість кисню у вітриніті.

Графічне зображення зазначеного вище представлено на рис. 1.2. Таким чином, вміст в органічній масі кам'яного вугілля вуглецю, водню і кисню кількісно пов'язано зі співвідношенням в ньому трьох основних груп мацералів.

Автори роботи [39] наводять порівняльний аналіз складу і властивостей ліптиніту, вітриніту і інертиніту (табл. 1.6).

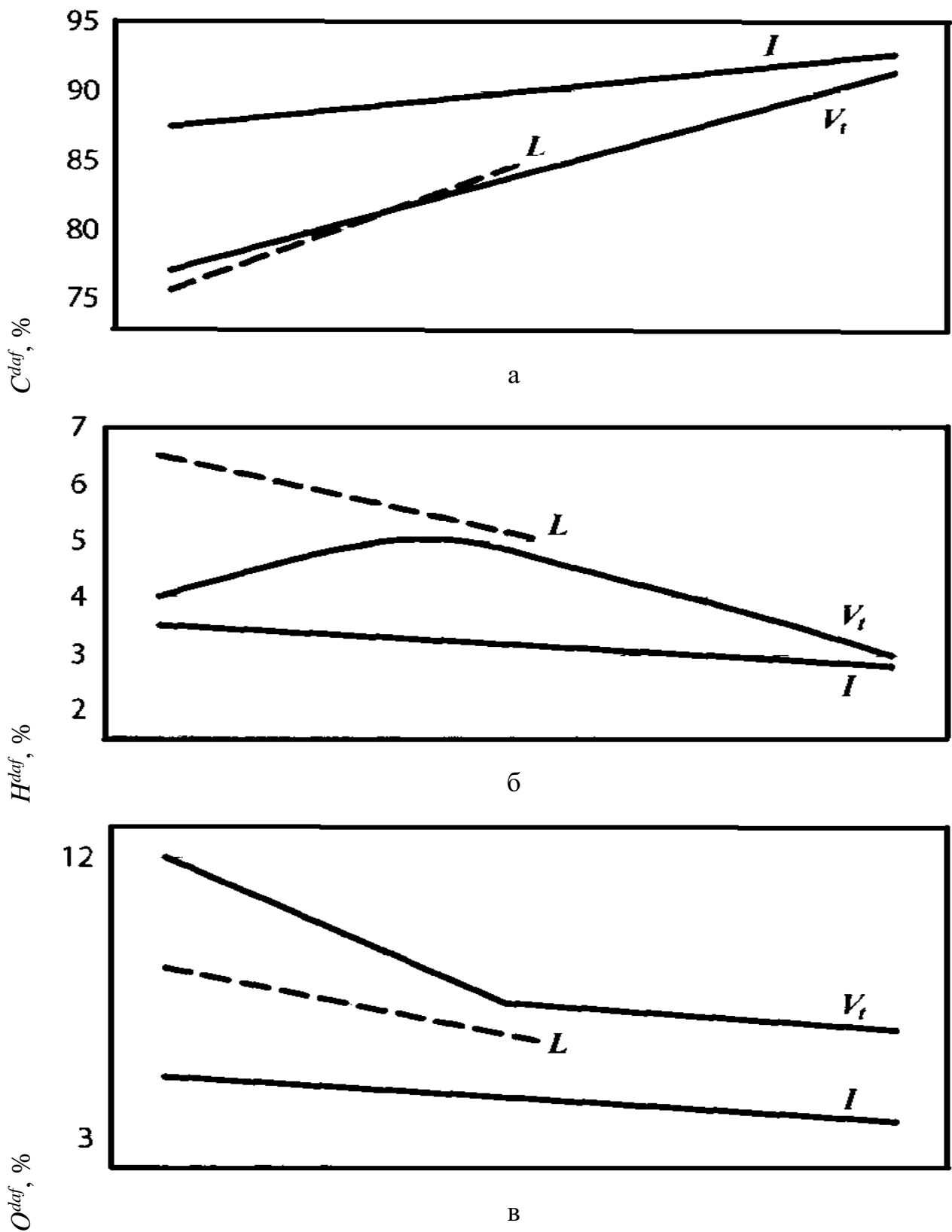
Таблиця 1.6 – Характеристика досліджуваних мікрокомпонентів

Мікрокомпонент	Технічний аналіз, %			Елементний склад (<i>daf</i>), %					
	W^a	A^d	V^{daf}	C	H	O	N	S	H/C
Вітриніт	1,7	3,6	35,2	83,9	5,5	8,0	1,4	1,2	0,780
Інертиніт	1,4	7,3	22,9	85,7	3,9	8,0	1,2	1,2	0,542
Ліптиніт	1,3	0,8	66,7	84,1	7,0	6,3	1,3	1,3	0,991

Для мікрокомпонентів за допомогою інфрачервоних спектрів було розраховано розподіл різних форм водню та отримано наступні дані (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Розподіл водню за формами

Мікрокомпонент	H	H_{al}	H_{ap}	H_{OH}	H_{al}/H	H_{ap}/H
Вітриніт	5,5	3,3	1,9	0,3	0,60	0,35
Інертиніт	3,9	1,7	2,0	0,2	0,44	0,51
Ліптиніт	7,0	5,4	1,4	0,2	0,77	0,20



Більш зріле кам'яне вугілля →

Рис. 1.2 – Залежність вмісту вуглецю (а), водню (б) і кисню (в) в мацералах від ступеня метаморфізму вугілля

Можна побачити, що ліптиніт в порівнянні з іншими мікрокомпонентами характеризується найбільш високим вмістом водню, який входить до складу головним чином бічних ланцюгів і радикалів. У інертиніті, навпаки, велика частина водню пов'язана безпосередньо з ароматичним ядром.

Цікаві результати дослідження методом парамагнітного резонансу петрографічних компонентів газового вугілля отримані у роботі [40]. Згідно з ними (табл. 1.8) інертиніт характеризується найвищою концентрацією парамагнітних центрів, що за уявленнями [41], відповідає найбільш розвиненій ядерній частини з характерною для неї системою сполучених вуглець-вуглецевих зв'язків.

Таблиця 1.8 – Концентрація парамагнітних центрів в різних мікрокомпонентах газового вугілля, центрів/г·10¹⁸

Мікрокомпонент	Концентрація парамагнітних центрів, центрів/г·10 ¹⁸
Вітриніт	6,4
Інертиніт	34,2
Ліптиніт	2,9

З огляду на той факт, що за даними [38] подвійні і потрійні вуглець-вуглецеві зв'язки є одними з найбільш міцних в органічній масі вугілля (табл. 1.9), можна зробити висновок про те, що їх зростання призведе до збільшення виходу коксу і зниження виходу хімічних продуктів коксування і, навпаки, зниження їх кількості призведе до збільшення виходу хімічних продуктів коксування.

Таблиця 1.9 – Середні значення енергії розриву вуглець-вуглецевих зв'язків, (кДж/моль)

Зв'язок	Енергія розриву зв'язку
C–C	346,1
C=C	610,9
C≡C	836,3

При термічній деструкції різних мікрокомпонентів відщеплюються продукти неоднакового складу за вмістом C , H і O (табл. 1.10) і, отже, утворюється різна кількість хімічних продуктів коксування [42].

Таблиця 1.10 – Елементний склад відщеплених продуктів напівкоксування петрографічних мікрокомпонентів

Петрографічний компонент	Відщепилося при нагріванні до 550 °С, % від початкового вмісту			$\frac{C^{daf}}{O^{daf}}$	Співвідношення атомів, які відщеплюються $O^{daf}/C^{daf}/H^{daf}$	Відносний ступінь конденсації C/H
	C^{daf}	H^{daf}	O^{daf}			
Вітриніт	12,8	3,19	7,67	1,67	1:2:6	1,29
Інертиніт	4,94	1,60	3,44	1,44	1:2:8	2,01
Споровий концентрат	36,80	5,80	4,29	8,58	1:11:22	0,95
Смоляні тільця	77,27	10,85	2,91	25,80	1:30:60	-

Дані таблиці 1.10 свідчать, що найбільша втрата маси при нагріванні без доступу повітря спостерігається у смоляних тілцях, яка доходить до 91 % від органічної маси вугілля. Навпаки, інертиніт втрачає всього лише 9,98 % органічної маси. З огляду на вищевикладене, стає зрозумілим, що формування виходу коксу багато в чому залежить від вмісту інертиніту в органічній масі вугілля, а хімічних продуктів коксування – від вмісту ліптиніту і вітриніту.

У роботах [42, 43] показано, що з різних петрографічних складових газового вугілля утворюється різна кількість хімічних продуктів коксування (табл. 1.11).

Виходячи з наведених даних, вихід смоли з ліптиніту в 12 разів, а бензолу в 5 разів вище, ніж з інертиніту, що виділяється з одного і того ж вугілля. Вихід смоли і бензолу з вітриніту займає проміжне положення, однак набагато вище, ніж з інертиніта.

Дані таблиці 1.11 свідчать, що з підвищенням вмісту інертиніту у вугіллі можна очікувати помітне зниження виходу смоли і бензолу.

Таблиця 1.11 – Вихід хімічних продуктів коксування концентрату газового вугілля

Петрографічний компонент	Вихід хімічних продуктів коксування, %	
	Смола	Бензол
Ліптиніт	7,56	2,50
Вітриніт	4,69	1,50
Інертиніт	0,63	0,50

Досліджуючи вихід хімічних продуктів коксування з карагандинського вугілля, автор роботи [41] розробив такі математичні залежності:

$$B_k = 68,6 + 8,08R_0 + 0,0627 \sum OK - 0,181L, \quad (1.26)$$

$$B_{cm} = 4,60 - 0,62R_0 - 0,0428 \sum OK + 0,0896L, \quad (1.27)$$

$$B_g = 1,653 - 0,543R_0 - 0,0055 \sum OK + 0,0225L, \quad (1.28)$$

$$B_z = 355,5 - 10,02R_0 - 0,831 \sum OK + 0,935L. \quad (1.29)$$

Збільшення показника відбиття вітриніту вугілля призводить до збільшення виходу коксу і зменшення виходу смоли, бензолу і газу. До такого ж результату призводить і збільшення вмісту в вугіллі суми фюзенізованих компонентів. Зростання вмісту в вугіллі ліптиніту, навпаки, призводить до зменшення виходу коксу і збільшення виходу хімічних продуктів коксування.

В роботі [40] виконано комплексне дослідження з визначення виходу основних хімічних продуктів коксування з різних петрографічних компонентів

(вітриніт, інертиніт, ліптиніт) різної стадії метаморфізму. Результати цього дослідження наведені в табл. 1.12, 1.13.

Таблиця 1.12 – Вихід летких речовин і елементний склад петрографічних мікрокомпонентів вугілля різних марок

Марка вугілля	Петрографічний мікрокомпонент	V^{daf} , %	Елементний склад, %				
			C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^{daf}	O^{daf}
Г	Вітриніт	36,13	83,45	5,06	0,78	0,93	9,78
	Інертиніт	22,54	86,77	3,91	0,55	0,66	8,11
	Ліптиніт	68,77	85,49	7,34	0,46	0,91	5,80
ГЖ	Вітриніт	31,97	85,74	4,88	0,78	0,82	7,78
	Інертиніт	23,37	87,98	4,17	0,56	0,48	6,81
	Ліптиніт	59,81	87,41	6,74	0,64	0,54	4,67
Ж	Вітриніт	28,36	88,36	5,11	0,83	0,97	4,73
	Інертиніт	19,18	89,59	4,34	0,60	0,52	4,95
	Ліптиніт	37,08	89,10	5,96	0,67	0,52	3,75
К	Вітриніт	23,50	88,84	4,94	1,56	0,71	3,95
	Інертиніт	16,98	89,78	4,25	0,92	0,53	4,52
	Ліптиніт	22,57	89,29	4,91	1,45	0,60	3,75

Дані табл. 1.12, 1.13 вказують, що петрографічні складові різної стадії метаморфізму характеризуються різним елементним складом і виходом коксу і основних хімічних продуктів коксування. Вихід коксу зі збільшенням стадії метаморфізму найбільш істотно збільшується для ліптиніту, потім для вітриніту і інертиніту.

Вихід смоли і бензолу з ростом стадії метаморфізму найбільш різко зменшується для ліптиніту. Для вітриніту і інертиніту вихід смоли змінюється незначно. Вихід пірогенетичної води з ростом стадії метаморфізму зменшується для всіх компонентів. Зміна виходу газу найбільш помітно для ліптиніту. Для коксового вугілля вихід газу з ліптиніту стає меншим у порівнянні з виходом його з вітриніту.

Таблиця 1.13 – Вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з петрографічних мікрокомпонентів вугілля різних марок

Марка вугілля	Петрографічний мікрокомпонент	Вихід основних хімічних продуктів коксування, %				
		Кокс	Смола	Бензол	H ₂ O	Газ, нм ³ /т
Г	Вітриніт	69,53	3,62	2,05	7,18	342
	Інертиніт	80,02	1,24	0,98	4,07	333
	Ліптиніт	58,28	7,93	4,17	4,31	473
ГЖ	Вітриніт	73,09	3,49	1,89	5,66	338
	Інертиніт	80,77	2,15	1,07	3,49	315
	Ліптиніт	61,73	6,58	3,60	2,54	434
Ж	Вітриніт	77,42	3,63	1,92	3,10	346
	Інертиніт	82,41	2,31	1,13	1,83	323
	Ліптиніт	74,34	5,46	2,34	1,75	427
К	Вітриніт	79,85	3,68	1,62	1,37	347
	Інертиніт	84,63	2,10	0,99	2,02	293
	Ліптиніт	80,12	3,32	1,68	2,61	327

Виконана статистична обробка [44, 45] даних вибірки, представленої в табл. 1.12, 1.13, метою якої було встановлення взаємозв'язку виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування з даними елементного складу вихідної вугільної сировини. У табл. 1.14 наведені коефіцієнти парної кореляції досліджених зв'язків.

Поряд з даними елементного складу для розрахунку коефіцієнтів парної кореляції використовували також дані щодо виходу летких речовин.

Аналіз отриманих значень коефіцієнтів парної кореляції вказує на те, що показник атомного відношення H_{am}/C_{am} дає більш високі значення розглянутих коефіцієнтів для виходу смоли, бензолу і коксового газу, ніж показник виходу летких речовин. Коефіцієнт парної кореляції між виходом коксу і показником

H_{am}/C_{am} рівний $-0,937$ трохи нижчий, ніж між виходом коксу та виходом летких речовин, де він становить величину, рівну $0,981$.

Таблиця 1.14 – Коефіцієнти парної кореляції досліджених зв'язків

	Кокс	Смола	Бензол	H ₂ O	Газ
V^{daf}	$-0,981$	$0,932$	$0,979$	$0,247$	$0,922$
C^{daf}	$0,638$	$-0,277$	$-0,407$	$-0,932$	$-0,280$
H^{daf}	$-0,902$	$0,997$	$0,985$	$0,027$	$0,949$
O^{daf}	$-0,180$	$-0,250$	$-0,109$	$0,909$	$-0,185$
H_{am}/C_{am}^1	$-0,937$	$0,991$	$0,994$	$0,122$	$0,943$

Вихід пірогенетичної вологи тісно пов'язаний з вмістом вуглецю і кисню. Коефіцієнти парної кореляції рівні $-0,932$ і $0,909$ відповідно. Вихід летких речовин з кількістю пірогенетичної вологи, практично не пов'язаний (коефіцієнт парної кореляції дорівнює $0,247$).

Таким чином, за результатами елементного складу вугілля (шихти) можна прогнозувати вихід практично всіх основних продуктів коксування, включаючи смолу, сирий бензол, газ і пірогенетичну вологу, а також вихід коксу з досить високою точністю.

Авторами [47] виконані дослідження, в ході яких відібрано 13 проб вугільних концентратів, що входять в сировинну базу КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», серед яких шість проб марки «Ж» і сім проб марки «К».

Відібрані проби були досліджені методами технічного та елементного аналізів, крім того було визначено вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування, в результаті чого розроблені математичні рівняння, що описують вихід всіх основних продуктів коксування за даними елементного складу вихідного вугілля. Розроблені математичні рівняння представлені в табл. 1.15.

¹ Атомні відношення [46]

Таблиця 1.15 – Розроблені математичні рівняння

№	Математичне рівняння	Коефіцієнт детермінації ¹ $R^2, \%$	Стандартна помилка, %
1.30	$Kокс^{daf} = 1,007C^{daf} - 4,27H^{daf} - 0,129O_d^{daf} + 5,779$	91,7 (78,2)	0,748
1.31	$Смола = -0,193C^{daf} + 2,019H^{daf} - 0,146O_d^{daf} + 10,02$	85,0 (74,5)	0,286
1.32	$Бензол = -0,072C^{daf} + 0,436H^{daf} - 0,075O_d^{daf} + 5,328$	79,5 (63,4)	0,084
1.33	$C_m H_n = -0,043C^{daf} + 0,265H^{daf} - 0,013O_d^{daf} + 2,813$	89,0 (92,4)	0,038
1.34	$CO_2 = -0,104C^{daf} + 0,284H^{daf} + 0,027O_d^{daf} + 8,05$	92,6 (64,0)	0,071
1.35	$H_2O = -0,189C^{daf} + 0,616H^{daf} + 0,053O_d^{daf} + 16,244$	92,4 (68,2)	0,136
1.36	$Газ = 0,126C^{daf} + 2,875H^{daf} + 0,323O_d^{daf} - 16,03$	46,2 (44,0)	0,711
1.37	$NH_3 = 0,076N^{daf} + 0,13$	44,1 (-)	0,057
1.38	$H_2S = -0,02S_t^d + 0,325$	94,6 (-)	0,068

В цілому, можна відзначити, що в межах компонентного складу вугільної сировинної бази КХВ ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» розроблені математичні рівняння дозволяють за даними елементного складу вихідного вугілля прогнозувати вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з більш високим ступенем точності, ніж за показником виходу летких речовин.

Звертає увагу факт негативного впливу вмісту загальної сірки на вихід сірководню, що не відображає фізичний вміст цього взаємозв'язку, а є лише результатом математичної обробки експериментальних даних.

У цій роботі також відзначено, що прогноз виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування як за даними виходу летких речовин з вугілля (шихти), так і даними петрографічних досліджень, ускладнюється при використанні окисненого вугілля, так як петрографічні характеристики і вихід

¹У дужках представлені коефіцієнти детермінації між вмістом летких речовин і відповідним виходом основних хімічних продуктів коксування

летких речовин при окисненні змінюються значно менше, ніж елементний склад.

У роботах [48, 49] наведено зниження вмісту вуглецю і водню при одночасному збільшенні кисню в органічній масі окисненого вугілля, що призводить до зниження виходу коксу, смоли, сирого бензолу і збільшення виходу вуглекислого газу і пірогенетичної вологи.

Висновки за розділом 1

1. Встановлено, що зростання в сировинній базі коксування українських коксохімічних підприємств вмісту імпортного, у тому числі, петрографічно неоднорідного вугілля, призвів до того, що розроблені раніше математичні залежності для прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за виходом летких речовин не забезпечують необхідної точності прогнозу;

2. Обґрунтовано доцільність використання для прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування даних елементного і/або петрографічного аналізів вугілля (вугільних шихт).

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВИХОДУ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ

Існує декілька лабораторних методів, що дозволяють визначити вихід коксу і основних хімічних продуктів (смоли, сирого бензолу, аміаку, сірководню, діоксиду вуглецю, пірогенетичної вологи і коксового газу) при коксуванні вугілля і шихт:

1. Коксування малих наважок відповідно ГОСТ 18635–73 [50];
2. Коксування у 2-кг лабораторній печі за ГОСТ 9521–74 [51, 52];
3. Коксування у 2-камерній лабораторній печі ДП «УХІН» відповідно до ПГ 401–548–72 [53, 54];
4. Визначення виходу коксу і хімічних продуктів коксування у 5-кг печі конструкції ДП «УХІН» [54];
5. Експериментальна установка для коксування «Карботест» [54, 55].

В роботі [54] наведені апаратурнеоформлення і методика проведення аналізу для кожного з зазначених вище методів. Методи 2 і 3 дозволяють отримувати в лабораторних умовах тільки вихід коксу, а методи 1, 4, 5 – ще й вихід хімічних продуктів коксування. Метод коксування малих наважок у порівнянні з методами 4 і 5 є стандартизованим, комплексним (кількісне визначення виходу основних хімічних продуктів коксування відбувається одночасно з отриманням коксу і визначенням його виходу), оперативним (час проведення становить ~3 години) і компактним (обладнання займає невеликий простір) [56].

З урахуванням викладеного, нами вважалось доцільним використовувати у дослідженні методику визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування в малих наважках.

Стандарт [50] поширюється на кам'яне вугілля і його суміші і встановлює лабораторний метод визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів (смоли, сирого бензолу, аміаку, сірководню, двоокису вуглецю, ненасичених

вуглеводнів, пірогенетичної вологи і коксового газу) при високотемпературному коксуванні вугілля і вугільних сумішей.

Метод заснований на нагріванні 20 г випробуваного вугілля або вугільної суміші крупністю менше 0,2 мм до 900 ± 10 °С в п'ятисекційній або односекційній печі коксування і піролізу продуктів, що утворюються, з подальшим визначенням їх виходу.

Обладнання для визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування (рис. 2.1) складається з: трубчастої електричної односекційної або п'ятисекційної печі коксування 1; трубчастої електричної печі піролізу 2; насадки 3 довжиною 120–130 мм, що складається з чотирьох рядів порцелянових намистин діаметром 6–7 і довжиною 10–12 мм, нанизаних на ніхромовий дріт діаметром 1–1,5 мм; однокрапкової або п'ятикрапкової хромель-алюмелевих термопар 4; трубчастої електричної печі для ватяного фільтра з терморегулятором 5, що забезпечує постійну температуру нагрівання 105 ± 5 °С; термопар 6; водяних манометрів 7; хлоркальцієвих трубок 8; поглинальної склянки для визначення двоокису вуглецю і сірководню 9; поглинальної склянки для поглинання ненасичених вуглеводнів 10; U-подібних трубок з активованим вугіллям для уловлювання бензолу 11; газометра 12, місткістю 10–20 дм³; мірного циліндра 13; поглинальної склянки (з розчином сірчаної кислоти) для аміаку 14; фільтра для вловлювання смоли 15; кварцевої вставки 16, що забезпечує з'єднання на шліфі з реакційної трубкою 17.

Визначення виходу хімічних продуктів коксування в п'ятисекційній печі відбувається наступним чином: в холодну піч коксування через піч для ватяного фільтра і піч піролізу, попередньо нагрітих відповідно до 105 ± 5 і 790 ± 10 °С, вводять реакційну трубку (з поміщеною в неї вугільною наважкою аналітичного подрібнення масою 20 г) з кварцевою вставкою і приєднаним до неї фільтром для вловлювання смоли.

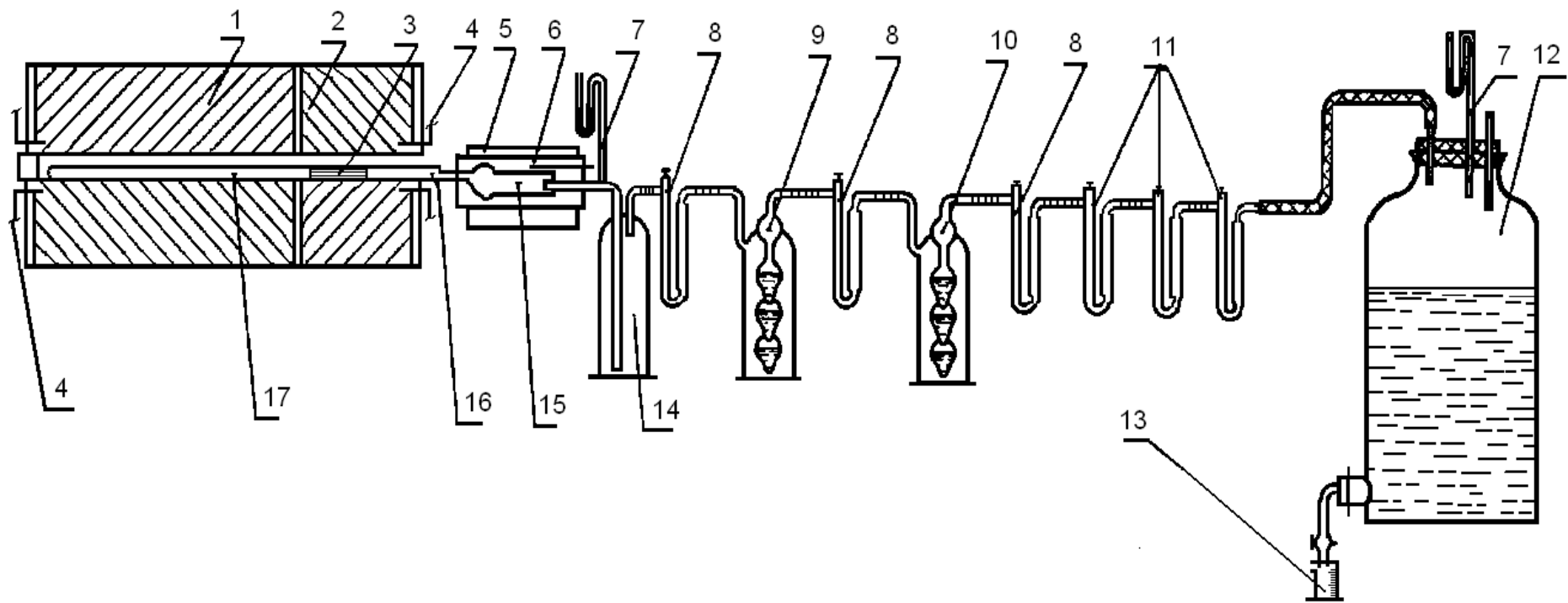


Рис. 2.1 – Обладнання для визначення виходу хімічних продуктів коксування

Після нагріву останньої п'ятої секції печі коксування до 890 ± 10 °C у всіх секціях витримують температуру 890 ± 10 °C, а в печі піролізу 790 ± 10 °C протягом 20 хв, після чого дослідження закінчують і вимикають обігрів печей, температура секцій печі коксування і печі піролізу підтримується автоматично.

Обробка результатів виконується наступним чином:

– вихід коксу визначають за масою коксового залишку в кварцовій трубці;

– вихід смоли визначають за зміною маси вставки і ватяного фільтра;

– вихід аміаку визначають за об'ємом 1 н. розчину їдкого натру, витраченого на титрування поглинаючого розчину;

– вихід загальної вологи визначають за різницею між збільшенням маси поглинача для аміаку і трубки з хлористим кальцієм, що розташовується за ним під час дослідження, і масою аміаку;

– вихід пірогенетичної вологи визначають за різницею між виходом загальної вологи і вмістом вологи в аналітичній пробі вугілля;

– вихід сірководню визначають наступним чином. Лужний розчин з поглинальної склянки переводять в мірну колбу місткістю 250 см^3 , а поглинальну склянку промивають два рази дистильованою водою. Промивні води зливають в ту ж мірну колбу, доводять рівень розчину дистильованою водою до мітки і перемішують. Потім в конічну колбу місткістю 250 см^3 наливають 50 см^3 дистильованої води, 25 см^3 випробуваного розчину і вводять для підкислення розбавлену 1:1 соляну кислоту, кількість якої встановлюють заздалегідь. З бюретки доливають 10 см^3 0,1 н. розчину йоду. Надлишок йоду, який не набув реакцію з сірководнем, титрують 0,1 н. тиосульфатом натрію в присутності крохмалю, який вводять під кінець титрування;

– вихід двоокису вуглецю визначають за різницею між збільшенням маси поглинача для сірководню і двоокису вуглецю і трубки з хлористим кальцієм, що розташовується за ним, і кількістю сірководню, що визначається;

– вихід ненасичених вуглеводнів визначають за збільшенням маси поглинальної склянки з розчином окису ртуті жовтої в сірчаній кислоті і трубки з хлористим кальцієм, що розташовується за нею;

– вихід сирого бензолу визначають за збільшенням маси трьох U-подібних трубок з активованим вугіллям;

– вихід газу, щовиділився в умовах дослідження, визначають за об'ємом розчину, що витік з газометра.

Розглянутий метод є затребуваним [57–59] і постійно вдосконалюється [60–62]. Багаторічна практика коксування на лабораторному обладнанні зумовила перевагу п'ятисекційної (контроль за температурою здійснюється за допомогою п'яти термопар, встановлених в кожній секції нагріву) печі над односекційною (контроль за температурами здійснюється за допомогою однієї термопари). У односекційній печі проба вугілля нагрівається одночасно (повністю), виділення газу відбувається нерівномірно, кількість первинних парогазових продуктів, що утворилися, максимально, що призводить до підвищення швидкості їх руху і зменшення часу знаходження в нагрітих зонах печі, в той час як в п'ятисекційній відбувається поступове (пошарове, послідовне) коксування, що дає можливість газу, що утворився, поступово пройти зону піролізу, в результаті чого підвищується точність визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування.

Зазначені вище обставини обумовлюють підвищені значення виходу смоли і бензолу при коксуванні одного і того ж вугілля і шихт в односекційній печі в порівнянні з п'ятисекційною. У табл. 2.1 наведені дані щодо виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування з індивідуального вугілля різної стадії метаморфізму, отримані в різних конструкціях печі [62].

Підвищений вихід смоли і бензолу обумовлено низьким ступенем піролізу в односекційній печі в порівнянні з даними, отриманими в п'ятисекційній печі.

В роботі [62] також були зіставлені дані, отримані в одно- і п'ятисекційній лабораторній печі з промисловим виходом основних продуктів

коксування. Встановлено, що під час коксування в односекційній печі вихід смоли з усіх шихт вище, ніж в п'ятисекційній, і набагато вище промислового, при цьому коефіцієнт K^I для смоли в п'ятисекційному апараті дорівнює 0,91, а в односекційному 0,77; відповідно для бензолу – 0,96 і 0,78.

Таблиця 2.1 – Результати визначення виходу хімічних продуктів коксування²

Вугілля	Марка	$V^{daf}, \%$	Вихід хімічних продуктів коксування (d), %		
			Смола	Бензол	Кокс
1	2	3	4	5	6
1	Г	41,3	10,46	2,42	63,70
			7,09	2,12	67,40
2	Г	40,2	8,49	2,67	66,72
			6,77	2,02	67,00
3	Г	39,5	7,68	2,45	66,32
			5,87	1,85	67,74
4	Г	39,4	7,82	2,24	67,74
			5,40	1,56	70,60
5	Г	38,0	5,66	2,11	68,33
			4,61	1,70	68,11
6	Г	37,5	5,70	1,54	70,33
			5,47	1,37	70,67
7	Г	37,2	8,33	2,11	67,08
			6,41	1,78	69,25
8	Ж	32,7	5,21	1,33	74,47
			4,77	1,21	74,09
9	Ж	28,6	6,15	1,69	76,06
			5,05	1,30	77,20

¹ K – виробничі дані/лабораторні дані

²Результати аналізу кожної проби: верхній рядок – в односекційному апараті; нижній рядок – в п'ятисекційному апараті

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
10	КЖ	23,2	3,87	1,12	80,10
			3,37	1,06	80,00
11	К	22,2	3,30	1,44	80,78
			3,13	1,08	80,44
12	К	21,3	3,87	1,28	80,70
			3,15	0,87	81,43
13	ПС	19,2	1,47	0,95	81,20
			1,35	0,71	81,63
14	ПС	18,1	1,47	0,54	84,19
			1,12	0,56	83,69

Зазначене вище зумовило використання нами саме п'ятисекційної лабораторної печі.

Варто відзначити, що лабораторні дані, отримані навіть в п'ятисекційній печі, не можуть точно збігатися з промисловими, враховуючи відмінність періодів і кінцевої температури коксування, а також те, що в лабораторних умовах втрати продуктів коксування усунені до мінімуму в порівнянні із заводськими умовами.

Крім того, при близькому складі шихти на різних заводах буде різний вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування, що обумовлено конструктивними особливостями коксових печей, режимом завантаження, обігріву і рядом інших чинників.

Згідно з «Програмою перегляду чинних в Україні міждержавних стандартів (ГОСТ), прийнятих до 1992 року, та приведення їх у відповідність до Угоди про технічні бар'єри в торгівлі Світової організації торгівлі» замість ГОСТ 18635–73 «Угли каменные. Метод определения выхода химических продуктов коксования» розроблено ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходів хімічних продуктів коксування». При розробці

ДСТУ 7689:2015 на підставі проведених досліджень внесені такі доповнення і зміни: Розділ 1 «Сфера застосування». На підставі напрацьованих експериментальних даних табл. 2.2–2.4 змінено діапазон значень виходу (масової частки) хімічних продуктів коксування:

- коксу (на сухий стан, d) від 60 до 90 % замість від 40 до 90 %;
- сирого бензолу від 0,1 до 2,5 % замість від 0,1 до 3,0 %;
- ненасичених вуглеводнів від 0,1 до 1,5 % (впроваджено вперше);
- сірководню від 0,002 до 1,5 % (впроваджено вперше);
- діоксиду вуглецю від 0,1 до 4,0 % (впроваджено вперше).

Таблиця 2.2 – Технологічні властивості і елементний склад досліджених проб українського та імпортного вугілля

Значення	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Елементний склад, %				
	W^a	A^d	S_t^d	V^{daf}	x	y	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O_d^{daf}
Max	5,17	13,3	3,23	42,7	70	31	91,0	6,4	2,8	3,2	9,3
Min	0,40	2,1	0,27	16,8	3	0	81,7	4,1	0,2	0,3	1,3
Δ	4,77	11,2	2,96	25,9	67	31	9,3	2,3	2,6	2,9	8,0

Діапазон значень з виходу коксу обумовлений наступним. Згідно ДСТУ 3472:2015 [63] граничне значення виходу летких речовин (V^{daf}) для вугілля марки «Г» (вугілля з максимальним виходом летких речовин, що використовується для коксування) становить 44,0 %. При підстановці цього значення в формулу¹ для прогнозу виходу коксу [22] при зольності вугілля 8,5 %² отримуємо розрахункове значення виходу коксу рівне 69,3 %, тобто ні практично, ні теоретично вихід коксу не може скласти значення нижче 60 %.

¹ $B^d = 94,84 - 0,635V^d$

² Середня зольність вугільної шихти

Таблиця 2.3 – Петрографічні характеристики досліджених проб українського і імпортного вугілля

Значення	Середній показник відбиття вітриніту, % R_o	Петрографічний склад, %					Стадії метаморфізму вітриніту, %						
		Vt	Sv	I	L	ΣOK	< 0,50	0,50–0,64	0,65–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
Max	1,77	99	4	80	18	83	73	90	98	99	94	96	58
Min	0,58	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Δ	1,19	83	4	80	18	83	73	90	98	99	94	96	58

Таблиця 2.4 – Вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування досліджених проб українського та імпортного вугілля

Значення	Кокс ¹	Смола	C ₆ H ₆	C _m H _n	NH ₃	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Газ
Max	85,44	8,96	1,99	1,2	0,67	0,82	3,1	6,56	17,62
Min	65,76	1,22	0,32	0,11	0,12	0,03	0,18	1,28	8,64
Δ	19,68	7,74	1,67	1,09	0,55	0,79	2,92	5,28	8,98

Діапазон значень виходу сирого бензолу, ненасичених вуглеводнів і діоксиду вуглецю наведені з урахуванням виконаних в ДП «УХІН» досліджень, причому верхня межа встановлена з урахуванням того, що для дослідження використовувалося вугілля не з максимальним виходом летких речовин для марки «Г» (44 %), а рівне 42,7 %.

Розділ 2 «Нормативні посилання». У розділі наведені актуальні нормативні документи, на які є посилання в цьому стандарті.

Розділ 3 «Терміни та визначення». Наведено вперше: «У цьому документі примінено терміни та визначення згідно ГОСТ 17070 и ДСТУ 2401» [64, 65].

Розділ 4 «Суть методу». Наведено в новій редакції: «Метод заснований на нагріванні випробуваного вугілля або вугільної шихти до температури (890±10) °С в п'ятисекційній або односекційній печі коксування і піролізу утворених продуктів з визначенням їх виходу».

Розділ 5 «Апаратура». У цьому розділі наведені характеристики використовуваного обладнання, а саме:

– установка для визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування (без змін конструкції);

– піч трубчаста електрична, в якій можна підтримувати температуру нагріву (890±10) °С, для прожарювання реакційної трубки після випробування.

Температура прожарювання була підвищена у зв'язку з тим, що вказаної раніше температури 800 °С недостатньо для усунення залишків вуглецю на

¹На сухий стан *d*

внутрішній поверхні реакційної кварцової трубки, вставки і фільтра для вловлювання смоли;

– трубки для поглинання бензолу, які раніше використовувалися замінені на стандартизовані – тип ТХ-U-150 згідно ГОСТ 25336 [66].

– газоаналізатор типу ВТІ, а також аналіз газу запропоновано робити газохроматографічним методом;

– бюретки, колби, колби конічні, ексікатор, ваги лабораторні, набір гир відповідно до чинної нормативної документації.

– апаратура для уловлювання легких смоляних погонів виключена через те, що їх кількість не перевищує 0,005 %, тобто вони повністю утримуються на ватяному фільтрі для уловлювання смоли.

Розділ 6 «Реактиви матеріали».

В даному розділі вказані необхідні реактиви і матеріали, а також методики приготування розчинів. Додатково наведені методики встановлення коефіцієнтів поправки до молярної концентрації розчинів натрію тіосульфату ($c [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 5\text{H}_2\text{O}] = 0,1 \text{ моль/дм}^3$) і йоду ($c [1/2 \text{ J}_2] = 0,1 \text{ моль/дм}^3$).

Розділ 7 «Відбір і приготування випробувальних проб». Відбір і підготовка проб проводиться відповідно до ДСТУ 4096–2002 [67]. Крім того, проби вугілля з зольністю більше ніж 10 % збагачуються згідно ГОСТ 1186 [68], однак концентрати вугілля вуглезбагачувальних фабрик, для яких встановлена зольність більш ніж 10 %, аналізують за їх фактичної зольності.

Розділ 8 «Приготування до випробування». Змінено кількість розчину окису ртуті в сірчаній кислоті для уловлювання ненасичених вуглеводнів, з 20 см^3 до 10 см^3 , оскільки на основі експериментальних даних (табл. 2.5) доведено, що цієї кількості розчину достатньо для поглинання з коксового газу ненасичених вуглеводнів, крім того, це заощадить витрати на придбання реактиву.

Таблиця 2.5 – Порівняння виходу (масової частки) ненасичених вуглеводнів при використанні для вловлювання різногооб’єму розчину оксиду ртуті в сірчаній кислоті

Назва проби	Марка	Вихід (масова частка) ненасичених вуглеводнів, %	
		Кількість використовуваного розчину оксиду ртуті в сірчаній кислоті, см ³	
		10	20
ЦЗФ «Селідовська»	Г	0,63	0,62
ш. «ім. Скочинського»	Ж	0,56	0,54
ш/у «Покровське»	К	0,51	0,50
ЦЗФ «Вузлівська»	ПС	0,46	0,46

Розділ 9 «Випробування». Змін і поправок немає.

Розділ 10 «Обробка результатів».

1. Запропоновано розраховувати вихід коксу не тільки на сухий стан B^d , а також і на сухий знезолений стан B^{daf} від сухого знезоленого вугілля (шихти)

$$B^{daf} = \frac{B^d - A^d}{100 - A^d} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де B^d – вихід коксу на сухий стан, %;

A^d – зольність випробуваного вугілля (шихти), %.

Це обумовлюється тим, що некоректно порівнювати вихід коксу з вугілля з різною зольністю, але з близьким виходом летких речовин [69]. У табл. 2.6 наведено приклад впливу зольності вугілля (шихти) на вихід коксу на сухий і сухий знезолений стан.

Аналізуючи дані табл. 2.6, можна констатувати, що при практично однаковому виході летких речовин з вугілля (шихти) в залежності від його

зольності, вихід коксу на сухий стан істотно відрізняється, що необхідно враховувати при плануванні його виробництва.

Таблиця 2.6 – Вплив зольності на вихід коксу

Найменування проби	Марка	$A^d, \%$	$V^{daf}, \%$	Вихід коксу, %	
				B^d	B^{daf}
ЦЗФ «Селідовська»	Г	5,0	38,6	68,40	66,74
		7,8	38,6	69,77	67,21
		$\Delta=2,8$	$\Delta=0$	$\Delta=1,37$	$\Delta=0,47$
ш. «ім. Скочинського»	Ж	7,5	32,9	73,50	71,35
		8,2	32,6	74,13	71,82
		$\Delta=0,7$	$\Delta=0,3$	$\Delta=0,63$	$\Delta=0,47$
ш/у «Покровське»	К	7,1	28,9	75,81	73,96
		8,8	29,3	76,44	74,17
		$\Delta=1,7$	$\Delta=0,4$	$\Delta=0,63$	$\Delta=0,21$
ЦЗФ «Узловська»	ПС	8,7	20,0	82,58	80,92
		10,4	20,7	83,23	81,28
		$\Delta=1,7$	$\Delta=0,7$	$\Delta=0,65$	$\Delta=0,36$

2. Внаслідок того, що легкі смоляні погони повністю вловлюються на ватяному фільтрі, вихід (масову частку) смоли X_1 в процентах розраховують за формулою (2.2), а вихід аміаку визначають за об'ємом розчину гідроксиду натрію, витраченого на титрування поглинаючого розчину (без урахування масової частки легких смоляних погонів) наступним чином:

$$X_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m}, \quad (2.2)$$

де m_1 – маса фільтра і вставки після випробування, г;

m_2 – маса фільтра і вставки до випробування, г;

m – маса наважки випробуваного вугілля (шихти), г.

3. Для оцінки виходу хімічних продуктів коксування (крім коксу) з сухої знезоленої маси вугілля (шихти), рекомендується розраховувати їх вихід на сухий знезолений стан за формулою (2.3)

$$B^{daf} = \frac{B^d \cdot 100}{100 - A^d}, \quad (2.3)$$

де B^d – вихід основних хімічних продуктів коксування на сухий стан, %;

A^d – зольність випробуваного вугілля (шихти), %.

4. Для визначення загального виходу газоподібних продуктів (аміаку (X_{10}), сірководню (X_{11}) і діоксиду вуглецю (X_{12}) в м³/т) використовують формули

$$X_{10} = \frac{X_2 \cdot 10}{g_1}, \quad X_{11} = \frac{X_5 \cdot 10}{g_2}, \quad X_{12} = \frac{X_6 \cdot 10}{g_3}, \quad (2.4)$$

де X_2, X_5, X_6 – вихід відповідно аміаку, сірководню та діоксиду вуглецю, %;

g_1, g_2, g_3 – маса 1 м³ за нормальними умовами, яка складає 1,417 кг для аміаку, 1,434 кг для сірководню, 1,842 кг для діоксиду вуглецю;

5. Загальний вихід газу при нормальних умовах в м³/т дорівнює сумі аміаку, сірководню та діоксиду вуглецю і решти газу, що виділився під час дослідження:

$$X_{13} = X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12}, \quad (2.5)$$

де X_9 – вихід газу, що виділився, без урахування виходу аміаку, сірководню та діоксиду вуглецю, м³/т;

X_{10}, X_{11}, X_{12} – вихід відповідно аміаку, сірководню та діоксиду вуглецю, м³/т.

Розділ 11 «Точність метода». Вперше зібрані в єдиному розділі дані щодо збіжності результатів визначення виходу окремих продуктів. З урахуванням

напрацьованих в останні роки експериментальних даних, визначені величини розбіжності результатів визначення виходу сірководню (табл. 2.7), діоксиду вуглецю (табл. 2.8), сирого бензолу (табл. 2.9), ненасичених сполук.

Таблиця 2.7 – Розбіжність результатів визначення сірководню

Масова частка сірководню, %	Допустима розбіжність, % абс.
Від 0,1 до 0,5	0,05
Понад 0,5 до 1,0	0,07
Понад 1,0 до 1,5	0,10

Таблиця 2.8 – Розбіжність результатів визначення діоксиду вуглецю

Масова частка діоксиду вуглецю, %	Допустима розбіжність, % абс.
Від 0,3 до 1,0	0,05
Понад 1,0 до 2,0	0,10
Понад 2,0 до 4,0	0,15

Таблиця 2.9 – Розбіжність результатів визначення сирого бензолу

Масова частка сирого бензолу, %	Допустима розбіжність, % абс.
Від 0,1 до 0,3	0,05
Понад 0,3 до 1,0	0,10
Понад 1,0 до 2,5	0,15

За результат визначення виходу ненасичених вуглеводнів приймають середнє арифметичне значення двох паралельних визначень, розбіжність між якими при ймовірності $P = 0,95$ не має перевищувати 0,1% абс.

Додаток А (обов'язковий) «Обчислення фактичного компонентного складу газу». Додано, що дослідження компонентного складу газу можна проводити не тільки відповідно до ГОСТ 5439 [70], а й газохроматографічним методом відповідно до чинної нормативної документації.

Додаток Б (довідковий) «Перелік нормативних документів, використаних при розробці стандарту». Наведено вперше. Включений перелік нормативних

посилань (технічні умови), які не ввійшли до розділу 2 «Нормативні посилання».

Висновки за розділом 2

1. Аналіз конструктивних і методичних особливостей існуючих в даний час лабораторних методів визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування довів, що для прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування доцільно використовувати метод коксування малих наважок. Встановлено, що краще використовувати п'ятисекційну лабораторну піч, що має ряд переваг порівняно з односекційною.

2. Виконано комплекс робіт, спрямованих на вдосконалення ГОСТ 18635–73.3 урахуванням викладених доповнень і уточнень був розроблений і стандартизований ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходів хімічних продуктів коксування».

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕМЕНТНОГО І ПЕТРОГРАФІЧНОГО СКЛАДІВ ВУГІЛЛЯ (ШИХТИ) З ВИХОДОМ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ

В ході виконаного аналізу [69] сучасного стану питання прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування зроблені наступні основні висновки:

1. В умовах підвищеного вмісту петрографічно неоднорідного вугілля в сучасних вугільних шихтах точність прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування тільки за величиною виходу летких речовин є недостатньою;

2. Найбільш доцільно використовувати для прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування результати елементного і петрографічного аналізів вугілля (вугільних шихт).

3.1 Дослідження залежності між показниками петрографічного аналізу вугілля і виходом основних продуктів коксування

З метою визначення залежності між показниками петрографічного аналізу вугілля і виходом коксу і основних хімічних продуктів коксування використані накопичені раніше в ДП «УХІН» дані про технологічні та петрографічні характеристики вугілля, вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування. У статистичну вибірку (181 проба) було включено переважно вугілля Донецького басейну всього метаморфічного ряду, причому як пластові проби, так і товарна продукція, що характеризується набором найрізноманітніших поєднань значень показників якості, а також окреме вугілля Кузнецького, Печорського і Південно-Якутського басейнів, США, Австралії і Канади.

В якості основних прогнозуючих параметрів властивостей вугілля були використані його петрографічні характеристики: середній довільний показник

відбиття вітриніту (R_0 , %) і сума фюзенізованих компонентів ($\Sigma OK = I + 2/3S_v$, %).

В табл. 3.1 наведені мінімальні і максимальні значення показників, які використовували у статистичній обробці [71, 72].

Таблиця 3.1 – Мінімальні і максимальні значення та інтервали зміни показників властивостей вугілля

Показники	Значення		Інтервал
	max	min	
R_0 , %	1,92	0,51	1,41
ΣOK , %	51,0	0	51,0
V^{daf} , %	45,8	14,5	31,3
Вихід продуктів коксування, %:			
– кокс	87,0	62,6	24,4
– смола	8,3	0,68	7,62
– сирий бензол	2,13	0,22	1,91
– коксовий газ	20,38	6,73	13,65

Аналізуючи дані, наведені в табл. 3.1, можна прийти до висновку, що вибірка характеризується значними інтервалами між мінімальними і максимальними значеннями окремих показників. Так, величина середнього довільного показника відбиття вітриніту змінюється від 0,51 до 1,92 % (майже в 4 рази), сума фюзенізованих компонентів від 0 до 51%, вихід летких речовин від 14,5 до 45,8 % (більш ніж в 3 рази), коливання в показниках якості незмінно позначилися на виході коксу, що змінюється від 62,6 до 87,0 %, смоли від 0,68 до 8,3 %, бензолу від 0,22 до 2,13 % і газу від 6,73 до 20,38 %.

В цілому, можна відзначити, що вибірка характеризується досить великим діапазоном зміни показників якості, виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування.

На першому етапі дослідження були розраховані коефіцієнти парної кореляції для показників властивостей вугілля (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти парної кореляції між показниками властивостей вугілля

	R_o	ΣOK	V^{daf}
R_o	-	-0,24	-0,96
ΣOK	-0,24	-	0,26
V^{daf}	-0,96	0,26	-

Дані табл. 3.2 свідчать про те, що середній довільний показник відбиття вітриніту і вихід летких речовин знаходяться в тісній залежності. Це підтверджує отримані раніше дані про зв'язок цих показників. Значення коефіцієнта парної кореляції дорівнює 0,96. Ця обставина виключає необхідність спільного використання цих двох показників у моделі прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування. Навпаки, сума фюзенізованих компонентів є незалежним показником, так як характеризує мацеральний склад органічної маси вугілля, що впливає, як вже зазначалося вище, на вихід основних продуктів коксування.

Розробка математичних залежностей виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування від показників властивостей вугілля виконувалась методом пошуку мінімуму залишкової дисперсії, після чого виконана статистична оцінка адекватності розроблених математичних моделей.

У табл. 3.3 наведені математичні моделі, які описують залежність виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування від петрографічних характеристик і виходу летких речовин. Аналіз наведених моделей і статистичних оцінок доводить наступне.

Вихід коксу з високою точністю прогнозується за показниками відбиття вітриніту і суми фюзенізованих мікрокомпонентів. При цьому статистичні оцінки взаємозв'язку показників властивостей вугілля і виходу коксу краще, ніж при використанні в якості основного прогнозуючого параметра виходу летких речовин.

Таблиця 3.3 – Математичні рівняння залежності виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування від петрографічних характеристик і їх статистична оцінка

Рівняння	Статистична оцінка ¹		
	<i>r</i>	<i>D</i> , %	σ , %
$B_K^d = 95,8086 - 0,631V^{daf}$	0,96	92	0,6
$B_K^d = 60,3535 + 15,2881R_0 - 0,0188\Sigma OK$	0,99	98	0,4
$B_{cm}^d = 0,1576 V^{daf} - 0,7902$	0,85	72	0,4
$B_{cm}^d = 8,2498 - 3,8464R_0 - 0,0082\Sigma OK$	0,98	95	0,2
$B_o^d = 0,0442V^{daf} - 0,05$	0,89	79	0,2
$B_o^d = 2,4421 - 1,0524R_0 - 0,0009\Sigma OK$	0,99	99	0,1
$B_z^d = 4,4673 + 0,2395V^{daf}$	0,81	66	1,3
$B_z^d = 17,912 - 5,7837R_0 + 0,0085\Sigma OK$	0,89	79	1,4

Вихід смоли і сирого бензолу практично з однаковою точністю прогнозується або за петрографічними показниками (R_0 і ΣOK), або за виходом летких речовин і сумі фюзенізованих мікрокомпонентів. Найменш точно прогнозується показник виходу коксового газу (66–68 %).

Таким чином, коефіцієнти кореляції, що свідчать про наявність і тісноту зв'язку між показниками властивостей вугілля (R_0 і ΣOK) і виходами коксу, смоли, сирого бензолу і коксового газу, укладаються в інтервалі значень 0,89–0,99. Отримані величини практично аналогічні тим (а за деякими показниками і вище), які були отримані у роботі [27].

За результатами цього дослідження можна сказати, що в умовах міжбасейнової вугільної сировинної бази коксування використання для прогнозу виходу основних продуктів коксування єдиного параметра – виходу летких речовин – недостатньо, так як це не в повній мірі враховує особливості речового складу і властивостей окремих складових органічної маси вугілля.

¹*r* – коефіцієнт кореляції; *D* – коефіцієнт детермінації, %; σ – стандартна похибка розрахунку, %.

Розроблені математичні рівняння дозволяють з більш високою точністю прогнозувати вихід коксу, а також смоли, сирого бензолу і коксового газу на підставі даних петрографічного аналізу, а саме середнього довільного показника відбиття вітриніту R_o і суми фюзенізованих компонентів ΣOK .

На нашу думку, факт негативного впливу вмісту суми фюзенізованих компонентів на вихід коксу, що суперечить загальноприйнятим даним [41], є наслідком апроксимації розроблених рівнянь в область значень, що виходить за межі основної вибірки. При ретельному аналізі вибірки було встановлено, що практично все вугілля було петрографічно однорідним, а вмістом суми фюзенізованих більше 25 % характеризувалася всього одна проба ($\Sigma OK = 51\%$). Отже, розроблені рівняння хоча і дозволяють з достатньою точністю прогнозувати вихід хімічних продуктів, однак не відображають процесутворення речовин коксу з петрографічних складових при їх термічній деструкції.

Отримані рівняння справедливі для індивідуального вугілля, а з урахуванням того, що вони отримані на основі накопичених раніше даних, що включають в основному вугілля Донбасу, необхідно розробити прогнозуючі рівняння для вугільних шихт, складених з вугілля різних країн-постачальників, що входять в сировинну базу коксохімічних підприємств України.

3.2 Теоретичне обґрунтування впливу елементного складу, структурних параметрів і петрографічних характеристик вугілля України, Росії та США на вихід основних продуктів коксування

Для досягнення поставленої мети були складені 3 вибірки, що включають вугілля найбільш широко представлених в сучасній сировинній базі коксохімічних підприємств України країн-постачальників, а саме: України, Росії та США [31].

Необхідно відзначити, що для дослідження було підібрано неокиснене вугілля, щоб усунути вплив даного чинника на вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування [47, 48, 73–77].

Максимальні, мінімальні та середні значення показників технологічних властивостей досліджених вибірок вугілля наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Технологічні властивості досліджених проб вугілля України, Росії, США

Страна-постачальник (кількість проб)	Значення	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм	
		A^d	S_t^d	V^{daf}	x	y
Україна (40)	Max	13,0	2,99	42,7	70	29
	Min	2,1	0,48	16,8	3	6
	Δ	10,9	2,51	25,9	67	23
	середнє	7,4	1,49	32,0	30	15
Росія (23)	Max	13,3	1,93	41,6	47	25
	Min	3,9	0,27	19,3	6	0
	Δ	9,4	1,66	22,3	41	25
	середнє	8,9	0,61	29,8	28	12
США (18)	Max	10,0	3,23	42,4	46	31
	Min	6,8	0,43	17,7	8	10
	Δ	3,2	2,80	24,7	38	21
	середнє	8,5	0,99	31,6	23	18
Загальна вибірка (81)	Max	13,3	3,23	42,7	70	31
	Min	2,1	0,27	16,8	3	0
	Δ	11,2	2,96	25,9	67	31
	середнє	8,1	1,10	31,3	28	15

Найбільш зольними виявилися проби російського вугілля ($A_{сер}^d = 8,9\%$), а найменш – українського ($A_{сер}^d = 7,4\%$). Американське вугілля характеризувалося середньою зольністю на рівні 8,5%. Дана обставина була врахована при перерахунку виходу коксу і хімічних продуктів коксування на сухий знезолений стан daf .

Варто зазначити, що максимальні (41,6–42,7), мінімальні (16,8–19,3) і

середні (29,8–32,0) значення показника виходу летких речовин V^{daf} , % для всіх досліджених вибірок досить близькі, що свідчить про близькість інтервалів зміни даного показника у всіх трьох групах вугілля.

Товщина пластичного шару дослідженого вугілля коливається в широких межах, охоплюючи практично всі типи вугілля в рамках кожної країни.

Максимальні, мінімальні та середні значення вмісту окремих елементів, а також структурних характеристик, розрахованих на їх основі для досліджених вибірок вугілля, наведені в таблиці 3.5.

Наведені в табл. 3.5 величини розрахункових структурних параметрів вугілля, знайшли широке застосування при оцінці складу і будови органічної маси вугілля різних басейнів [78–82].

1. Величина C_{ap} характеризує вміст ароматичного вуглецю в органічній масі вугілля по відношенню до його загального вмісту, розраховується за формулою (3.1) [83]

$$C_{ap} = 3,4 \cdot C^{daf} / (100 - C^{daf}) \quad (3.1)$$

2. Параметр δ , що характеризує ступінь ненасиченості воднем одиниці маси органічних речовин вугілля [84], розраховується за формулою (3.2)

$$\delta = C^{daf} / 6 - H^{daf} + N^{daf} / 14, \quad (3.2)$$

де C^{daf} , H^{daf} и N^{daf} – вміст елементів в органічній масі вугілля, %.

3. Ступінь ароматичності структури органічної маси вугілля f_a розраховується за формулою (3.3) [85]

$$f_a = 1,007 + 0,3857 \cdot (H/C) - 0,3725 \cdot (O/C), \quad (3.3)$$

де H/C і O/C – атомні відношення.

Таблиця 3.5 – Елементний склад і структурні параметри досліджених проб вугілля України, Росії, США

Страна-постачальник (кількість проб)	Значення	Елементний склад, %					Структурні параметри				
		C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O_d^{daf}	$\frac{H_{am}}{C_{am}}$	C_{ap}	δ	f_a	c_A
Україна (40)	Max	90,3	6,3	2,2	3,0	9,3	0,90	31,65	10,21	0,75	0,81
	Min	81,9	4,1	0,2	0,5	1,3	0,58	15,38	7,66	0,63	0,72
	Δ	8,4	2,2	2,0	2,5	8,0	0,32	16,27	2,56	0,12	0,09
	середнє	86,1	5,6	1,6	1,5	5,2	0,79	21,74	8,79	0,69	0,77
Росія (23)	Max	91,0	6,2	2,8	1,9	9,3	0,91	34,38	10,44	0,75	0,82
	Min	81,7	4,8	1,0	0,3	1,3	0,64	15,18	7,69	0,63	0,72
	Δ	9,3	1,4	1,3	1,6	8,0	0,26	19,20	2,75	0,12	0,10
	середнє	87,3	5,6	2,2	0,6	4,3	0,77	24,33	9,09	0,69	0,78
США (18)	Max	89,5	6,3	2,3	3,2	5,9	0,89	28,98	10,12	0,74	0,81
	Min	84,2	4,9	1,4	0,4	2,8	0,66	18,12	7,96	0,65	0,74
	Δ	5,3	1,4	0,9	2,8	3,1	0,23	10,86	2,16	0,09	0,08
	середнє	87,0	5,8	1,7	1,0	4,5	0,80	23,07	8,82	0,68	0,77
Загальна вибірка (81)	Max	91,0	6,3	2,8	3,2	9,3	0,91	31,65	10,44	0,75	0,81
	Min	81,7	4,1	0,2	0,3	1,3	0,58	15,18	7,66	0,63	0,72
	Δ	9,3	2,2	2,6	2,9	8,0	0,32	16,47	2,78	0,12	0,09
	середнє	86,6	5,7	1,8	1,1	4,8	0,79	23,05	8,90	0,69	0,77

4. Показник ступеня молекулярної асоційованості речовини вугілля cA розраховується за формулою (3.4) [86]:

$cA = 1 - \frac{H^{daf} + 0,125(O^{daf} + N^{daf} + S_t^d)}{0,333C^{daf}},$	(3.4)
---	-------

де C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} и S_t^d – вміст елементів у вугіллі, %.

Дані табл. 3.5 свідчать, що середні значення вмісту вуглецю, водню і кисню досить близькі у вибірках вугілля України, Росії та США.

Як і слід було очікувати, найбільший вміст загальної сірки ($S_{t, cep}^d = 1,5$ %) і найменший вміст азоту ($N_{cep}^{daf} = 1,6$ %) характерно для вугілля України, а найменший вміст загальної сірки ($S_{t, cep}^d = 0,6$ %) і максимальний вміст азоту ($N_{cep}^{daf} = 2,2$ %) – для вугілля Росії. Відповідно, вугілля США характеризується проміжними значеннями цих показників ($S_{t, cep}^d = 1,0$ %; $N_{cep}^{daf} = 1,7$ %).

Вказані в табл. 3.5 структурні параметри розрізняються кількістю основних елементів, використаних при їх підрахунку. На нашу думку, краще за все використовувати показник ступеня молекулярної асоційованості речовин вугілля cA , який включає всі основні елементи, що утворюють органічну масу вугілля, і на думку багатьох вчених, характеризує склад і будову вугілля, показуючи міцність його структури, і описується відношенням «вільного вуглецю», тобто надлишком після насичення інших атомів до загального його вмісту [86].

Максимальні, мінімальні та середні значення петрографічних характеристик досліджених вибірок вугілля наведені в таблиці 3.6.

Досліджені групи вугілля різних країн представлені вугіллям всіх стадій метаморфізму від найменш метаморфізованих ($R_0 = 0,58$ %) до високометаморфізованих ($R_0 = 1,77$ %) (табл. 3.6).

Дані таблиці 3.6 свідчать про те, що українське вугілля, в основному, петрографічно однорідне ($V_{t, cep} = 84$ %), а вугілля Росії США петрографічно

Таблиця 3.6 – Петрографічна характеристика досліджених проб вугілля України, Росії, США

Страна-постачальник (кількість проб)	Значення	Середній показник відбиття вітриніта, %	Петрографічний склад, %					Стадії метаморфізму вітриніту, %						
			R_o	Vt	Sv	I	L	ΣOK	< 0,50	0,50–0,64	0,65–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69
Україна (40)	Мах	1,77	96	1	32	18	32	7	90	98	99	86	96	58
	Мін	0,59	53	0	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0
	Δ	1,18	43	1	29	18	28	7	90	98	99	86	96	58
	середнє	1,03	84	0	12	4	12	1	12	31	29	14	12	2
Росія (23)	Мах	1,60	99	4	80	7	83	11	81	94	91	94	76	18
	Мін	0,58	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Δ	1,02	83	4	80	7	83	11	81	94	91	94	76	18
	середнє	1,01	68	1	29	1	30	1	11	23	41	17	6	1
США (18)	Мах	1,56	82	3	38	11	40	1	17	92	95	71	93	4
	Мін	0,74	54	0	13	0	13	0	0	0	0	0	0	0
	Δ	0,82	28	3	25	11	27	1	17	92	95	71	93	4
	середнє	1,03	69	1	26	4	27	0	1	26	53	11	8	0
Загальна вибірка (81)	Мах	1,77	99	4	80	18	83	11	90	98	99	94	96	58
	Мін	0,58	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Δ	1,19	83	4	80	18	83	11	90	98	99	94	96	58
	середнє	1,02	76	1	20	3	21	1	9	28	38	14	9	1

неоднорідне ($V_{t_{сер}} = 68-69\%$). Середній вміст суми фюзенизованих компонентів склало 12 % для українського вугілля і 30 та 27 % для російського і американського вугілля відповідно.

Середній вміст ліптиніту для всіх груп вугілля низький ($L_{сер} = 1-4\%$), хоча в деякому вугіллі України ($L = 18\%$) і США ($L = 11\%$) він міститься в значній кількості.

Зазначені вище особливості технологічних властивостей, елементного та петрографічного складів вугілля досліджених вибірок повинні були позначитися на виході з нього коксу і основних хімічних продуктів коксування.

Визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування (табл. 3.7) виконувалося в 20-г лабораторній установці згідно ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходів хімічних продуктів коксування» [74]. У таблиці 3.7 наведені експериментальні значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування на сухий незолений стан *daf*, що розраховані за формулами (2.1, 2.3).

Дані таблиці 3.7 свідчать, що середні значення виходу основних продуктів коксування розрізняються між вибірками. Так, українське вугілля характеризується найбільшим виходом сірководню і пірогенетичної вологи; російське – коксу, аміаку і вуглекислого газу; американське – смоли, бензолу, ненасичених вуглеводнів і газу.

Були розраховані коефіцієнти парної кореляції між виходом основних продуктів коксування і даними елементного складу і структурних параметрів (табл. 3.8) для кожної з досліджених вибірок вугілля і для загальної вибірки.

Для українського вугілля вихід коксу, смоли і бензолу на 71,4–72,7 % визначається вмістом вуглецю (коефіцієнти парної кореляції рівні 0,845–0,850), для пірогенетичної води цей зв'язок менше і дорівнює 65 % ($r = 0,806$).

Зв'язок виходів основних продуктів коксування з вмістом водню дещо слабше і коливається в межах 66,3–70,6 %. Що стосується вмісту кисню, то величина зв'язку цього показника з виходом продуктів коксування помітно нижче, ніж у вуглецю і водню і становить величину 37,6–69,89 %.

Таблиця 3.7 – Вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування здосліджених проб вугілля України, Росії, США

Страна-постачальник	Значення	Вихід основних хімічних продуктів коксування (<i>daf</i>), %								
		Кокс	Смола	C ₆ H ₆	C _m H _n	NH ₃	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O	Газ
Україна (40)	Max	84,78	7,81	1,83	0,95	0,39	0,92	2,27	5,90	18,09
	Min	63,79	1,62	0,47	0,33	0,20	0,10	0,19	2,82	8,91
	Δ	20,99	6,19	1,36	0,62	0,19	0,82	2,08	3,08	9,18
	середнє	72,34	5,43	1,36	0,63	0,29	0,46	0,88	4,33	14,30
Росія (23)	Max	81,32	7,80	1,97	1,04	0,73	0,34	3,39	5,71	17,14
	Min	63,48	1,76	0,44	0,12	0,15	0,03	0,59	1,30	11,48
	Δ	17,84	6,04	1,53	0,92	0,58	0,31	2,80	4,41	5,66
	середнє	73,92	4,48	1,17	0,68	0,51	0,13	1,53	3,83	13,76
США (18)	Max	83,55	8,23	2,20	1,32	0,46	0,57	1,58	5,17	16,61
	Min	65,06	2,43	0,43	0,40	0,13	0,03	0,27	1,55	11,07
	Δ	18,49	5,80	1,77	0,92	0,33	0,54	1,31	3,62	5,54
	середнє	72,38	5,63	1,43	0,77	0,32	0,25	0,95	3,97	14,31
Загальна вибірка (81)	Max	84,78	8,23	2,20	1,32	0,73	0,92	3,39	5,90	18,09
	Min	63,48	1,62	0,43	0,12	0,13	0,03	0,19	1,30	5,54
	Δ	21,30	6,61	1,77	1,20	0,60	0,89	3,20	4,60	12,55
	середнє	72,80	5,14	1,31	0,70	0,37	0,28	1,12	4,04	14,12

Таблиця 3.8 – Коефіцієнти парної кореляції

Україна				
	B_k^{daf}	B_{cm}^{daf}	B_o^{daf}	B_{ns}^{daf}
C^{daf}	0,848	-0,850	-0,845	-0,806
H^{daf}	-0,824	0,814	0,840	0,753
O^{daf}	-0,726	0,728	0,720	0,679
H_{am}/C_{am}	-0,831	0,861	0,828	0,784
C_{ap}	0,862	-0,863	-0,857	-0,813
δ	0,895	-0,891	-0,901	-0,833
f_a	0,878	-0,872	-0,885	-0,813
cA	0,889	-0,886	-0,894	-0,833
Росія				
C^{daf}	0,901	-0,876	-0,892	-0,885
H^{daf}	-0,843	0,903	0,790	0,808
O^{daf}	-0,836	0,804	0,832	0,811
H_{am}/C_{am}	-0,899	0,932	0,857	0,865
C_{ap}	0,893	-0,897	-0,884	-0,905
δ	0,911	-0,936	-0,877	-0,884
f_a	0,909	-0,930	-0,874	-0,877
cA	0,922	-0,929	-0,894	-0,894
США				
C^{daf}	0,935	-0,940	-0,908	-0,811
H^{daf}	-0,883	0,889	0,860	0,823
O^{daf}	-0,910	0,902	0,893	0,793
H_{am}/C_{am}	-0,917	0,923	0,892	0,838
C_{ap}	0,930	-0,934	-0,907	-0,828
δ	0,935	-0,941	-0,909	-0,845
f_a	0,928	-0,933	-0,905	-0,842
cA	0,942	-0,947	-0,914	-0,843
Загальна вибірка				
C^{daf}	0,861	-0,853	-0,833	-0,843
H^{daf}	-0,831	0,850	0,823	0,750
O^{daf}	-0,749	0,734	0,795	0,715
H_{am}/C_{am}	-0,786	0,800	0,782	0,743
C_{ap}	0,867	-0,875	-0,849	-0,858
δ	0,903	-0,914	-0,884	-0,849
f_a	0,895	-0,899	-0,873	-0,830
cA	0,905	0,906	-0,882	-0,855

Величина коефіцієнтів парної кореляції даних елементного складу і виходу основних продуктів коксування у російського і американського вугілля трохи вище, ніж в українському, коефіцієнт детермінації у нього досягає 87,0 %.

Необхідно відзначити, що структурні параметри, що розраховуються за даними елементного аналізу, більш тісно пов'язані з виходом коксу і основних хімічних продуктів коксування ніж окремі елементи. Найбільш точно прогноз виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування можна здійснювати за даними показника, що характеризує ступінь молекулярної асоційованості речовини вугілля sA . Значення коефіцієнтів парної кореляції між цим показником і виходом коксу для всіх груп вугілля складають 0,889–0,942; виходом смоли від –0,886 до –0,947; виходом бензолу від –0,894 до –0,914, виходом пірогенетичної вологи від –0,833 до –0,894.

За даними [87], використані в даній роботі структурні параметри досить тісно взаємопов'язані між собою і кожен з них може служити кількісною оцінкою ступеня метаморфізму, ступеня ароматичності і молекулярної асоційованості органічної маси вугілля. Отже, для прогнозу виходу коксу і хімічних продуктів коксування можна використовувати один структурний параметр, наприклад, sA , внаслідок його найбільш тісної кореляції з виходом коксу і хімічних продуктів коксування.

Були розроблені математичні рівняння прогнозу виходу основних продуктів коксування в залежності від значень структурного параметра sA в рамках окремих вибірок і для всього масиву даних (табл. 3.9).

Дані табл. 3.9 свідчать, що за даними значень показника ступеня асоційованості sA можливий прогноз виходу основних продуктів коксування з досить великою точністю. Отримані рівняння для загальної вибірки описують вихід коксу і хімічних продуктів коксування в залежності від величини sA з коефіцієнтом множинної кореляції r , рівним 0,855–0,905; детермінації D 73,1–82,0 %; стандартна помилка розрахунку SE не перевищує розбіжності, допустимі за ДСТУ 7689:2015.

Таблиця 3.9 – Математичні рівняння залежності виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування від структурного параметра cA

Страна-постачальник	Вид рівняння	Статистичні оцінки		
		r	$D, \%$	$SE, \%$
Україна	$B_{\kappa}^{daf} = 216,83 \cdot cA - 93,489$	0,889	79,1	0,472
	$B_{cm}^{daf} = -64,066 \cdot cA + 54,427$	0,886	78,4	0,288
	$B_{\sigma}^{daf} = -12,773 \cdot cA + 11,124$	0,894	79,9	0,175
	$B_{ns}^{daf} = -27,226 \cdot cA + 25,155$	0,833	69,2	0,296
Росія	$B_{\kappa}^{daf} = 192,39 \cdot cA - 75,262$	0,922	85,0	0,499
	$B_{cm}^{daf} = -63,730 \cdot cA + 53,903$	0,929	86,3	0,294
	$B_{\sigma}^{daf} = -14,690 \cdot cA + 12,559$	0,894	79,9	0,149
	$B_{ns}^{daf} = -36,900 \cdot cA + 32,442$	0,894	79,9	0,276
США	$B_{\kappa}^{daf} = 206,26 \cdot cA - 86,072$	0,942	88,5	0,469
	$B_{cm}^{daf} = -65,460 \cdot cA + 55,915$	0,947	89,7	0,274
	$B_{\sigma}^{daf} = -20,167 \cdot cA + 16,923$	0,914	83,6	0,134
	$B_{ns}^{daf} = -31,326 \cdot cA + 28,034$	0,843	71,0	0,289
Загальне	$B_{\kappa}^{daf} = 204,67 \cdot cA - 84,501$	0,904	81,8	0,483
	$B_{cm}^{daf} = -65,017 \cdot cA + 55,176$	0,905	82,0	0,281
	$B_{\sigma}^{daf} = -14,652 \cdot cA + 12,581$	0,882	77,8	0,145
	$B_{ns}^{daf} = -31,808 \cdot cA + 28,556$	0,855	73,1	0,281

З урахуванням того факту, що прогноз виходу коксу і хімічних продуктів коксування здійснюється систематично, а визначення елементного складу в заводських лабораторіях, як правило, не проводиться, вважаємо за доцільне прогнозувати виход основних продуктів коксування за даними петрографічних досліджень вугілля [69, 88, 89], які включені в схему контролю якості вугілля, що надходить на підприємства.

3.3 Розробка математичних моделей прогнозу виходу основних продуктів коксування згідно даних петрографічного аналізу вугілля України, Росії та США

Відбиття вітриніту (блиск вугілля) є найбільш наочним зовнішнім вираженням глибоких змін будови і складу органічних речовин вугілля, що відбуваються в процесі метаморфізму. Визнано, що показник відбиття вітриніту – найбільш надійний параметр для кількісної оцінки ступеня метаморфізму вугілля. За даними виміру показника відбиття на всій поверхні проби крім середнього значення показника відбиття розраховується стандартне відхилення від середнього значення. Останнє дає кількісну оцінку ступеня неоднорідності речовин, що складають вітриніт. Будується також рефлектограма розподілу значень показника відбиття з інтервалом, що дорівнює 0,1 (0,05) % від загального числа вимірів. Це дозволяє дати кількісну оцінку процентного співвідношення низько-, середньо- і високометаморфізованих складових вугілля. Рефлектограмний аналіз дозволяє встановити фактичну наявність в товарній продукції шахт, у концентратах вуглезбагачувальних фабрик і у вугільних шихтах складових вітриніту, відповідних тій або іншій марці вугілля.

Вугільна сировинна база коксохімічних заводів України характеризується наявністю в її складі вугілля різних країн і басейнів: Україна (Донецький басейн), Росія (Кузнецький, Печорський, Південно-Якутський басейни), Казахстан (Карагандинський басейн), США (Аппалачський басейн). Вугілля зазначених країн різко розрізняється комплексом технологічних властивостей і петрографічних характеристик.

Збагачувальні фабрики України в основному не мають постійної вугільної сировинної бази, в результаті чого змушені збагачувати вугілля двох і більше марок, що призводить до взаємозасмічення і зниження технологічної цінності одержуваного концентрату. У зв'язку з цим декларована в посвідченнях якості марочна належність концентратів часто не відповідає дійсності, що ускладнює отримання коксу планованої якості. У табл. 3.10 і 3.11

Таблиця 3.10 – Технологічні властивості вугільних концентратів

Постачальник	Марка	Технічний аналіз, %				Пластометричні показники, мм		Середній показник відбиття вітриніту, %
		A^d	S_t^d	V^d	V^{daf}	x	y	R_o
ЦЗФ «Держинська»	Ж	10,0	2,64	31,6	35,2	45	17	0,86
ЦЗФ «Пролетарська»	К	8,1	1,15	23,2	25,2	23	14	1,25
ЦЗФ «Калінінська»	К	9,6	1,70	23,2	23,6	16	17	1,28
ЦЗФ «Вузлівська»	ПС	6,8	0,38	16,5	17,7	12	7	1,68
ЦЗФ «Березовська»	К+КП+КС	9,3	0,50	19,2	21,2	27	10	1,27
Розріз «Черніговець»	КСН	8,9	0,29	20,5	22,5	33	6	1,15
ЦЗФ «Печорська»	ГЖП	9,5	1,09	31,9	35,2	29	13	0,82
ЦЗФ «Східна»	КЖ+К+КП	11,3	0,59	21,0	23,6	36	14	1,19
США «Альфа»	–	7,4	1,02	26,1	28,2	8	22	1,16
США «Альфа»	–	8,1	0,89	32,7	35,6	20	16	0,89

наведені приклади фактичної якості концентратів донецького і зарубіжного вугілля.

Як видно з даних табл. 3.10, марочна належність донецького вугілля, задекларована в посвідченнях якості, формально підтверджується значеннями класифікаційних показників. Однак рефлектограми вітриніта вказують на те, що вітринітова складова вугілля вкрай неоднорідна. Вона включає складові, що відповідають практично всьому метаморфічному ряду. Для зарубіжного вугілля, крім значної неоднорідності вітриніту, характерно також високий вміст низьколетких неспікливих мацералів групи інертиніту. Таким чином, існуюча раніше практика шихтування з урахуванням марочної належності концентратів, а також даних їх технічного аналізу і пластометричних показників, не дозволяє оцінити фактичну технологічну цінність вугілля і прогнозувати очікуваний вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з шихт з їх участю.

Багаторічна світова практика [90] і дослідження, виконані в зв'язку з розробкою єдиної промислово-генетичної класифікації [91], довели, що надійний контроль якості концентратів, що надходять на завод, і науково-обґрунтоване складання вугільних шихт неможливо без використання петрографічних показників: мацерального складу, середнього показника відбиття і рефлекторами вітриніту.

Результати аналізу і узагальнення досвіду використання петрографічних методів дослідження вугілля і шихт в ДП «УХІН» дозволили розробити межі значень показника відбиття для окремих груп складових витриніта, які умовно відповідають маркам вугілля, звичайно використовуваним для коксування, незалежно від їх басейнової належності. Аналіз рефлектограм рекомендується виконувати за такою «умовною шкалою відповідності стадій відбиття вітриніту маркам вугілля» (табл. 3.12) [92].

Необхідно відзначити, що склад і будова інертиніту також змінюється за стадіями метаморфізму вугілля, однак враховуючи несуттєві зміни властивостей його при термічній деструкції і інструментальні труднощі при визначенні ступеня зрілості, нами було взято лише загальний вміст даного

мацерала в вугіллі.

Таблиця 3.12 – Стадії метаморфізму вітриніту, умовно відповідні маркам

Стадії метаморфізму вітриніта, R_0 , %	Марка
<0,50	Д
0,50–0,64	ДГ
0,65–0,89	Г
0,90–1,19	Ж
1,20–1,39	К
1,40–1,69	ПС
1,70–2,59	П
>2,60	А

З урахуванням зазначеного поділу, а також вмісту в органічній масі вугілля мацералів групи ліптиніту, семивітриніту і інертиніту для визначення внеску петрографічних складових в вихід хімічних продуктів коксування було вирішено розбити органічну масу вугілля на вісім груп: складові витриніту, умовно відповідні маркам Д+ДГ ($R_0 \leq 0,64$ %), Г ($R_0 = 0,65-0,89$ %), Ж ($R_0 = 0,90-1,19$ %), К ($R_0 = 1,20-1,39$ %), ПС ($R_0 = 1,40-1,69$ %), П ($R_0 = 1,70-2,20$ %); фюзенізовану частину, яка об'єднує інертинітову і семивітринітову складові; ліптинітову частину, що складається з ліптиніту, умовно відповідного маркам Д, ДГ, Г, Ж; ліптиніт, що відповідає марці К, віднесено до вітриніту тієї ж марки через незначний вміст і близькість властивостей [37].

У табл. 3.13 приведено розподіл по групах, а також відповідно цим групам значення структурного параметра sA , яке розраховувалося шляхом вирішення системи лінійних рівнянь методом Гаусса [93–95], що містить m рівнянь і n невідомих, виду

Дані табл. 3.13 свідчать, що з ростом ступеня зрілості вітриніту вугілля значення ступеня молекулярної асоційованості органічної маси збільшується, а для ліптиніту, як найменш структурованого мацерала – значення найменше.

У табл. 3.14 наведені розраховані коефіцієнти переходу органічної маси петрографічних складових концентратів вугілля України, Росії, США в органічну масу коксу і основних хімічних продуктів коксування, а також їх статистична оцінка.

Розглядаючи дані табл. 3.14 і рис. 3.1, можна відзначити, що значення коефіцієнтів переходу вітринітової складової органічної маси вугілля в органічну масу коксу від групи I до групи VI зростають, а смоли, сирого бензолу і пірогенетичної вологи знижуються. Ця закономірність відзначається для всіх груп вугілля.

Слід зазначити, що значення коефіцієнтів переходу для українського та імпортного вугілля досить близькі на стадіях, умовно відповідних маркам Г, Ж, К, ПС, а на стадіях ДГ і П – вони різні.

Так, найменший вихід коксу спостерігається з I групи органічної маси вугілля США, коефіцієнт переходу склав 0,5396, а найбільший – з VI групи того ж вугілля з коефіцієнтом переходу 0,9290 відповідно. Коефіцієнти переходу органічної маси вугілля в сирій бензол для вугілля України і Росії з I групи – 0,0188 і 0,0219, а для вугілля США тієї ж групи – 0,0359; з II групи – 0,0170 і 0,0179, для США – 0,0270 відповідно; з III групи – 0,0130 і 0,0125, для США – 0,0179, для IV–VI групи – ближчі значення. Розглядаючи коефіцієнти переходу органічної маси вугілля в пірогенетичну воду, варто визначити, що помітна розбіжність спостерігається лише для шостої групи. Значення коефіцієнтів для вугілля України склало 0,0273, Росії – 0,0151; США – 0,0172.

Аналіз значень коефіцієнтів для груп VII і VIII підтвердив відомий факт, що вихід коксу з мацералів групи ліптиніту нижче, а вихід смоли, сирого бензолу і газу вище, ніж з мацералів групи інертиніта.

Таблиця 3.14 – Коефіцієнти переходу органічної маси петрографічних складових вугілля України, Росії, США в органічну масу основних хімічних продуктів коксування

	Група								Статистична оцінка		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	<i>r</i>	<i>D</i> , %	<i>SE</i> , %
Україна											
B_K^{daf}	0,6479	0,6722	0,7353	0,7993	0,8379	0,8741	0,5257	0,7165	0,998	99,5	0,428
B_{CM}^{daf}	0,0798	0,0729	0,0535	0,0333	0,0204	0,0094	0,1048	0,0436	0,996	99,1	0,170
B_O^{daf}	0,0188	0,0170	0,0130	0,0095	0,0068	0,0030	0,0242	0,0103	0,976	95,2	0,080
B_{ne}^{daf}	0,0600	0,0558	0,0432	0,0373	0,0298	0,0273	0,0468	0,0215	0,972	94,5	0,189
Росія											
B_K^{daf}	0,6055	0,6551	0,7240	0,7736	0,8087	0,8467	0,4357	0,8275	0,999	99,8	0,237
B_{CM}^{daf}	0,0851	0,0750	0,0626	0,0352	0,0239	0,0073	0,0780	0,0089	0,996	99,2	0,175
B_O^{daf}	0,0219	0,0179	0,0125	0,0079	0,0037	0,0016	0,0424	0,0059	0,984	96,7	0,087
B_{ne}^{daf}	0,0634	0,0539	0,0415	0,0362	0,0271	0,0172	0,0306	0,0228	0,986	97,2	0,200
США											
B_K^{daf}	0,5396	0,6185	0,7301	0,8073	0,8815	0,9290	0,6690	0,7415	0,998	99,7	0,253
B_{CM}^{daf}	0,0973	0,0855	0,0569	0,0369	0,0114	0,0081	0,1164	0,0391	0,989	97,7	0,214
B_O^{daf}	0,0359	0,0270	0,0179	0,0101	0,0057	0,0007	0,0366	0,0012	0,992	98,4	0,058
B_{ne}^{daf}	0,0617	0,0551	0,0407	0,0349	0,0268	0,0151	0,0280	0,0346	0,965	93,1	0,196

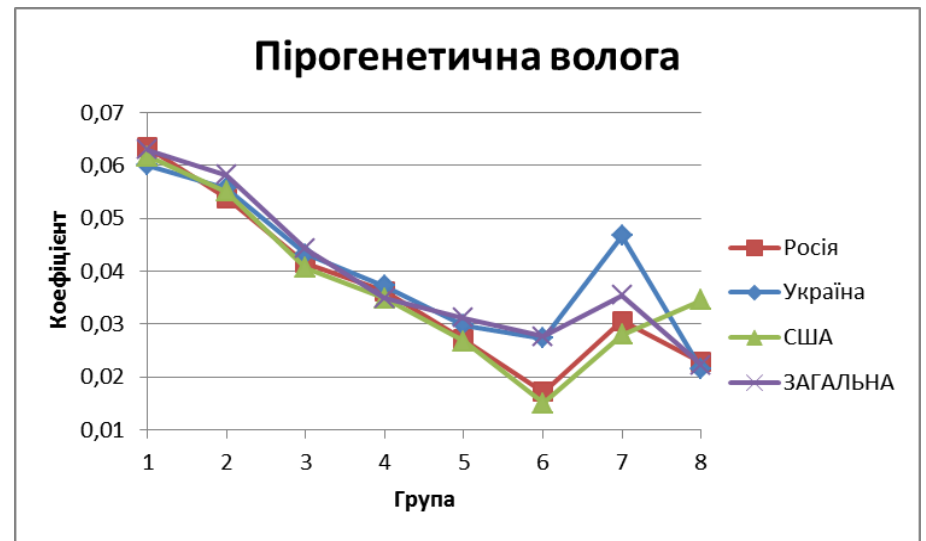
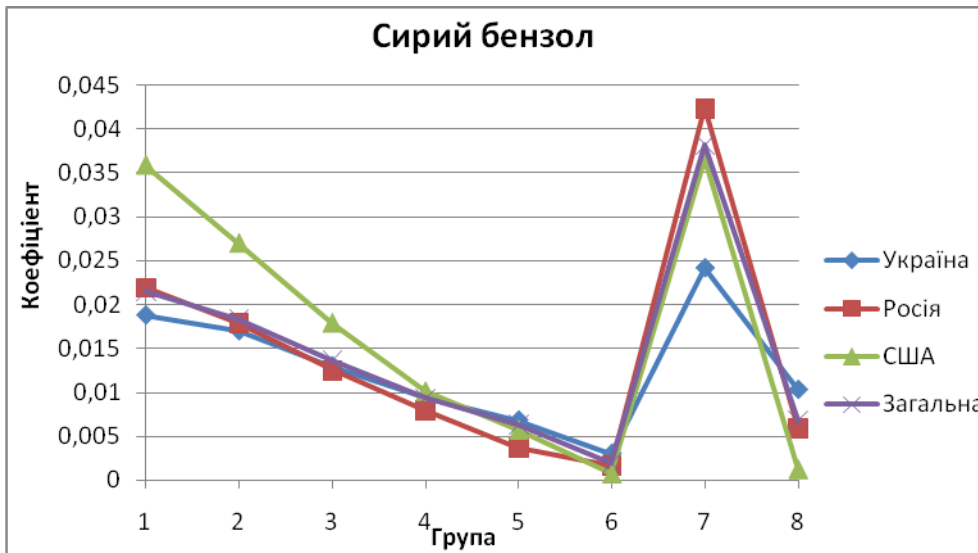
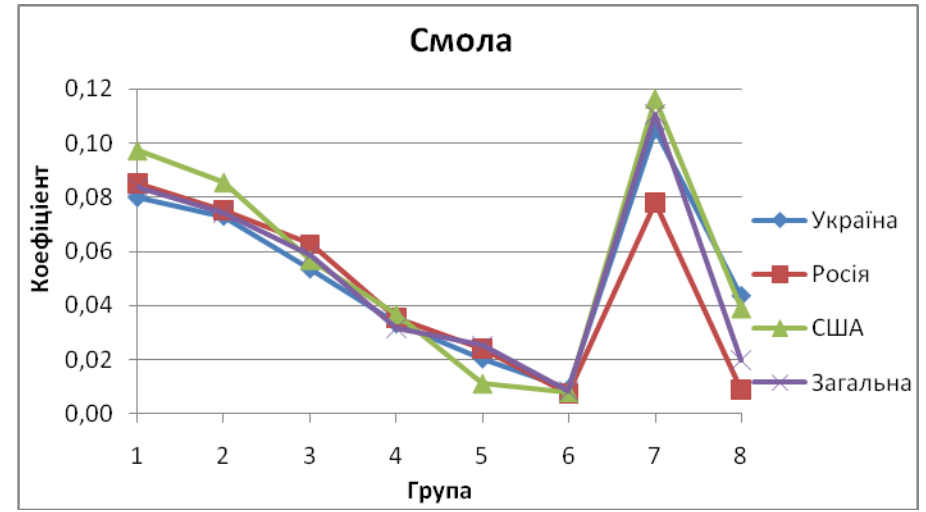
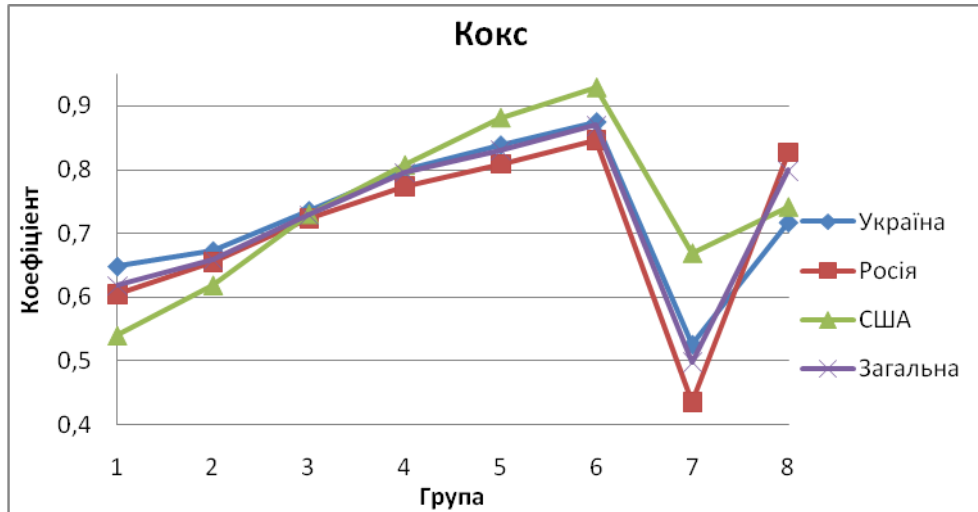


Рис. 3.1 Коefіцієнти переходу органічної маси петрографічних складових вугілля України, Росії, США в органічну масу основних хімічних продуктів коксування

Для прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування з міжбасейнових шихт були розроблені універсальні рівняння на основі даних загальної вибірки вугілля України, Росії та США, а також їх статистична оцінка (табл. 3.15).

В цілому, перехід вітринітової складової органічної маси вугілля в основні хімічні продукти коксування (кокс, смолу, сирий бензол, пірогенетичну воду) підпорядковується загальновідомій залежності. З ростом стадії метаморфізму вугілля вихід коксу збільшується, а смоли, сирого бензолу і пірогенетичної води зменшується [41].

Статистична оцінка адекватності даних рівнянь показала високі коефіцієнти кореляції від 0,970 до 0,997 і коефіцієнти детермінації від 94,0 до 99,5 %; стандартна похибка розрахунку при прогнозі виходу коксу складає 0,41 %, смоли – 0,28 %, сирого бензолу – 0,09 %, пірогенетичної води – 0,19 %, що не перевищує допустимої похибки визначення згідно ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходу хімічних продуктів коксування» і характеризує дані залежності як придатні для прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування на основі даних петрографічного аналізу.

3.4 Апробація розроблених математичних моделей прогнозу виходу основних продуктів коксування на міжбасейнових шихтах

Для підтвердження можливості прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування по рівнянням, розрахованим на основі об'єднаної вибірки, були виконані лабораторні коксування вугільних шихт, технологічні властивості та петрографічні характеристики яких наведені в табл. 3.16–3.17.

Розглядаючи дані табл. 3.16–3.17, варто відзначити, що представлені шихти характеризуються широким діапазоном зміни технологічних властивостей: зольність A^d змінюється від 7,8 до 11,0 %; вміст загальної сірки S_t^d від 0,60 до 1,78 %; вихід летких речовин V^{daf} від 26,3 до 35,0 %; товщина пластичного шару у від 13 до 19 мм.

Таблиця 3.15 – Рівняння прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування в залежності від петрографічного складу органічної маси вугілля, а також їх статистична оцінка

Рівняння	Статистична оцінка		
	<i>r</i>	<i>D</i> , %	<i>SE</i> , %
$B_{\kappa}^{daf}=0,6184 \cdot V_{tI}+0,6588 \cdot V_{tII}+0,7286 \cdot V_{tIII}+0,7954 \cdot V_{tIV}+0,8298 \cdot V_{tV}+0,8690 \cdot V_{tVI}+0,4978 \cdot L+0,7984 \cdot (I+Sv)$	0,997	99,5	0,41
$B_{cm}^{daf}=0,0838 \cdot V_{tI}+0,0742 \cdot V_{tII}+0,0586 \cdot V_{tIII}+0,0316 \cdot V_{tIV}+0,0254 \cdot V_{tV}+0,0085 \cdot V_{tVI}+0,1105 \cdot L+0,0198 \cdot (I+Sv)$	0,987	97,4	0,28
$B_{\sigma}^{daf}=0,0215 \cdot V_{tI}+0,0183 \cdot V_{tII}+0,0136 \cdot V_{tIII}+0,0093 \cdot V_{tIV}+0,0063 \cdot V_{tV}+0,0019 \cdot V_{tVI}+0,0382 \cdot L+0,0068 \cdot (I+Sv)$	0,970	94,0	0,09
$B_{ng}^{daf}=0,0630 \cdot V_{tI}+0,0582 \cdot V_{tII}+0,0443 \cdot V_{tIII}+0,0349 \cdot V_{tIV}+0,0312 \cdot V_{tV}+0,0277 \cdot V_{tVI}+0,0355 \cdot L+0,0223 \cdot (I+Sv)$	0,973	94,7	0,19

Таблиця 3.16 – Технологічні властивості і петрографічні характеристики
вугільних шихт

Шихта	Технічний аналіз, %			Пластометричні показники, мм	
	A^d	S_t^d	V^{daf}	x	y
1	8,1	1,72	35,0	29	16
2	8,2	1,31	31,9	26	15
3	8,2	1,62	31,5	27	17
4	8,8	1,00	31,3	31	19
5	8,1	1,59	31,2	28	18
6	9,2	1,37	29,9	27	18
7	9,7	1,73	29,8	30	15
8	10,0	1,78	29,3	25	15
9	8,3	0,80	28,6	6	13
10	9,1	1,08	28,3	14	14
11	9,6	0,95	28,0	18	13
12	8,8	0,81	27,8	16	14
13	7,8	0,60	27,2	14	14
14	11,0	0,92	26,3	34	17
Max	11,0	1,78	35,0	34	19
Min	7,8	0,60	26,3	6	13
Δ	3,2	1,18	8,7	28	6
Середнє значення	8,9	1,23	29,7	23	16

Середній довільний показник відбиття вітриніту R_0 варіюється в межах від 0,94 до 1,16 %; вміст мацералів групи вітриніту від 71 до 90 %; ліптиніту від 1 до 4 %; фюзенізованих компонентів від 9 до 27 %. Такий широкий діапазон даних обумовлений участю в шихті вугілля різних басейнів і країн, які, як зазначалося раніше, різні за своїми властивостями і характеристиками, що і зумовило різний вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з вивчених шихт (табл. 3.18).

Таблиця 3.17 – Технологічні властивості і петрографічні характеристики вугільних шихт

Шихта	Петрографічний склад (без урахування мінеральних домішок), %					Середній показник відбиття вітриніта, %	Стадії метаморфізму вітриніту, %						
	<i>Vt</i>	<i>Sv</i>	<i>I</i>	<i>L</i>	ΣOK		<i>R_o</i>	<0,50	0,50– 0,64	0,65– 0,89	0,90– 1,19	1,20– 1,39	1,40– 1,69
1	83	1	13	3	14	0,94	0	13	28	47	9	3	0
2	90	0	9	1	9	1,00	0	4	15	79	2	0	0
3	77	1	21	1	22	0,96	0	3	40	47	9	1	0
4	81	0	18	1	18	0,99	0	0	56	22	10	9	3
5	74	0	25	1	25	0,96	0	4	37	47	12	0	0
6	77	0	19	4	19	1,08	0	2	28	40	11	17	1
7	78	1	18	3	19	1,02	0	3	47	22	15	13	0
8	85	0	13	2	13	1,15	0	1	35	22	16	26	0
9	80	1	17	2	18	1,12	0	0	2	77	21	0	0
10	77	2	19	2	21	1,05	0	0	12	73	10	5	0
11	83	1	14	2	15	1,06	0	0	12	72	10	6	0
12	82	1	16	1	17	1,12	0	0	5	73	17	5	0
13	80	1	17	2	18	1,14	0	0	2	68	22	8	0
14	71	0	27	2	27	1,16	0	1	2	72	13	12	0
Max	90	2	27	4	27	1,16	0	13	56	79	22	26	3
Min	71	0	9	1	9	0,94	0	0	2	22	2	0	0
Δ	19	2	18	3	18	0,22	0	13	54	57	20	26	3
Середнє значення	80	1	18	2	18	1,05	0	2	23	54	13	8	0

Таблиця 3.18 – Вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з вугільних шихт,
отриманих в лабораторних умовах

Шихта	Вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування(<i>daf</i>), %								
	Кокс	Смола	Бензол	C _n H _m	NH ₃	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O _{пір}	Газ
1	71,29	5,88	1,60	0,67	0,36	0,67	0,84	4,45	14,24
2	72,25	5,52	1,47	0,48	0,33	0,48	0,94	4,71	13,82
3	71,82	5,15	1,45	0,68	0,44	0,53	1,33	4,42	14,18
4	72,51	5,45	1,33	0,58	0,30	0,23	1,06	4,21	14,33
5	73,07	5,17	1,39	0,71	0,33	0,51	1,23	4,23	13,36
6	73,83	4,94	1,26	0,53	0,33	0,40	0,89	3,99	13,83
7	72,89	5,23	1,48	0,59	0,34	0,68	0,79	4,03	13,97
8	74,33	4,94	1,32	0,57	0,33	0,63	0,97	3,88	13,03
9	74,30	4,99	1,27	0,56	0,35	0,20	1,05	3,75	13,53
10	73,70	4,97	1,37	0,52	0,32	0,45	0,58	4,05	14,04
11	74,28	4,92	1,36	0,44	0,33	0,49	0,62	4,30	13,26
12	74,46	4,75	1,24	0,54	0,35	0,19	1,01	3,88	13,58
13	75,74	4,3	1,16	0,60	0,34	0,17	0,90	4,00	12,79
14	75,70	4,15	1,23	0,48	0,35	0,19	0,94	3,48	13,48
Max	75,74	5,88	1,60	0,71	0,44	0,68	1,33	4,71	14,33
Min	71,29	4,15	1,16	0,44	0,30	0,17	0,58	3,48	12,79
Δ	4,45	1,73	0,44	0,27	0,14	0,51	0,75	1,28	1,54
Середнє значення	73,58	5,03	1,35	0,57	0,34	0,42	0,94	4,10	13,67

Таблиця 3.19 – Зіставлення фактичного и розрахункового виходу основних хімічних продуктів коксування

з вугільних шихт

Шихта	B_K^{daf}			B_{CM}^{daf}			B_O^{daf}			B_{ne}^{daf}		
	факт	розрах	$ \Delta $	факт	розрах	$ \Delta $	факт	розрах	$ \Delta $	факт	розрах	$ \Delta $
1	71,29	71,12	0,17	5,88	5,79	0,09	1,60	1,47	0,13	4,45	4,51	0,06
2	72,25	72,04	0,21	5,52	5,81	0,29	1,47	1,41	0,06	4,71	4,46	0,25
3	71,82	72,32	0,50	5,15	5,38	0,23	1,45	1,36	0,09	4,42	4,33	0,09
4	72,51	72,31	0,20	5,45	5,32	0,13	1,33	1,35	0,02	4,21	4,44	0,23
5	73,07	72,77	0,30	5,17	5,19	0,02	1,39	1,33	0,06	4,23	4,22	0,01
6	73,83	73,36	0,47	4,94	4,89	0,05	1,26	1,26	0,00	3,99	4,02	0,03
7	72,89	72,42	0,47	5,23	5,18	0,05	1,48	1,34	0,14	4,03	4,28	0,25
8	74,33	74,12	0,21	4,94	4,76	0,18	1,32	1,22	0,10	3,88	4,12	0,24
9	74,30	74,79	0,49	4,99	4,80	0,19	1,27	1,21	0,06	3,75	3,88	0,13
10	73,70	74,13	0,43	4,97	4,93	0,04	1,37	1,24	0,13	4,05	3,95	0,10
11	74,28	73,81	0,47	4,92	5,12	0,20	1,36	1,27	0,09	4,30	4,07	0,23
12	74,46	74,90	0,44	4,75	4,78	0,03	1,24	1,19	0,05	3,88	3,92	0,04
13	75,74	75,42	0,32	4,3	4,55	0,25	1,16	1,15	0,01	4,00	3,78	0,22
14	75,70	75,54	0,16	4,15	4,38	0,23	1,23	1,12	0,11	3,48	3,64	0,16
Max	75,74	75,54	0,50	5,88	5,81	0,29	1,60	1,47	0,14	4,71	4,51	0,25
Min	71,29	71,12	0,16	4,15	4,38	0,02	1,16	1,12	0,00	3,48	3,64	0,01
Середнє значення	73,58	73,50	0,35	5,03	5,06	0,14	1,35	1,28	0,08	4,10	4,12	0,15

У таблиці 3.19 наведено зіставлення фактичних і розрахункових даних з виходу коксу, смоли, бензолу і пірогенетичної води. Розрахункові значення були отримані в такий спосіб: за результатами петрографічного і технічного аналізу середньомісячних шихт розраховувався петрографічний склад органічної маси шихти по групах відповідно до табл. 3.13.

Використовуючи рівняння прогнозу з табл. 3.19 і розділення за петрографічними групами, розраховуємо вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування на сухий незолений стан з органічної маси шихти. Обчислюємо результати визначення виходу коксу з точністю до третього десяткового знака і округляємо до другого десяткового знака.

Аналіз даних, наведених в табл. 3.19, показує, що стандартна похибка розрахунку при прогнозі виходу коксу складає 0,35 %; смоли – 0,14 %; бензолу – 0,08 %; пірогенетичної води – 0,15 %, що не перевищує допустимої похибки визначення цих продуктів за ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходу хімічних продуктів коксування».

Висновки за розділом 3

1. Експериментально обґрунтована можливість прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за результатами визначення елементного і петрографічного складів вугілля (шихти).

2. Вперше у вітчизняній практиці отримані нові експериментальні дані щодо виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування згідно ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходів хімічних продуктів коксування» з вугілля України, Росії та США.

3. Визначено внесок окремих груп петрографічних складових вугілля України, Росії та США у вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування.

4. Вперше розроблені і успішно апробовані на лабораторних шихтах математичні моделі прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, засновані на даних петрографічного аналізу, що враховують запропоноване угруповання петрографічних складових.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ПЕТРОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ ВУГІЛЛЯ І ШИХТ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИХОДУ ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ

У роботах [69, 96, 97] теоретично і експериментально доведена можливість прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за результатами визначення петрографічного складу вугілля і шихт. У лабораторних умовах визначено вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування з окремих груп петрографічних складових вугілля України, Росії та США.

4.1 Оцінка технологічних властивостей і петрографічних характеристик виробничих шихт і виходу основних продуктів коксування

Для апробації розробленого методу прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за даними петрографічного аналізу обрані Алчевський і Макіївський коксохімічні заводи. Технологія виробництва коксу на ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» включає в себе як традиційне коксування навалної вугільної шихти (бат. 5–8) з мокрим гасінням коксу, так і технологію ترامбування з мокрим (бат. 9-біс) і сухим (бат. 10-біс) гасінням коксу [98–100]; на ПрАТ «МАКІЇВКОКС» використовується коксування навалної вугільної шихти (бат. 1–4) з мокрим гасінням коксу [98, 101–103].

Аналізували заводські середньомісячні дані щодо виходу основних продуктів коксування і технічного аналізу виробничих шихт. Петрографічні характеристики середньомісячних шихт розраховували за марочним і компонентним складами з урахуванням даних заводів і ДП «УХІН» щодо петрографічних характеристик вугілля окремих постачальників, що входять в сировинну базу заводів.

У табл. 4.1 наведені максимальні, мінімальні, середні значення, а також інтервал коливань значень показників технологічних властивостей вугільних шихт, що надходили на коксові батареї в аналізований період.

Таблиця 4.1 – Технологічні властивості вугільних шихт

Батарея	Значення	Технологічні властивості, %				
		W^r_t	A^d	S^d_t	V^d	V^{daf}
ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС»						
5–8	Мах	11,1	8,8	1,87	30,0	32,8
	Мін	8,7	8,1	1,01	24,9	27,2
	Інтервал	2,4	0,7	0,86	5,1	5,6
	Середнє	10,0	8,6	1,49	27,4	29,6
9-біс	Мах	12,3	8,9	1,54	31,7	34,6
	Мін	10,9	7,7	0,92	25,8	28,2
	Інтервал	1,4	1,2	0,62	5,9	6,5
	Середнє	11,5	8,4	1,30	28,2	30,7
10-біс	Мах	11,5	8,9	1,46	31,7	34,6
	Мін	10,9	7,7	0,92	26,3	28,7
	Інтервал	0,6	1,2	0,54	5,4	5,9
	Середнє	11,3	8,4	1,27	28,3	30,9
ПрАТ «МАКІЇВКОКС»						
1–4	Мах	10,6	8,5	0,91	27,4	29,9
	Мін	7,4	7,8	0,70	24,7	26,8
	Інтервал	3,2	0,7	0,21	2,7	3,1
	Середнє	8,7	7,9	0,78	25,4	27,6

Дані табл. 4.1 свідчать, що трамбована вугільна шихта, яка надходить на батареї 9, 10-біс, внаслідок певних особливостей технології трамбування [104, 105] характеризується підвищеними середніми значеннями загальної вологи ($W^r_{t\text{ сеп}}=11,3-11,5\%$) в порівнянні з навалльною шихтою, що надходить на

батареї 5–8 ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» – 10,0 % і батареї 1–4 ПрАТ «МАКІЇВКОКС» – 8,7 %.

Зольність і вміст загальної сірки нижче у вугільних шихт ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» для трамбування $A_{сер}^d = 8,4$ % і $S_{t, сер}^d = 1,27–1,30$ % проти 8,6 і 1,49 %.

Вихід летких речовин на сухий знезолений стан внаслідок підвищеного вмісту газового вугілля в шихті для трамбування вище і становить в середньому 30,7–30,9 %, а у навальних шихт – 29,6 і 27,6 %.

У табл. 4.2 наведені дані петрографічного аналізу вугільних шихт, використаних при статистичній обробці.

Вугільна шихта бат. 5–8 має величину середнього довільного показника відбиття вітриніту, рівну 1,05 %. Шихта містить 79 % мацералів групи вітриніту і 19% фюзенізованих компонентів.

Вугільні шихти бат. 9, 10-біс характеризуються невисокими значеннями середнього довільного показника відбиття вітриніту ($R_{0, сер} = 0,97$ %). Технологія трамбування дозволяє використовувати в шихті підвищену кількість петрографічно неоднорідного вугілля, що знайшло відображення в кількості фюзенізованих компонентів ($\Sigma OK_{сер} = 25$ %).

Середнє значення величини середнього довільного показника відбиття вітриніту вугільної шихти ПрАТ «МАКІЇВКОКС» становить 1,11 %. Шихта містить 85 % мацералів групи вітриніту і 13 % фюзенізованих компонентів, семівітриніт і ліптиніт містяться в незначних кількостях (до 2 %).

Відмінності в показниках якості шихти, природно, мають позначитися на виході з них коксу і основних хімічних продуктів коксування.

У табл. 4.3 наведені використані для статистичної обробки виробничі дані з виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування з вугільних шихт. Значення результатів визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування наведений на сухий (d) і сухий знезолений (daf) стан.

Таблиця 4.2 – Петрографічні характеристики вугільних шихт

Батарей	Значення	Середній показник відбиття вітриніту, R ₀ , %	Петрографічний склад, %					Стадії метаморфізму вітриніта, %						
			Vt	Sv	I	L	ΣOK	< 0,50	0,50–0,64	0,65–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС»														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5–8	Мах	1,17	86	2	23	3	24	1	7	40	57	39	25	2
	Мін	0,96	73	0	11	1	12	0	2	19	17	6	1	0
	Інтервал	0,21	13	2	12	2	12	1	5	21	40	33	24	2
	Середнє	1,05	79	1	18	2	19	0	4	28	41	17	9	1
9-біс	Мах	1,13	82	1	31	6	32	2	14	53	46	10	28	6
	Мін	0,89	65	0	15	2	15	0	4	31	24	2	0	0
	Інтервал	0,24	17	1	16	4	17	2	10	22	22	8	28	6
	Середнє	0,97	71	1	25	3	25	1	9	41	35	7	6	2
10-біс	Мах	1,13	82	1	31	6	32	2	14	53	46	10	28	6
	Мін	0,89	65	0	15	2	15	0	4	31	24	2	0	0
	Інтервал	0,24	17	1	16	4	17	2	10	22	22	8	28	6
	Середнє	0,97	71	1	25	3	25	1	9	41	35	7	6	2

Продовження таблиці 4.2

ПрАТ «МАКІЇВКОКС»														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1-4	Max	1,18	89	1	17	2	18	2	16	6	91	34	3	0
	Min	0,97	80	0	9	1	10	0	0	0	60	7	0	0
	Інтервал	0,21	9	1	8	1	8	2	16	6	31	27	3	0
	Середнє	1,11	85	0	13	2	13	0	3	3	75	19	0	0

Таблиця 4.3 – Вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування

Батарея	Значення	Вихід основних хімічних продуктів коксування, %					
		B_K^d	B_K^{daf}	B_{CM}^d	B_{CM}^{daf}	B_O^d	B_O^{daf}
ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС»							
5–8	Мах	78,49	76,59	4,48	4,89	1,30	1,42
	Мін	76,05	73,83	2,92	3,20	0,98	1,07
	Інтервал	2,44	2,76	1,56	1,70	0,32	0,35
	Середнє	77,24	75,11	3,61	3,95	1,13	1,23
9-бис	Мах	76,06	73,78	4,75	5,18	1,39	1,52
	Мін	72,71	70,21	3,09	3,39	1,04	1,13
	Інтервал	3,35	3,57	1,66	1,80	0,34	0,39
	Середнє	74,22	71,87	3,82	4,17	1,19	1,30
10-бис	Мах	74,66	72,25	4,75	5,18	1,39	1,52
	Мін	71,62	68,99	3,09	3,39	1,04	1,13
	Інтервал	3,04	3,26	1,66	1,80	0,34	0,39
	Середнє	72,71	70,23	3,82	4,17	1,19	1,30
ПрАТ «МАКІЇВКОКС»							
1–4	Мах	80,39	78,72	3,79	4,13	1,28	1,39
	Мін	75,98	73,83	3,11	3,38	1,04	1,13
	Інтервал	4,41	4,89	0,68	0,75	0,24	0,26
	Середнє	77,68	75,75	3,41	3,70	1,15	1,25

Перерахунок даних з сухого стану на знезолений, як показано в роботі [74], дозволяє усунути вплив різної зольності на кількість хімічних продуктів коксування і оцінити хімічний потенціал виключно органічної складової вугільної речовини.

Середній вихід коксу, як на сухий, так і на сухийзнезолений стан вище при коксуванні навальної шихти, ніж при використанні технології трамбування. Використання технології сухого гасіння коксу на батареї 10-бис призводить, в порівнянні з батареєю 9-бис, до зниження виходу коксу на 1,42 % (на сухий стан) і на 1,64 % (на сухий знезолений стан). Необхідно відзначити, що внаслідок більшого виходу летких речовин з вугільних шихт бат. 9, 10-бис вихід смоли і бензолу з них теж трохи вище, ніж з вугільних шихт, що коксують на бат. 5–8 ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» і бат. 1–4 ПрАТ «МАКІЇВКОКС».

4.2 Розробка коефіцієнтів перерахунку від лабораторних значень виходу основних продуктів коксування до промислових

Для зіставлення лабораторних і заводських значень виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування дані розрахункових петрографічних характеристик середньомісячних виробничих шихт ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» і ПрАТ «МАКІЇВКОКС» були підставлені в наведені в табл. 3.19 рівняння, за якими розраховані очікувані значення виходу коксу і продуктів коксування з цих шихт, які були б отримані при коксуванні їх в 20-г лабораторній печі.

Розрахункові значення були зіставлені з заводськими даними про вихід продуктів коксування цих же шихт і розраховані середні коефіцієнти перерахунку від лабораторних значень до виробничих даних за формулами 4.1, 4.2, а також середня помилка розрахунку виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Коефіцієнти перерахунку від лабораторних (розрахункових) значень до промислових

Батарей	Продукт	Коефіцієнт перерахунку	Стандартна помилка розрахунку (SE, %)
ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС»			
5–8	B_K^{daf}	1,0227	0,384
	B_{cm}^{daf}	0,7914	0,134
	B_o^{daf}	0,9618	0,049
9-бис	B_K^{daf}	0,9991	0,290
	B_{cm}^{daf}	0,7851	0,111
	B_o^{daf}	0,9423	0,036
10-бис	B_K^{daf}	0,9763	0,290
	B_{cm}^{daf}	0,7851	0,111
	B_o^{daf}	0,9423	0,036
ПрАТ «МАКІЇВКОКС»			
1–4	B_K^{daf}	1,0230	0,408
	B_{cm}^{daf}	0,7326	0,168
	B_o^{daf}	0,9945	0,041

$$k_i = B_i^{\phi} / B_i^p, \quad (4.1)$$

де k_i – коефіцієнт перерахунку від розрахункового значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування до виробничого;

B_i^{ϕ} – виробниче значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, %;

B_i^p – розрахункове значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, %;

$$\bar{k} = \frac{k_1 + \dots + k_i}{i}, \quad (4.2)$$

де k – середній коефіцієнт перерахунку від розрахункового значення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування до виробничого;

i – кількість використаних в розрахунку значень.

Дані табл. 4.4 свідчать, що вихід коксу, отриманий в лабораторних умовах, близький до виробничого ($K = 0,9763-1,0230$), а вихід смоли і бензолу в лабораторних умовах трохи завищений ($K = 0,7851-0,7914$ і $0,9423-0,9618$ відповідно), що підтверджує думку авторів роботи [62] «...лабораторні виходи і не можуть збігатися з виробничими, так як неминучі в заводських умовах втрати хімічних продуктів в лабораторних умовах усунені до мінімуму».

Авторами роботи [74] зроблено аналіз співвідношення виробничих і лабораторних (5-секційна піч згідно ГОСТ 18635–73 [50]) даних виходу коксу, смоли і бензолу з вугільних шихт однакової якості. Був зроблений висновок, що вихід коксу в лабораторних умовах збігається з виробничим на 99 %, смоли на 89 % і бензолу на 96 %.

Таким чином, співвідношення між лабораторними і виробничими значеннями, що отримані як в роботі [62], так і в цьому дослідженні, дуже близькі [106].

За підсумками виконаного дослідження для ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» була розроблена методика розрахунку виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування на основі даних петрографічного аналізу шихт, що враховують умови підготовки шихти і гасіння коксу (Додаток І).

4.3 Порівняльний аналіз прогнозу виходу основних продуктів коксування за даними петрографічного аналізу і виходу летких речовин

Для порівняння було проаналізовано точність прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, які отримані згідно «Методичних рекомендацій з планування об'ємів виробництва основних видів продукції на коксохімічних підприємствах України» [22].

Вихід коксу розраховувався за наведеними нижче рівняннями:

– для батарей с пічами висотою до 6,0 м включно

$$B_{\kappa}^d = 47,1 + 0,421 \frac{100 - V_{uu}^d}{100 - V_k^d} 100 \quad (4.3)$$

де V_{uu}^d – вихід летких речовин з шихти, на суху масу, %;

V_k^d – вихід летких речовин з кокса, на суху масу, %.

– при коксуванні трамбованої шихти:

$$B_{\kappa}^d = 94,5 - 0,68V_{uu}^{daf} + 0,0025(V_{uu}^{daf})^2 \quad (4.4)$$

де V_{uu}^{daf} – вихід летких речовин з шихти, перерахований на органічну масу, %.

Вихід смоли, бензолу і коксового газу:

– для батарей с пічами висотою до 6,0 м включно

$$B_{cm} = 8,23 - 0,55V_{uu}^d + 0,0144(V_{uu}^d)^2 \quad (4.5)$$

$$B_{\sigma} = 2,91 - 0,199V_{uu}^d + 0,0044(V_{uu}^d)^2 \quad (4.6)$$

– при коксуванні трамбованої шихти:

$$B_{cm} = 8,086 - 0,49V_{uu}^d + 0,0128(V_{uu}^d)^2, \quad (4.7)$$

$$B_o = 3,10 - 0,203V_{uu}^d + 0,0044(V_{uu}^d)^2. \quad (4.8)$$

Внаслідок того факту, що в Методичних рекомендаціях [22] вихід коксу і хімічних продуктів коксування в більшості рівнянь розраховується на сухий стан (d), отримані значення були перераховані на сухий знезолений стан (daf).

У табл. 4.5 наведені значення стандартної помилки прогнозування виходу коксу, смоли і бензолу за петрографічними показниками і виходу летких речовин.

Таблиця 4.5 – Стандартна похибка при прогнозуванні виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за петрографічними показниками і виходу летких речовин

Батарей	Продукт	Стандартна похибка розрахунку (SE, %):	
		Петрографічний склад	Вихід летких речовин
ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС»			
5–8	B_{κ}^{daf}	0,384	0,761
	B_{cm}^{daf}	0,134	0,224
	B_o^{daf}	0,049	0,047
9-біс	B_{κ}^{daf}	0,290	0,795
	B_{cm}^{daf}	0,111	0,276
	B_o^{daf}	0,036	0,059
10-біс	B_{κ}^{daf}	0,290	0,701
	B_{cm}^{daf}	0,111	0,243
	B_o^{daf}	0,036	0,054
ПрАТ «МАКІЇВКОКС»			
1–4	B_{κ}^{daf}	0,408	0,477
	B_{cm}^{daf}	0,168	0,203
	B_o^{daf}	0,041	0,076

Зіставлення величин стандартної помилки при прогнозі виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за даними петрографічного дослідження вугільних шихт і виходом летких речовин довело, що прогноз з використанням петрографічних показників характеризується більш низькими значеннями стандартної помилки розрахунку, що зумовлює перевагу його використання.

Висновки за розділом 4

1. Експериментально підтверджена можливість прогнозування виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування за результатами визначення петрографічного складу вугільних шихт.

2. Встановлено коефіцієнти перерахунку від лабораторних даних з виходу коксу і хімічних продуктів коксування до виробничих, що дозволяє ретельніше планувати продукцію коксохімічного виробництва.

3. Розроблено Методику розрахунку виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування для умов ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС».

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод прогнозу виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування з міжбасейнових вугільних шихт за участю петрографічно неоднорідного вугілля, який враховує внесок елементного складу і петрографічних складових індивідуального вугілля і шихт у вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування.

2. Удосконалено метод визначення виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування згідно ГОСТ 18635–73 в частині діапазону значень виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, робочих температур проведення коксування, використовуваних реактивів і матеріалів, збіжності результатів визначення виходу сирого бензолу, ненасичених вуглеводнів і діоксиду вуглецю, а також форми наведення результатів. На підставі того, що вихід коксу і основних хімічних продуктів коксування на сухий (*d*) і сухий знезолений (*daf*) стан помітно різняться, вперше запропоновано при прогнозуванні виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування враховувати зольність вугілля (шихти). З урахуванням виконаних досліджень розроблено та стандартизовано ДСТУ 7689:2015 «Вугілля кам'яне. Метод визначення виходів хімічних продуктів коксування».

3. Вперше дана кількісна оцінка виходу основних продуктів коксування петрографічних груп вугілля України, Росії та США. Встановлено близькість значень виходу основних продуктів коксування однойменних петрографічних груп для вугілля України, Росії та США, що дозволило розрахувати виходи основних продуктів коксування однойменних петрографічних груп для загальної вибірки, що включає вугілля всіх басейнів.

4. Розроблено Методику розрахунку виходу коксу і основних хімічних продуктів коксування, що враховують умови коксування, яка використовується у виробничій діяльності ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковалев Е.Т. Влияние качества угольной шихты на реакционную способность, послереакционную прочность кокса и технико-экономические показатели доменного процесса / Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга, А.И. Рыщенко, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко // Углекимический журнал. 2008. – №3–4. – С. 41–48.
2. Кафтан Ю.С. Взаимосвязь органической и минеральной частей угольной шихты с «холодной» и «горячей» прочностью кокса / Ю.С. Кафтан, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко и др. // Углекимический журнал. 2007. – №3–4. – С.3–13.
3. Ковалев Е.Т. Возможность получения высококачественного низкорекционного металлургического кокса в условиях существующей угольной сырьевой базы Украины / Е.Т. Ковалев, И.Д. Дроздник // Углекимический журнал. 2010. – №3–4. –С.4–11.
4. Дроздник И.Д. Совершенствование схем подготовки углей в условиях межбассейновой сырьевой базы коксования / И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, В.М. Ладыжинский, Ю.В. Бессчастный, Н.И. Топоркова // Углекимический журнал. 2010. – №3–4. – С.11–17.
5. Городецкий Н.И. Организация и планирование на предприятиях коксохимической промышленности / Н.И. Городецкий, Г.П. Кулиш, Е.М. Рабинович. – Москва : Металлургия, 1975. – 376 с.
6. Диденко В.Е. Организация коксохимического производства / В.Е. Диденко, М.М. Дмитриев, В.А. Лейтс и др. – Харьков : Металлургиздат, 1961. – 462 с.
7. Диденко В.Е. К вопросу о выходе кокса из шихты / В.Е. Диденко // Кокс и химия. 1977. – №2. – С. 13–17.
8. Аксенин Н.П. Материальный баланс процесса коксования угольных шихт с высоким выходом летучих веществ / Н.П. Аксенин, В.А. Доленко // Кокс и химия. 1991. – №2. – С. 10–13.

9. Аксенин Н.П. Влияние скорости нагрева шихты на выход валового кокса / Н.П. Аксенин, В.П. Михно // Производство кокса. Тематический сборник научных трудов / МЧМ СССР (УХИН). Москва : Metallurgy, 1973.– С. 100–107.
10. Улановский М.Л. Еще раз о «припеке» кокса / М.Л. Улановский // Кокс и химия. 1991. – №12. – С.23–24.
11. Справочник коксохимика в 6-ти томах. Том 6. Экономика, организация и управление коксохимическим предприятием / Под ред. А.М. Приступы, Е.И. Котлярова, В.А. Корниловой. – Харьков : Издательский дом «ИНЖЭК», 2010. –320 С.
12. Лобов А.А. Прогноз выхода кокса от шихты в условиях промышленного коксования / А.А. Лобов, Э.И. Торяник, В.М. Кузниченко [и др.] // Кокс и химия. 2003. – №8. – С.13–18.
13. Сухоруков В.И. О выходе кокса в промышленных условиях / В.И. Сухоруков, Ю.В. Степанов // Кокс и химия. 2001. – №3. – С.36–44.
14. Мадар А.Е. Расчет выхода валового кокса по результатам коксования шихты в «спутниках» / А.Е. Мадар // Кокс и химия. 2008. – №1. – С.16–22.
15. Инструкция по нормированию расхода сырья и материалов в производстве кокса и коксохимической продукции, раздел III. – Москва : Минчермет СССР, 1969 г.
16. Улановский М.Л. Влияние выхода летучих веществ и зольности шихты на выход кокса / М.Л. Улановский // Кокс и химия. 1990. – №10. – С.51–52.
17. Телешев Ю.В. Исследование и разработка способов управления выходом и качеством продуктов коксохимического производства. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Харьков, 1997 г. – 150 с.
18. Телешев Ю.В. Составление и исследование материального баланса коксования / Ю.В. Телешев, С.И. Кауфман, М.С. Шептовицкий [и др.] // Кокс и химия. 1997. – №1. – С.19–25.

19. Телешев Ю.В. Опыт определения выхода кокса в промышленных условиях / Ю.В. Телешев, И.В. Шульга, М.С. Шептовицкий // Кокс и химия. 1997. – №1. – С.16–18.
20. Золотарев И.В. К вопросу об определении выхода валового кокса из угольных шихт / И.В. Золотарев, И.Н. Вегеря, В.Н. Дудяк, А.В. Карпов, Э.И. Торяник // Углекимический журнал. 2003. – №3–4. – С.35–39.
21. Аксенин Н.П. Об определении выхода кокса (Обзор) / Н.П. Аксенин, А.Н. Крюков, Л.П. Семисалов // Кокс и химия. 1984. – №7. – С.23–25.
22. Методические рекомендации по планированию объемов производства основных видов продукции на коксохимических предприятиях Украины. Утверждена на заседании Совета директоров УНВА «Укркокс» 24.05.2002 г. Днепропетровск – Харьков, 2002. – 102 с.
23. Обзор докладов на 16-й специальной конференции по коксу // Неире кокайси. 1953. – V.32 (316). – P.461–470.
24. Михно В.П. Исследование зависимости физико-механических свойств и выхода кокса от режима коксования / В.П. Михно, М.Г. Скляр, М.В. Лурье и др. // Кокс и химия. 1975. – №2. – С. 8–12.
25. Журавский А.А. О производстве кокса в печных камерах большого объема / А.А. Журавский, И.В. Сытенко, З.С. Жупранер [и др.] // Кокс и химия. 1990. – №8. – С.9–12.
26. Справочник коксохимика (Под редакцией А.К. Шелкова). – Москва : Металлургия, 1965. – т. II. – С.11.
27. Дроздник И.Д. Химический потенциал различных типов углей в классификации по генетическим и технологическим параметрам / И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, С.Д. Меньшикова, С.С. Торяник, А.И. Вирозуб, В.И. Ромась, Т.Н. Борисова, Л.С. Янкович // Кокс и химия. 1990. – №8. – С.2–3.
28. Аронов С.Г. Выходы химических продуктов коксования в зависимости от содержания летучих веществ / С.Г. Аронов, Р.Л. Мишулович // Кокс и химия. 1938. – №1. – С.20–24.

29. Теория и практика производства кокса улучшенного качества: Монография / Ю.В. Филатов, Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга, С.И. Кауфман, А.И. Коломийченко // Под редакцией С.Л. Ярошевского. – Киев: Наукова думка, 2011. –128 с.
30. Дроздник И.Д. Основные этапы работы института в области разработки сырьевой базы коксования заводов Украины / И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, М.Л. Улановский // Углекимический журнал. 2005. – №3–4. – С.11–16.
31. Дроздник И.Д. Межбассейновая сырьевая база коксохимического производства Украины: отечественная и импортная составляющие / И.Д. Дроздник, Н.А. Десна, Н.Б. Бидоленко // Углекимический журнал. 2019. – №6. – С.4–7.
32. Дроздник И.Д. Угли для коксования и пылеугольного топлива / И.Д. Дроздник, А.Г. Старовойт, В.Г. Гусак, Ю.В. Филатов // Харьков: ИПЦ «Контраст», 2011 г. – 188 с.
33. Козина О.Я. Влияние марочного состава угольной шихты и температурного режима коксования на выход и качество химических продуктов / О.Я. Козина, Т.И. Некрасова // Кокс и химия. 2008. – №2. – С.42–43.
34. Золотарёв И.В. Формирование механической прочности и ситового состава доменного кокса, полученного из шихт с различным участием угля ОАО «УК «Шахта «Красноармейская Западная № 1» / И.В. Золотарёв, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Кафтан, И.В. Шульга, Э.И. Торяник, Н.Б. Бидоленко, Ю.В. Бессчастный, М.Б. Головкин, А.В. Сытник, А.Р. Давидзон // Углекимический журнал. 2010. – № 3–4. – С. 31–37.
35. Еремин И.В. Петрология и химико-технологические параметры углей Кузбасса / И.В. Еремин, А.С. Арцер, Т.М. Броневец. – Кемерово, 2001. – 399 с.
36. Еремин И.В. Марочный состав углей и рациональное использование / И.В. Еремин, Т.М. Броневец.– Москва : «Недра». 1994. –256 с.

37. Еремин И.В. Петрография и физические свойства углей / И.В. Еремин, В.В. Лебедев, Д.А. Цикарев.– Москва : «Недра», 1980. –263 с.
38. Нестеренко Л.Л. Основы химии и физики горючих ископаемых / Л.Л. Нестеренко, Ю.В. Бирюков, В.А. Лебедев.– Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1987. –359с.
39. Tchamler H. Exinit-Vitrinit-Micrinit / H. Tchamler, E. de Ruiter // Brennstofe-Chemie. – Bd.46. – 1965. – №4.
40. Kroger C. Eigenschaften und chemische constitution der Steinkohlemacerale. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Kohl und Opladen, 1959.
41. Глущенко И.М. Петрографическая характеристика и ее значение для оценки свойств углей / И.М. Глущенко. – Издательство «Недра». Москва, 1971. –113 с.
42. Нестеренко Л.Л. Особенности химической структуры и свойств микрокомпонентов каменных углей / Л.Л. Нестеренко // Труды лаборатории геологии угля АН СССР. Москва : 1956. – №6.
43. Майер Л.М. Влияние фузита на спекающую способность углей / Л.М. Майер // Кокс и химия. 1933. – №4. –С. 32–38.
44. Дьяконов В. П. Mathcad 2001. Учебный курс // С.Пб. Питер. – 2001. – 624 с.
45. Дьяконов В. П. Энциклопедия Mathcad 2001i, 11. Библиотека профессионала // М.: Солон-Пресс. 2004. – 832 с.
46. Войткевич Г.В. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных, В.Г. Прохоров // Издание 2-е перераб. и доп. - М. «Недра». 1977. –184 с.
47. Мукина Н.В. Прогноз выхода химических продуктов коксования по данным элементного анализа исходных углей / Н.В. Мукина, С.П. Жадан, Е.П. Черноусова, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, М.Б. Головкин, Н.А. Десна // Углекимический журнал. 2011. - № 3–4. – С. 12–19.

48. Горелов П.Н. Химические продукты коксования и состав коксового газа в зависимости от степени окисленности углей / П.Н. Горелов, М.С. Котеленец // Кокс и химия. 1985. – №5. – С.20–22.
49. Десна Н.А. Использование окисленных углей при коксовании (Обзор) / Н.А. Десна, Д.В. Мирошниченко // Кокс и химия. 2011. – №5. – С.2–9.
50. Угли каменные. Метод определения выхода химических продуктов коксования: ГОСТ 18635–73. – [Действующий от 1974–01–01]. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1973. – 11 с. – (Межгосударственный стандарт).
51. Угли каменные. Метод определения коксумости: ГОСТ 9521–74. – [Действующий от 1975–07–01]. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1975. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).
52. Августевич И.В. Стандартные методы испытания углей. Классификация углей / И.В. Августевич, Т.М. Броновец, Г.С. Головин [и др.]. – М.: НТК «Трек», 2008. – 368 с.
53. ПГ 401–548–72 «Угли каменные. Метод определения коксумости в 2-камерной лабораторной печи».
54. Справочник коксохимика. Т. I. Угли для коксования. Обогащение углей. Подготовка углей к коксованию [под общ.ред. Борисова Л.Н., Шаповала Ю.Г.]. – Харьков: ИД ИНЖЭК, 2010. – 536с.
55. Улановский М.Л. Моделирование процесса коксования в лабораторных условиях / М.Л. Улановский, Д.В. Мирошниченко // Кокс и химия. 2002. – № 7. – С. 40–42.
56. Головки М.Б. Особенности метода определения выхода основных химических продуктов коксования / М.Б. Головки // Збірник тез доповідей V-ої Науково-технічної конференції «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості», 9–12 червня 2009р. м. Львів, 2009. – С. 293–294.
57. Рубчевский В.Н. Разработка количественных зависимостей прогноза выхода кокса и основных химических продуктов коксования / В.Н. Рубчевский, Ю.А. Чернышов, С.А. Овчинникова, А.И. Компаниец, И.Д. Дроздник,

Д.В. Мирошниченко, М.Б. Головкин, Е.Б. Прибавкина // Кокс и химия. 2009. – № 4. – С. 11–16.

58. Головкин М.Б. Разработка и апробация альтернативных методов прогноза выхода химических продуктов коксования / М.Б. Головкин // Материалы международной научно-технической конференции «Метинвест-2011», 1–4 июля 2011 г. – г. Мариуполь, 2011. – С. 10.

59. Головкин М.Б. Прогнозування виходу коксу та хімічних продуктів коксування на підставі даних петрографічного аналізу вугілля (шихти) / М.Б. Головкин, Д.В. Мирошниченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Microcad-2008», 4–6 червня 2008р. – Харків, 2008. – С. 8.

60. Котеленец М.С. Автоматическое регулирование температурного режима лабораторного аппарата для определения выхода химических продуктов коксования / М.С. Котеленец, А.И. Золотухин, Л.В. Носкова, В.С. Новиков // Кокс и химия. 1972. – № 1. – С. 28–33.

61. Котеленец М.С. Уточнение лабораторного метода определения выходов химических продуктов коксования / М.С. Котеленец, А.И. Золотухин // Кокс и химия. 1960. – № 4. – С. 41–48.

62. Котеленец М.С. К стандартизации лабораторного метода определения выхода химических продуктов коксования / М.С. Котеленец, В.Н. Новиков, П.Н. Горелов Л.В. Носкова // Кокс и химия. 1977. – № 3. – С. 32–34.

63. Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація.: ДСТУ 3472–2015.– [Чинний від 2016–01–01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 4 с. (Національний стандарт України).

64. Угли. Термины и определения: ГОСТ 17070–87. [Действующий от 1989–07–01]. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1989. – 22 с. – (Межгосударственный стандарт).

65. Кокс кам'яновугільний і пековий. Терміни та визначення.: ДСТУ 2401–94. [Чинний від 1995–01–01]. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 24 с. (Національний стандарт України).

66. Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры: ГОСТ 25336–82. – [Действующий от 1984–01–01]. – Москва : Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1984. – 180 с. – (Межгосударственный стандарт).

67. Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань.: ДСТУ 4096–2002. [Чинний від 2003–01–01]. – Київ : Держстандарт України, 2003. – 35 с. (Національний стандарт України).

68. Угли каменные. Метод определения пластометрических показателей: ГОСТ 1186–87 (СТ СЭВ 5775–86). [Действующий от 1988–01–01]. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 17 с. (Межгосударственный стандарт).

69. Головки М.Б. Современное состояние вопроса прогнозирования выхода кокса и основных химических продуктов коксования / М.Б. Головки, Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. 2011. – № 9. – С. 45–52.

70. Газы горючие природные и искусственные. Метод определения объемной доли компонентов на комплектах для газовых анализов типа КГА.: ГОСТ 5439–76. [Действующий от 1977–01–01]. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1977. – 25 с. (Межгосударственный стандарт).

71. Мирошниченко Д.В. Использование петрографических характеристик углей для прогноза выхода основных продуктов коксования / Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Кафтан, И.Д. Дроздник, Н.Б. Бидоленко, М.Б. Головки, Е.Б. Прибавкина, В.Д. Григорьева // Углекимический журнал. 2009. – № 3–4. – С. 33–37.

72. Golovko M. The influence of petrographic characteristics of coals and blends for yield and quality coking products / M. Golovko, D. Miroschnichenko // «Koksownictwo 2010», Konferencja naukowo-techniczna, 6-8 pazdziernika 2010.

Wojskowy Zespól Wypoczynkowy w "Zakopanem", ul. S.N. Kubinka 101. 34–511 Koscieliską.

73. Скляр М.Г. Химия твердых горючих ископаемых / М.Г. Скляр, Ю.Б. Тютюнников. – Лабораторный практикум. Киев. 1985. – 247 с.

74. Дроздник І.Д. Стандартизування сучасних методів визначення якості вугільної сировини для коксування / І.Д. Дроздник, Д.В. Мірошніченко, М.Б. Головка, О.В. Іванова, Н.А. Десна // Углекимический журнал. 2011. – № 5–6. – С. 27–39.

75. Мірошніченко Д.В. Исследование кинетики окисления углей / Д.В. Мірошніченко, І.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, Е.В. Іванова, К.Н. Сорокотяга, Н.А. Десна // Кокс и химия. 2012. – № 6. – С. 9–18.

76. Мірошніченко Д.В. Исследование кинетики окисления углей / Д.В. Мірошніченко, І.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, Н.Б. Бидоленко, Н.А. Десна // Кокс и химия. 2012. – № 5. – С. 6–16.

77. Десна Н.А. Влияние степени окисленности углей на качество кокса // Казантип ЭКО-2012 инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения. XX Юбилейная международная научно-практическая конференция (4–8 июня 2012г., г. Щелкино, АР Крым). – Сборник трудов в 3 томах, том 1. – Харьков, 2012. – С. 161–171.

78. Гусак В.Г. Сравнительная оценка состава, строения и свойств равнометаморфизованных углей Донецкого бассейна и американских углей / В.Г. Гусак, І.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, Я.С. Балаева, Е.Б. Прибавкина // Кокс и химия. 2012. – № 4. – С. 24–30.

79. Давидзон А.Р. Особенности структурно-химических и технологических характеристик разновосстановленных углей Донбасса / А.Р. Давидзон, І.Д. Дроздник // Кокс и химия. 2007. – № 3. – С. 7–11.

80. Давидзон А.Р. Структурные особенности угля ш. «Красноармейская-Западная № 1» (Донбасс) как альтернативного сырья для коксования / А.Р. Давидзон, Т.Г. Шендрик, Л.В. Пащенко, В.В. Симонова // Сборник

научных статей XI Международной научно-технической конференции «Экология и здоровье человека», 9–13 июня 2003г. г. Щелкино, АР Крым, 2003. – т. 1. – С. 104–110.

81. Шендрик Т.Г. Структурные особенности образцов угля ш. «Красноармейская-Западная № 1» с различными пластометрическими характеристиками / Т.Г. Шендрик, В.В. Симонова, Л.В. Пащенко, А.Р. Давидзон // Тезисы доклада на научной-технической конференции «Процессы и технологии использования отходов химического производства». г. Донецк, 24–27 мая 2005 г.

82. Гюльмалиев А.М. Классификация горючих ископаемых по структурно-химическим показателям и основные пути использования ископаемых углей / А.М. Гюльмалиев, Г.С. Головин, С.Г. Гагарин // Москва : НТК «Трек», 2007 г. – 144 с.

83. Ван Кревелен Д.В. Наука об угле / Д.В. Ван Кревелен, Ж. Шуер. Москва : ГНТИ литературы по горному делу, 1960. – 304 с.

84. Гульмалиев А.М. Теоретические основы химии угля / А.М. Гульмалиев, Г.С. Головин, Т.Г. Гладун.–М. Изд-во МГГУ, 2003. – 556 с.

85. Гагарин С.Г. Оценка степени ароматичности структуры бурых углей / С.Г. Гагарин, Е.Б. Леснокова, Л.В. Шуляковская // Химия твердого топлива. 1993. – № 1. – С. 3–11.

86. Веселовский В.С. Химическая природа горючих ископаемых. / В.С. Веселовский. Изд-во Академии наук СССР. – Москва, 1955. – 424 с.

87. Улановский М.Л. Анализ структурных параметров углей Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов / М.Л. Улановский // Кокс и химия. 2012. – № 2. – С. 2–7.

88. Гагарин С.Г. Регрессионный анализ состава и свойств мацералов разновосстановленных углей Кузбасса / С.Г. Гагарин // Кокс и химия. 1998. – № 2. – С.2–6.

89. Гагарин С.Г. Состав и свойства мацералов углей / С.Г. Гагарин, Н.Н. Уланов // Кокс и химия. 1997. – № 4. – С. 7–13.

90. Штах Э. Петрология углей / Э. Штах, Т. М. Маковски, Техмюллер. – МОСКВА : Мир, 1978. – 555 с.
91. Еремин И.В. Единая промышленно-генетическая классификация углей СССР / И.В. Еремин, Т.М. Бронец, Л.Г. Ольшанецкий, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. 1983. – № 5. – С. 4–10.
92. Кафтан Ю.С. Развитие научных основ составления шихт из углей разных бассейнов / Ю.С. Кафтан, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, Н.Б. Бидоленко, М.Б. Головки // Углекимический журнал. 2010. – № 3–4. – С. 25–31.
93. Ильин В.А., Линейная алгебра: Учебник для вузов / В.А.Ильин, Э.Г.Позняк // 6-е изд., стер. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. –280 с.
94. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн // Москва : Наука, 1970. – С. 575–576.
95. Кремер Н.Ш. Высшая математика для экономистов / Н.Ш. Кремер, Б.А.Путко, И.М. Тришин, М.Н. Фридман // Под ред. Н.Ш. Кремера. – 3-е изд. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 479 с.
96. Головки М.Б. Использование данных элементного и петрографического анализов углей для прогнозирования выхода химических продуктов коксования / М.Б. Головки, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. 2012. – № 6. – С. 9–18.
97. Головки М.Б. Вплив петрографічної характеристики вугілля на вихід з нього продуктів коксування / М.Б. Головки, Д.В. Мірошниченко // Збірник тез доповідей V-ої Науково-технічної конференції „Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості”, 25–28 квітня 2012 р. м. Львів, 2012. – С. 293–294.
98. Анализ состояния и учет печного фонда и основных цехов коксохимических предприятий Украины (по состоянию на 01.01.2010 года) // НИР-6277. Гипрококс. Харьков, 2010 г. – 20 с.
99. Ковалев Е.Т. Теория и практика производства доменного кокса высокого качества из трамбованных шихт пониженной спекаемости /

Е.Т. Ковалев, Ю.С. Васильев, В.М. Кузниченко, В.В. Кривонос, А.Б. Данилов, М.А. Соловьев // Углекимический журнал. 2009. – № 3–4. – С. 24–30.

100. Данилов А.Б. Реконструкция цеха улавливания на основе современных решений – приоритетное направление развития ОАО «Алчевсккокс» // А.Б. Данилов, Р.А. Хачтрян, Е.Т. Ковалев, Л.П. Банников // Углекимический журнал. 2009. – № 3–4. – С. 64–68.

101. Коломийченко А.И. на ведущих позициях развития коксохимической отрасли страны (к 80-летию Макеевского коксохимического завода) / А.И. Коломийченко // Углекимический журнал. 2012. – № 5–6. – С.5–10.

102. Коломийченко А.И. Основные тенденции развития коксохимического производства ЧАО «МАКЕЕВКОКС» / А.И. Коломийченко, Е.Т. Ковалев, А.Г. Старовойт // Углекимический журнал. 2012. – № 5–6. – С. 11–17.

103. Горанский П.Ю. Подготовка угольной шихты при производстве высококачественного кокса в условиях ЧАО «Макеевкокс» / П.Ю. Горанский, С.М. Буланый, И.И. Черкасов, В.П. Дудешева, Ю.А. Яценко, Д.В. Мирошниченко, А.Р. Давидзон // Углекимический журнал. 2012. – № 5–6. – С. 20–26.

104. Чуб В.Е. О влиянии различных факторов на количество обвалов трамбованных угольных пирогов при загрузке в коксовые печи / В.Е. Чуб, С.Н. Дзекунов, А.Д. Мокрицких [и др.] // Углекимический журнал. 2002. – №3–4. – С.15–18.

105. Кузниченко В.М. Технология производства кокса с применением трамбования угольной шихты / В.М. Кузниченко, А.В. Карпов, А.А. Лобов [и др.] // Кокс и химия. 1996. – №8. – С.18–20.

106. Данилов А.Б. Практическое использование данных петрографического анализа углей и шихт для прогнозирования выхода химических продуктов коксования / А.Б. Данилов, Г.С. Вердибоженко, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Кафтан, М.Б. Головки // Кокс и химия. 2012. – № 11. – С. 19–23.

Додаток I

ДЕРЖАВНЕ АГЕНСТВО УКРАЇНИ З УПРАВЛІННЯ
ДЕРЖАВНИМИ КОРПОРАТИВНИМИ ПРАВАМИ ТА МАЙНОМ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)»

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВИХОДУ КОКСУ
ТА ОСНОВНИХ ХІМІЧНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ В УМОВАХ ПАТ
«АЛЧЕВСЬККОКС»

Харків

2012

ПЕРЕДМОВА

1. РОЗРОБЛЕНО: ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)»

2. РОЗРОБНИКИ: Головка М.Б., Дроздник І. Д., к.т.н., Мірошніченко Д. В., к.т.н.

ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: ДП «УХІН» (наказ № 167 від 07.12.2012 року).

3. ВВЕДЕНО ВПЕРШЕ

Право власності на цей документ належить ДП «УХІН». Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати цей документ повністю або частково на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено. Щодо врегулювання прав власності звертатися до ДП «УХІН».

ЗМІСТ

	С.
1. Сфера застосування	4
2. Нормативні посилання	5
3. Терміни та визначення	5
4. Рекомендації щодо розрахунку лабораторного та промислового виходу коксу, смоли, сирого бензолу на підставі даних петрографічного аналізу шихти	5
4.1 Розрахунковий метод визначення лабораторного виходу коксу, смоли та сирого бензолу з шихти	6
4.1.1 Розподіл органічної маси шихти на групи	6
4.1.2 Розрахунок лабораторного виходу коксу, смоли та сирого бензолу з урахуванням коефіцієнтів переходу	7
4.2 Розрахунок промислового виходу коксу, смоли та сирого бензолу на сухий знезолений стан	8
4.3 Розрахунок лабораторного та промислового виходу коксу, смоли та сирого бензолу на сухий стан	8
Додаток	10

1 Сфера застосування

Методика призначена для визначення виходу коксу, смоли та сирого бензолу розрахунковим методом в умовах ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС».

2 Нормативні посилання

У Методиці є посилання на такі нормативні документи:

ДСТУ 2401–94 «Кокс кам'яновугільний і пековий. Терміни та визначення».

ДСТУ 4370:2011 «Енергозбереження. Коксохімічне виробництво. Ресурси енергетичні вторинні. Методика визначення показників виходу та використання».

ДСТУ 3472–2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація».

ДСТУ 4096–2002 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань».

ГОСТ 27314–91 (ISO 589–81) «Паливо тверде мінеральне. Методи визначення вологи».

ГОСТ 11022–95 (ИСО 1171–97) «Паливо тверде мінеральне. Методи визначення зольності».

ГОСТ 6382–91 (ИСО 562–81) «Паливо тверде мінеральне. Методи визначення виходу летких речовин».

ДСТУ 3528–97 (ИСО 334:1992) (ГОСТ 8606–94) «Паливо тверде мінеральне. Визначення вмісту загальної сірки. Метод Ешка».

ГОСТ 9414.2–93 (ISO 7404–3–84) «Вугілля кам'яне та антрацит. Метод визначення петрографічного аналізу. Частина 2. Метод підготовки зразків вугілля».

ГОСТ 9414.3–93 (ISO 7404–3–84) «Вугілля кам'яне та антрацит. Метод визначення петрографічного аналізу. Частина 3. Метод визначення груп мацералів».

ГОСТ12113–94 (ИСО 7404–5–5) «Вугілля буре, антрацити, тверді розсіяні органічні речовини і вуглецеві матеріали. Метод визначення показників відбиття».

ДСТУ 7689:2015«Вугілля кам'яне. Метод визначення виходу хімічних продуктів коксування».

ГОСТ 18635–73 «Угли каменные. Метод определения выхода химических продуктов коксования»

ГОСТ 27313–95 (ИСО 1170–77) «Паливо тверде мінеральне. Позначення показників якості та формули перерахунку результатів аналізу для різних станів палива».

3. Терміни та визначення

У цих методичних рекомендаціях застосовують терміни та визначення понять згідно з ДСТУ 2401 та ДСТУ 4370, які зазначені нижче.

3.1 Петрографічний склад

Кількісна характеристика вугілля за вмістом основних груп мацералів, мікролітотипів та мінеральних включень.

3.2 Шихта вугільна

Суміш вугілля різних марок з властивостями, необхідними для отримання коксу потрібної якості.

3.3 Органічна маса вугілля

Умовна маса вугілля без загальної вологи та мінеральної маси.

4. Рекомендації щодо розрахунку лабораторного та промислового виходу коксу, смоли, сирого бензолу на підставі даних петрографічного аналізу шихти

Методика базується на результатах досліджень при виконанні НДР «Дослідження хімічного потенціалу вугілля різного ступеня петрографічної однорідності, їх сумішей і шихт ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» з метою

прогнозування виходу основних хімічних продуктів коксування» (ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС») № держ.реєст. 0112U003897.

4.1. Розрахунковий метод визначення лабораторного виходу коксу, смоли та сирого бензолу з шихти

4.1.1 Розподіл органічної маси шихти на групи

Розподіл органічної маси шихти проводиться по підставі даних петрографічного аналізу, в ході якого визначається мацеральний склад шихти, середній довільний показник відбиття вітриніту та рефлектограма вітриніту.

Визначення мацеральних груп проводиться на аншліф-брикетах у відбитому світлі в масляній імерсії за ГОСТ 9414.3–93. Всього проводять підрахунок не менше 500 точок чистого вугілля. На аншліф-брикеті ідентифікують мацерали груп вітриніту (V_t , %), семівітриніту (S_v , %), липтиніту (L , %) і інертиніту (I , %).

Вимірювання показника відбиття вугілля засновано на порівнянні відбиття досліджуваного зразка з відбиттям калібрувальних еталонів за ГОСТ12113–94 (ИСО 7404–5–85).

Розподіл значень показника відбиття представляють у вигляді рефлекторам, на вісь абсцис наносять значення показника відбиття R_0 , % з інтервалом, рівним 0,1 або 0,05 %, на вісь ординат – частоти вимірювань, що відносяться до кожного інтервалу.

За рефлектограмою можна визначити кількісну оцінку процентного співвідношення низько-, середньо- і високометаморфізованих складових вугілля.

На початку проведення розрахунку необхідно провести розподіл органічної маси шихти на групи використовуючи дані петрографічного аналізу згідно табл. 4.1.

Умовне розділення органічної маси шихти на групи

Група	Найменування петрографічних складових, що входять до групи	Символьне позначення груп
I	Вітринітстадій метаморфізму Д і ДГ ($R_0 \leq 0,64$ %)	$(V_t^{<0,64} \cdot V_t) / 100$
II	Вітринітстадії метаморфізму Г ($R_0 = 0,64 - 0,89$ %)	$(V_t^{0,65-0,89} \cdot V_t) / 100$
III	Вітринітстадії метаморфізму Ж ($R_0 = 0,90 - 1,19$ %)	$(V_t^{0,90-1,19} \cdot V_t) / 100$
IV	Вітриніти ліптинітстадії метаморфізму К ($R_0 = 1,20 - 1,39$ %)	$(V_t^{1,20-1,39} \cdot V_t + L^{1,20-1,39} \cdot L) / 100$
V	Вітринітстадії метаморфізму ПС ($R_0 = 1,40 - 1,69$ %)	$(V_t^{1,40-1,69} \cdot V_t) / 100$
VI	Вітринітстадії метаморфізму П ($R_0 = 1,70 - 2,20$ %)	$(V_t^{1,70-2,20} \cdot V_t) / 100$
VII	Ліптиніт стадій метаморфізму Д, ДГ, Г, Ж	$(L^{<0,64} + L^{0,65-0,89} + L^{0,90-1,19}) \cdot L / 100$
VIII	Інертиніт и семівітриніт	$I + S_v$

4.1.2 Розрахунок лабораторного виходу коксу, смоли та сирого бензолу з урахуванням коефіцієнтів переходу

Після проведення розподілу на групи використовуючи коефіцієнти належних груп, які наведені в табл. 4.2 розраховується лабораторний вихід коксу, смоли та сирого бензолу з шихти на сухий знезолений стан.

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнтів рівнянь прогнозу лабораторного виходу коксу та основних хімічних продуктів коксування в залежності від петрографічного складу органічної маси шихти

	Група							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
B_k^{daf}	0,6184	0,6588	0,7286	0,7954	0,8298	0,869	0,4978	0,7984
B_{cm}^{daf}	0,0838	0,0742	0,0586	0,0316	0,0254	0,0085	0,1105	0,0198
B_{cb}^{daf}	0,0215	0,0183	0,0136	0,0093	0,0063	0,0019	0,0382	0,0068

Похибка розрахунку лабораторного виходу коксу на сухий знезолений стан не перевищує 0,41 %; смоли – 0,28 %; сирого бензолу – 0,09 %.

Приклад розрахунку лабораторного та промислового виходу коксу, смоли, сирого бензолу на сухий знезолений стан наведений у додатку.

4.2 Розрахунок промислового виходу коксу, смоли та сирого бензолу на сухий знезолений стан

Для отримання промислового виходу коксу, смоли та сирого бензолу на сухий знезолений стан необхідно використати коефіцієнти перерахунку від лабораторного, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Коефіцієнти перерахунку від лабораторних (розрахункових) значень до промислових та середня похибка

Батарей	Продукт	Коефіцієнт перерахунку	Стандартна похибка, %
5–8	V_K^{daf}	1,0227	0,384
	V_{CM}^{daf}	0,7914	0,134
	V_{CO}^{daf}	0,9618	0,049
9-біс	V_K^{daf}	0,9991	0,290
	V_{CM}^{daf}	0,7851	0,111
	V_{CO}^{daf}	0,9423	0,036
10-біс	V_K^{daf}	0,9763	0,290
	V_{CM}^{daf}	0,7851	0,111
	V_{CO}^{daf}	0,9423	0,036

4.3 Розрахунок лабораторного та промислового виходу коксу, смоли та сирого бензолу на сухий стан

Щоб розрахувати лабораторний або промисловий вихід коксу з сухого знезоленого на сухий стан, необхідно скористатися формулою (1), яка враховує зольність шихти:

$$B_{\kappa}^d = \frac{B_{\kappa}^{daf} \cdot (100 - A^d)}{100} + A^d ; \quad (1)$$

де B_{κ}^{daf} – вихід коксу на сухий знезолений стан, %;

A^d – зольність шихти, %

Для перерахунку лабораторного та промислового виходу смоли або сирого бензолу з сухого знезоленого на сухий стан, необхідно скористатися формулою (2), яка враховує зольність шихти:

$$B^d = \frac{B^{daf} \cdot (100 - A^d)}{100} ; \quad (2)$$

де B^{daf} – вихід смоли або бензолу на сухий знезолений стан, %;

A^d – зольність шихти, %.

Ключові слова: ВУГІЛЛЯ КАМ'ЯНЄ, ПЕТРОГРАФІЧНИЙ СКЛАД, ОРГАНІЧНА МАСА ВУГІЛЛЯ, ВИХІД ХІМІЧНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахувати промисловий вихід коксу, смоли та сирого бензолу з шихти ПАТ «АЛЧЕВСЬККОКС» за результатами петрографічного аналізу, з золою $A^d=8,6\%$, яка буде коксуватися на батареї 9-біс.

Назва	Середній показник відбиття вітриніту, %	Петрографічний склад, %				Стадії метаморфізму вітриніту, %						
	R_0	V_t	S_v	I	L	< 0,50	0,50-0,64	0,65-0,89	0,90-1,19	1,20-1,39	1,40-1,69	1,70-2,59
Шихта	0,95	70	1	26	3	1	10	39	37	9	3	1

Розрахунок. Вихід коксу, смоли та сирого бензолу на сухий незолений стан з шихти здійснюється таким чином:

1. Розраховуємо петрографічний склад органічної маси шихти по групах згідно табл. 4.1 Методики та наведених вище результатів петрографічного аналізу шихти

Група	Символьне позначення груп	Кількість петрографічної групи в органічній масі шихти, %
I	$(V_t^{<0,64} \cdot V_t) / 100$	$(1+10) \cdot 70 / 100 = 7,70$
II	$(V_t^{0,65-0,89} \cdot V_t) / 100$	$39 \cdot 70 / 100 = 27,30$
III	$(V_t^{0,90-1,19} \cdot V_t) / 100$	$37 \cdot 70 / 100 = 25,90$
IV	$(V_t^{1,20-1,39} \cdot V_t + L^{1,20-1,39} \cdot L) / 100$	$(9 \cdot 70 + 9 \cdot 3) / 100 = 6,57$
V	$(V_t^{1,40-1,69} \cdot V_t) / 100$	$3 \cdot 70 / 100 = 2,10$
VI	$(V_t^{1,70-2,20} \cdot V_t) / 100$	$1 \cdot 70 / 100 = 0,70$
VII	$(L^{<0,64} + L^{0,65-0,89} + L^{0,90-1,19}) \cdot L / 100$	$(1+10+39+37) \cdot 3 / 100 = 2,61$
VIII	$I + S_v$	$26+1=27$
	Разом	100

2. Використовуючи коефіцієнти (табл. 4.2 Методики) відповідно до петрографічної групи розраховуємо вихід коксу на сухий знезолений стан з органічної маси шихти.

Група	Коефіцієнт відповідної групи	Кількість петрографічної групи в органічній масі шихти, %	Вихід коксу на сухий знезолений стан з петрографічної групи органічної маси шихти, %
I	0,6184	7,70	$0,6184 \cdot 7,70 = 4,762$
II	0,6588	27,30	$0,6588 \cdot 27,30 = 17,985$
III	0,7286	25,90	$0,7286 \cdot 25,90 = 18,871$
IV	0,7954	6,57	$0,7954 \cdot 6,57 = 5,226$
V	0,8298	2,10	$0,8298 \cdot 2,10 = 1,743$
VI	0,8690	0,70	$0,8690 \cdot 0,70 = 0,608$
VII	0,4978	2,61	$0,4978 \cdot 2,61 = 1,299$
VIII	0,7984	27,00	$0,7984 \cdot 27,00 = 21,557$
Разом		100	72,050

Отримуємо вихід коксу на сухий знезолений стан з органічної маси шихти:
 $B_k^{daf} = 72,05\%$.

Обчислюємо результати визначення виходу коксу з точністю до третього десяткового знака і округляємо до другого десяткового знака.

3. Використовуючи коефіцієнти (табл. 4.2 даної методики) відповідно до петрографічної групи розраховуємо вихід смоли на сухий знезолений стан з органічної маси шихти

Група	Коефіцієнт відповідної групи	Кількість петрографічної групи в органічній масі шихти, %	Вихід смоли на сухий знезолений стан з петрографічної групи органічної маси шихти, %
I	0,0838	7,70	$0,0838 \cdot 7,70 = 0,645$
II	0,0742	27,30	$0,0742 \cdot 27,30 = 2,026$
III	0,0586	25,90	$0,0586 \cdot 25,90 = 1,518$
IV	0,0316	6,57	$0,0316 \cdot 6,57 = 0,208$
V	0,0254	2,10	$0,0254 \cdot 2,10 = 0,053$
VI	0,0085	0,70	$0,0085 \cdot 0,70 = 0,006$
VII	0,1105	2,61	$0,1105 \cdot 2,61 = 0,288$
VIII	0,0198	27,00	$0,0198 \cdot 27,00 = 0,535$
Разом		100	5,279

Отримуємо вихід смоли насухий знезолений стан з органічної маси шихти:
 $B_c^{daf}=5,28\%$.

Обчислюємо результати визначення виходу коксу з точністю до третього десяткового знака і округляємо до другого десяткового знака.

4. Використовуючи коефіцієнти (табл. 4.2 даної методики) відповідно до петрографічної групи розраховуємо вихід сирого бензолу на сухий знезолений стан з органічної маси шихти

Група	Коефіцієнт відповідної групи	Кількість петрографічної групи в органічній масі шихти, %	Вихід сирого бензолу на сухий знезолений стан з петрографічної групи органічної маси шихти, %
I	0,0215	7,70	$0,0215 \cdot 7,70 = 0,166$
II	0,0183	27,30	$0,0183 \cdot 27,30 = 0,500$
III	0,0136	25,90	$0,0136 \cdot 25,90 = 0,352$
IV	0,0093	6,57	$0,0093 \cdot 6,57 = 0,061$
V	0,0063	2,10	$0,0063 \cdot 2,10 = 0,013$
VI	0,0019	0,70	$0,0019 \cdot 0,70 = 0,001$
VII	0,0382	2,61	$0,0382 \cdot 2,61 = 0,100$
VIII	0,0068	27,00	$0,0068 \cdot 27,00 = 0,184$
Разом		100	1,376

Отримуємо вихід сирого бензолу насухий знезолений стан з органічної маси шихти:
 $B_{c0}^{daf}=1,38\%$.

Обчислюємо результати визначення виходу коксу з точністю до третього десяткового знака і округляємо до другого десяткового знака.

5. Після розрахунку лабораторного виходу коксу, смоли та сирого бензолу на сухий знезолений стан для отримання промислового виходу помножуємо на відповідний коефіцієнт щодо батареї, який наведений в табл. 4.3 даної методики.

-для батареї 9-бис:

$$B_k^{daf} = B_k^{daf_l} \cdot k_{9-бис} = 72,050 \cdot 0,9991 = 71,985, \%$$

$$B_{cm}^{daf} = B_{cm}^{daf_l} \cdot k_{9-бис} = 5,279 \cdot 0,7851 = 4,144, \%$$

$$B_{c0}^{daf} = B_{c0}^{daf_l} \cdot k_{9-бис} = 1,376 \cdot 0,9423 = 1,297, \%$$

6. Для отримання промислового виходу коксу на сухий стан використовуємо формулу (1):

$$B_{\kappa}^d = \frac{71,985 \cdot (100 - 8,6)}{100} + 8,6 = 74,394 \%$$

7. Для отримання промислового виходу смоли або сирого бензолу на сухий стан використовуємо формулу (2):

$$B_{см}^d = \frac{4,144 \cdot (100 - 8,6)}{100} = 3,796 \%$$

$$B_{сб}^d = \frac{1,297 \cdot (100 - 8,6)}{100} = 1,185 \%,$$

Результати розрахунку виходу коксу, смоли, сирого бензолу з урахуванням умов коксування

Умови коксування	Вихід основних хімічних продуктів коксування, %					
	кокс		смола		сирий бензол	
	на сухий знезолений стан, B_{κ}^{daf}	на сухий стан, B_{κ}^d	на сухий знезолений стан, $B_{см}^{daf}$	на сухий стан, $B_{см}^d$	на сухий знезолений стан, $B_{сб}^{daf}$	на сухий стан, $B_{сб}^d$
Лабораторія	72,05	74,45	5,28	4,83	1,38	1,26
Батарея 5-8	73,69	75,95	4,18	3,82	1,32	1,21
Батарея 9-біс	71,99	74,40	4,15	3,79	1,30	1,19
Батарея 10-біс	70,34	72,89	4,15	3,79	1,30	1,19

Наукове видання

МІРОШНИЧЕНКО Денис Вікторович

ГОЛОВКО Марина Борисівна

**ВПЛИВ ЕЛЕМЕНТНОГО ТА ПЕТРОГРАФІЧНОГО СКЛАДІВ ВУГІЛЛЯ
І ШИХТ НА ВИХІД ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ**

Монографія

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ»

(протокол № 4 від 03.07.2020 р.)

В авторській редакції

Підписано до друку 10.10.2020 р. Формат 60×90/16.

Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.

Друк – цифровий. Ум. друк. аркушів.

Наклад 300 прим.

Видавець ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ»

вул. Багалія, 16, м. Харків, 61002

свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4568 від 17.06.2013.

Виготовлювач ФЛ-П Черняк Л.О.

61002, м. Харків, вул. Багалія, 16

Свідоцтво № 24800000000079553, від 16.05.2007 р.