

Днепродзержинский государственный технический университет
*ДВНЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»

ОДНОРОДНОСТЬ СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ В ОБЪЕМЕ ЗАГРУЗКИ КАК ФАКТОР ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КАЧЕСТВО КОКСА

Введение. Однородность состава и свойств угольной шихты (однородность шихты), определяющая однородность свойств кокса и его поведения при вторичном нагреве в доменной печи, предполагает получение одинаковых значений ее параметров в пробах, отобранных из любых точек объема загрузки.

Постановка задачи. В связи с этим приближение к состоянию однородности шихты является функцией степени перемешивания ее компонентов и, в частности, классов крупности углей разных технологических марок и групп.

Свойства классов крупности угольной шихты. Существенность этого фактора подтверждается полученными нами данными о различии свойств классов крупности шихты (табл.1).

Таблица 1 – Свойства классов крупности опытной шихты

Класс, мм	Технический анализ, %			Пластометрические показатели, мм		Дилатометрические показатели по ИГИ-ДМетИ			Выход продуктов пиролиза в центробежном поле, %			
	A^d	V^{daf}	S_t^d	Y	X	$П_n, с$	$П_b, с$	$И_b, мм$	$Ж^Г$	$T^Г$	$Г^Г$	$\alpha_{жт} = \frac{Ж^Г}{T^Г}$
>6	5,5	33,5	2,1	12	35	374	307	50	14	57	29	0,2456
6–3	6,7	30,5	2,1	13	30	370	384	29	13	60	27	0,2167
3–1,5	6,8	28,3	2,0	15	27	370	384	39	12	63	25	0,1905
1,5–0,5	7,5	26,3	1,9	15	30	504	390	34	11	67	22	0,1642
<0,5	9,4	24,6	1,9	—	—	576	384	20	—	—	—	—
Среднее	7,3	28,4	2,0	14	29	442	379	33	12,5	62	29	0,2043

Из табл.1 видно, что основные свойства классов крупности шихты не только различны, но и изменяются закономерно с переходом от одного класса к другому.

Так, снижение крупности зерен шихты систематически сопровождается ростом зольности и снижением выхода летучих веществ в интервале 2% масс. и 8,9% масс. соответственно.

В интервале крупности от > 6 мм до 1,5–0,5 мм включительно закономерно растут толщина пластического слоя, период вспучивания и выход твердых продуктов пиролиза в центробежном поле, но снижаются пластометрическая усадка, выход жидкоподвижных и газообразных продуктов пиролиза.

Обращает на себя внимание систематическое снижение параметра фазового состояния $\alpha_{жт}$ (отношения $Ж^Г$ к $T^Г$) по мере перехода от крупных классов к мелким (табл.1).

Согласно результатам наших исследований это означает, что ОМУ в мелких классах представлена меньшим соотношением ароматических и алифатических структур (меньшей величиной параметра η). Поэтому в ряду кл. > 6 мм – кл. 1,5–0,5 мм должна расти РСК, в том числе по СRI, уменьшаться как “горячая”, так и “холодная” прочность кокса. Это связано со сосредоточением в мелких классах слабоспекающихся и неспекающихся углей, тогда как угли технологических групп ДГ, ГЖО и ГЖ тяготеют к крупным классам.

План и результаты эксперимента. Полученные результаты послужили основанием для постановки эксперимента по оценке действия степени перемешивания угольной шихты в сопоставлении с другими очевидно существенными факторами.

К числу таких факторов отнесли:

x_1 – скорость подъема температуры, $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$;

x_2 – конечная температура коксования, $^{\circ}\text{C}$;

x_3 – содержание газового угля в шихте, % масс.;

x_4 – содержание кл. 1,5–0 мм в шихте, % масс.;

x_5 – степень перемешивания компонентов шихты (марок и классов).

Состав базовой шихты и свойства ее компонентов представлены в табл. 2.

Содержание газового угля в шихте варьировали на двух уровнях (20% масс. и 60% масс.), сохраняя соотношение между углями марок Ж, К и ОС, имевшее место в составе шихты БКХЗ (табл.2). Это привело к эксперименту с 2-мя составами шихт, представленными в табл.3.

Таблица 2 – Характеристика углей

Обогащительная фабрика	Состав шихты	Технологическая группа	Технический анализ, %			Пластометрические показатели, мм		Дилатометрические показатели по ГОСТ 14056-68		
			A^c	V^c	$S_{\text{общ}}^c$	X	Y	$I_{\text{в}}, \text{мм}$	$P_{\text{н}}, \text{с}$	$P_{\text{в}}, \text{с}$
Октябрьская	32	Г6	7,0	33,4	1,19	40	8	62	315	193
Никитовская	36	Ж21	7,6	32,7	2,91	27	13	107	297	297
Пролетарская	16	К14	7,2	21,4	1,81	27	16	73	400	427
Калининская	16	ОС	6,4	14,5	2,45	19	8	14	504*	207

* $P_{\text{н}}$ для ОС определяется при $t = 450^{\circ}\text{C}$.

В качестве количественной оценки степени перемешивания шихты брали число конусований.

Коксования проводили в двухкамерной печи УХИНа, а испытания полученного кокса – в четырехсекционном барабане.

Таблица 3 – Составы опытных шихт, % масс.

Вариант	Г	Ж	К	ОС
I	20,0	42,0	19,0	19,0
II	60,0	21,0	9,5	9,5

Условия опытов определялись схемой полного факторного эксперимента 2^5 . Кодирование натуральных значений факторов x_j выполняли по формуле

$$\hat{x}_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}. \quad (1)$$

Для вычислений по (1) использовали данные табл.4.

Таблица 4 – Условия кодирования факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Скорость нагрева, °С/мин, x_1	Конечная температура коксования, °С, x_2	Содержание газового угля, %, x_3	Содержание кл. менее 1,5 мм, %, x_4	Количество конусований, x_5
Центральный уровень (x_{j0})	4	1000	40	75	4
Интервал варьирования (Δx_j)	1	50	20	15	2
Нижний уровень ($\hat{x}_j = -1$)	3	950	20	60	2
Верхний уровень ($\hat{x}_j = 1$)	5	1050	60	90	6

План эксперимента и результаты испытаний коксов по показателям M25 и M10 представлены в табл.5.

Результаты работы. Уравнения для описания показателей M25 и M10. Для построения уравнений, описывающих связь показателей качества кокса с параметрами состава, режима подготовки и коксования угольной шихты, использовали индуктивный регрессионный анализ с “селекцией” выборки.

Предварительно исследовали связь между M25 и M10 (рис.1) и нашли, что, по крайней мере, 4 точки из 32 лежат на и за доверительным 95%-ным контуром. Более того, показано, что лучшие описания экспериментальных данных как по M25, так и по M10 при линейной и квадратичной аппроксимации получаются после исключения из плана экспериментов опытов № 15, 28, 29 и 31 как отягченных “грубыми” отклонениями от закономерностей, описывающих результаты остальных 28-ми опытов.

Последовательный выбор значимых эффектов, уравнения и их статистические параметры, сопоставительные данные о качестве описания результатов эксперимента осуществляли по [1].

Для анализа приняты следующие модели:

линейные

$$M25 = 102,2500 - 0,2015x_3 - 0,1485x_4, \quad (2)$$

$$M10 = -0,0078 + 0,1799x_3 + 0,1308x_4 - 0,8226x_5; \quad (3)$$

квадратичные

$$M25 = 91,3070 - 0,004414x_3x_4 + 0,000121x_2x_3, \quad (4)$$

$$M10 = 10,3610 + 0,005002x_3x_4 - 0,040409x_1x_3 - \\ - 0,003898x_2x_5 + 3,118200x_5 - 0,000287x_4^2. \quad (5)$$

Таблица 5 – План и результаты эксперимента

№ опыта	Факторы					Отклики	
	\hat{x}_1	\hat{x}_2	\hat{x}_3	\hat{x}_4	\hat{x}_5	M25	M10
1	–	–	–	–	–	86,1	13,3
2	+	–	–	–	–	87,3	9,8
3	–	+	–	–	–	84,7	10,5
4	+	+	–	–	–	87,0	10,0
5	–	–	+	–	–	80,6	16,4
6	+	–	+	–	–	81,9	14,2
7	–	+	+	–	–	80,6	18,3
8	+	+	+	–	–	80,7	13,6
9	–	–	–	+	–	87,3	12,1
10	+	–	–	+	–	84,8	12,3
11	–	+	–	+	–	85,2	13,6
12	+	+	–	+	–	89,4	11,1
13	–	–	+	+	–	71,5	27,8
14	+	–	+	+	–	77,1	21,3
15	–	+	+	+	–	56,4	41,0
16	+	+	+	+	–	77,7	20,4
17	–	–	–	–	+	89,2	8,7
18	+	–	–	–	+	89,4	8,0
19	–	+	–	–	+	91,1	7,6
20	+	+	–	–	+	88,1	7,4
21	–	–	+	–	+	81,2	17,1
22	+	–	+	–	+	85,1	10,9
23	–	+	+	–	+	84,8	13,2
24	+	+	+	–	+	86,6	8,9
25	–	–	–	+	+	86,0	9,8
26	+	–	–	+	+	85,0	8,8
27	–	+	–	+	+	87,8	8,3
28	+	+	–	+	+	74,8	5,9
29	–	–	+	+	+	81,1	13,2
30	+	–	+	+	+	70,5	22,5
31	–	+	+	+	+	66,9	32,9
32	+	+	+	+	+	75,6	16,1

Из уравнений (2) и (4) видно, что возможное влияние степени смешения (однородности) шихты на M25 в исследуемой области изменения фактора x_5 не проявляется, зато высокозначимым оказывается действие содержания в шихте углей марки Г (x_3) и мелких классов крупности (x_4), что соответствует результатам, полученным ранее.

Анализ уравнений связи M25 с технологическими факторами. На рис.2 показана допустимая область и характер зависимости M25 от x_3 и x_4 , построенной по линейному уравнению (2). Видно, что для сохранения уровня M25 при увеличении содержания в шихте газовых углей нужно снижать ее степень измельчения. При этом эффект по M25 от изменения уровня измельчения всего в два раза меньше эффекта от изменения содержания в шихте газовых углей (оценка сделана по соотношению кодированных переменных \hat{x}_3 и \hat{x}_4).

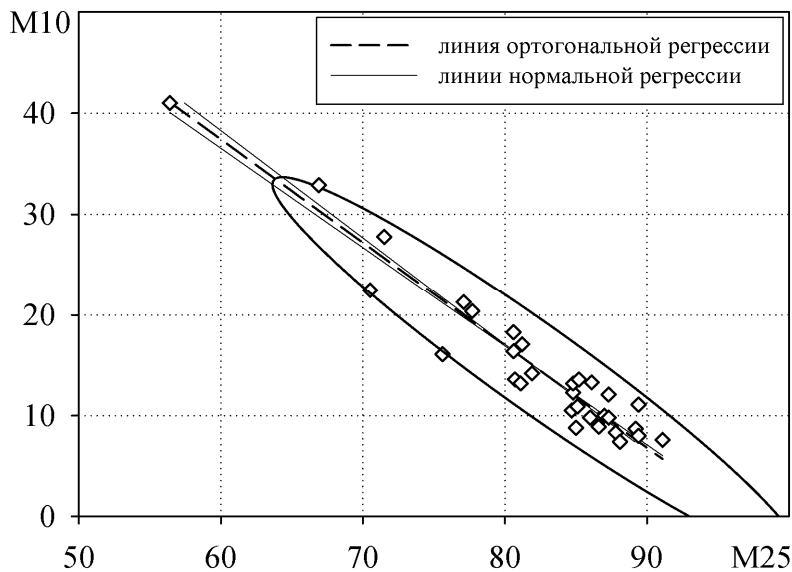


Рисунок 1 – Линии ортогональной и нормальной регрессии и 95%-ный доверительный контур для зависимости показателя M10 от M25

Несмотря на высокую оценку тесноты связи между экспериментальными и рассчитанными по (2) значениями M25 (множественный коэффициент корреляции ρ составил 0,85), использование нелинейной модели (4) не только уточнило описание экспериментальных данных ($\rho = 0,91$), но и представило действие факторов в форме, более соответствующей физико-химической природе рассматриваемой системы – в виде их взаимодействия.

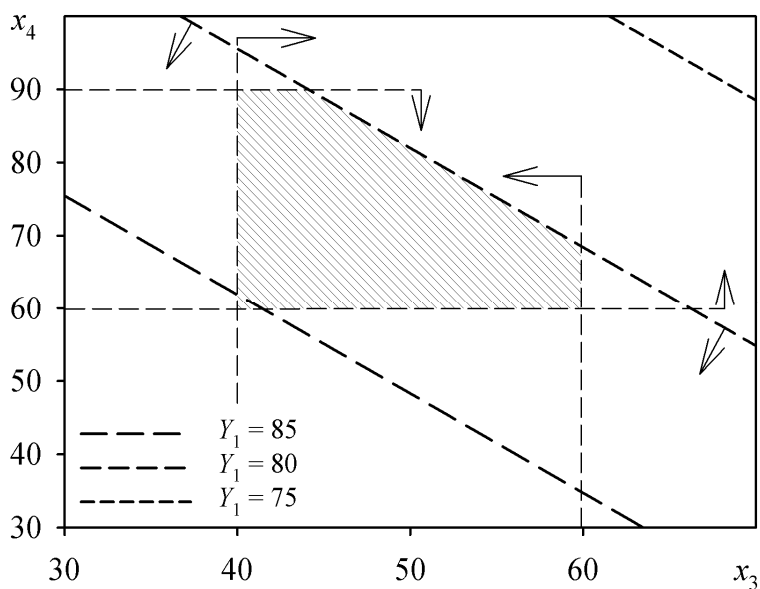
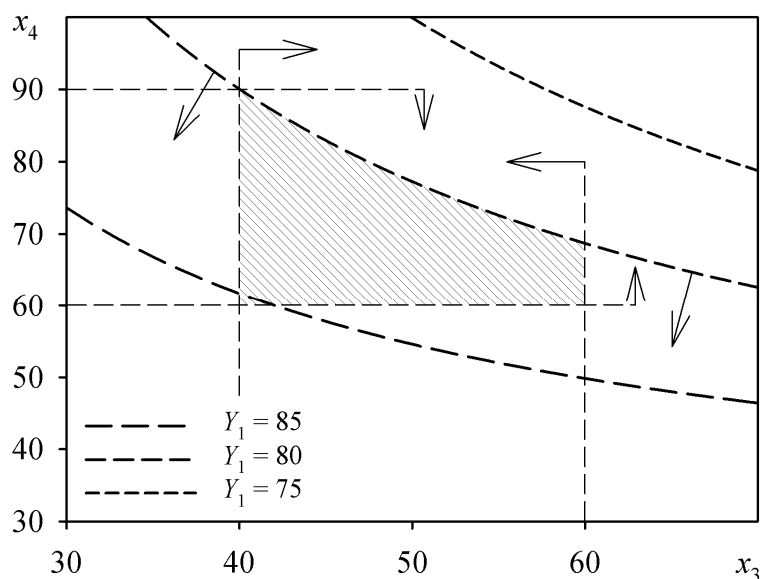


Рисунок 2 – Зависимость показателя M25 от содержания в шихте газовых углей (x_3) и класса 1,5–0 мм (x_4)

Из рис.3 следует, что согласно модели (4) область допустимых решений лишь несколько уменьшается, а в области высоких содержаний угля марки Г приращение этого фактора удастся компенсировать меньшим укрупнением помола шихты.

Рисунок 3 – Зависимость показателя M25 от x_3 и x_4 при $x_2 = 950^{\circ}\text{C}$

Из (4) видно, что величина влияния содержания в шихте газовых углей (x_3) на M25 зависит не только от содержания в ней кл. 1,5–0 мм (x_4), но и от уровня температуры в конце коксования (x_2) (от “готовности” кокса).

Заметим, однако, что в исследуемой области взаимодействие $x_3 \cdot x_4$ оказывает существенно более сильное воздействие на M25, чем взаимодействие $x_2 \cdot x_3$ (рис.4).

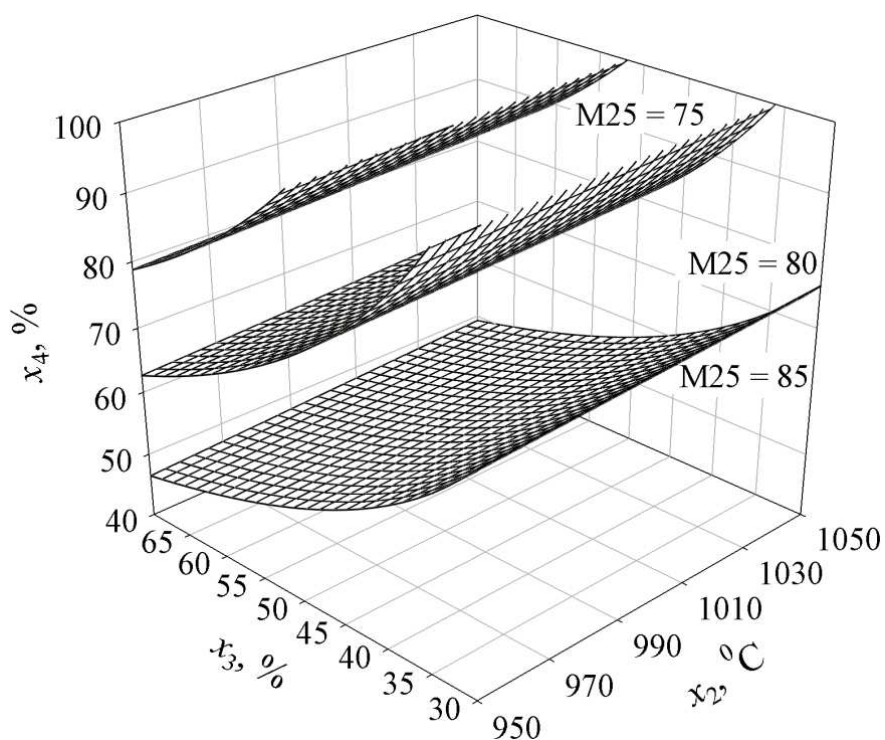


Рисунок 4 – Зависимость показателя M25 от конечной температуры коксования, содержания в шихте газовых углей и кл. 1,5–0 мм

Анализ уравнений связи M10 с технологическими факторами. Вместе с тем, действие однородности шихты (x_5) весьма четко проявляется на величине показателя M10 и, что существенно, уже в линейной модели.

Эта модель, полностью отражающая существующие представления о направлении действия вошедших в нее факторов, позволяет приблизительно сопоставить вклад в величину M10 “однородности” шихты по отношению к маркам углей и их крупности с вкладами от изменения содержания углей марки Г и кл. 1,5–0 мм в шихте. Для этого, умножая коэффициенты (3) на диапазоны изменения факторов x_3 , x_4 и x_5 , получили соответственно 7,20%, 3,92% и 3,29%.

Таким образом, действие фактора x_5 (уровня взаимного распределения компонентов шихты по маркам и по крупности) на M10 оказывается соизмеримым с действием факторов x_3 и x_4 . Характер их совместного влияния в сочетании с возможными границами допустимой (рабочей) области показан на рис.5, а, б.

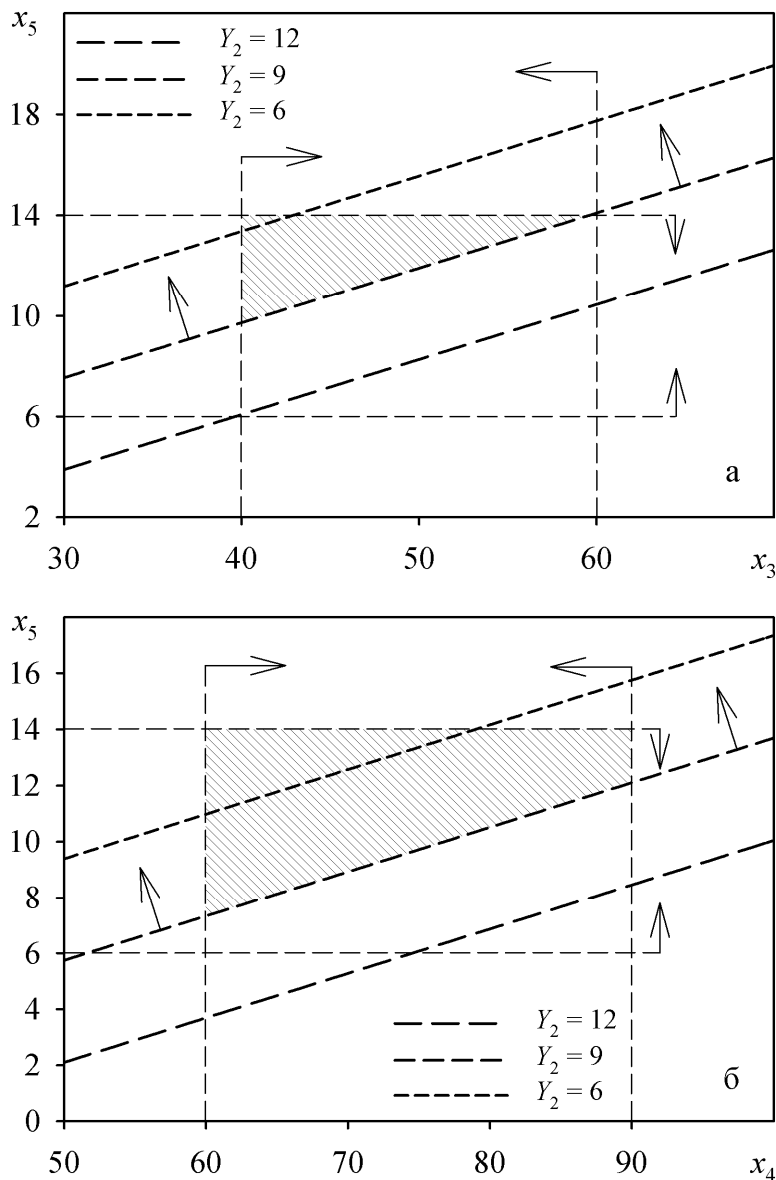


Рисунок 5 – Зависимость показателя M10 от степени перемешивания компонентов шихты и содержания в ней: а) газовых углей; б) кл. 1,5–0 мм

Судя по (5), величина влияния x_5 на M10 зависит также от принятого уровня конечной температуры коксования. И хотя во всех случаях совместный эффект от варьирования факторами x_2 и x_5 снижает M10, однако от изменения степени перемешивания

шихты он в два раза больше, чем от изменения конечной температуры в принятом диапазоне варьирования факторами:

если взять
$$\Delta M10 = -0,003898x_2x_5 + 3,118200x_5,$$

то получим:

$x_2(\hat{x}_2)$	$x_5(\hat{x}_5)$	$\Delta M10$
950(-1)	2(-1)	-1,1698
950(-1)	6(+1)	-3,5094
1050(+1)	2(-1)	-1,9494
1050(+1)	6(+1)	-5,8482,

откуда легко находим указанные эффекты $b_2 = -0,7796$ и $b_5 = -1,5596$.

Это позволяет включить фактор x_5 в число других технологических факторов, существенно влияющих на один из важнейших показателей “холодной” прочности кокса.

Из рис.6, а-г, построенных по (5), видно, что увеличение однородности шихты оптимизирует качество кокса по M10 в сочетании с увеличением скорости нагрева шихты и конечной температуры коксования, а также со снижением содержания в шихте газовых углей и углей крупностью 1,5–0 мм:

из (5) при $x_2 = 1000$, $x_3 = 20$ и $x_4 = 60$

получаем $Y_2 = 15,3287 - 2,42454x_1 - 0,7798x_5$ (рис.6, а);

при $x_1 = 4$, $x_3 = 20$ и $x_4 = 60$

получаем $Y_2 = 12,09508 - 0,003898x_2x_5 + 3,1182x_5$ (рис.6, б);

при $x_1 = 4$, $x_2 = 1000$ и $x_4 = 75$

получаем $Y_2 = 8,7466 + 0,213514x_3 - 0,7798x_5$ (рис.6, в);

при $x_1 = 4$, $x_2 = 1000$ и $x_3 = 40$

получаем $Y_2 = 3,89556 + 0,2x_4 - 0,000287x_4^2 - 0,7798x_5$ (рис.6, г).

Выводы. Полученные результаты показывают, что в границах исследованной области повышение уровня взаимного распределения компонентов шихты в объеме загрузки существенно и положительно влияет на показатель M10, но не проявляет себя по отношению к показателю M25. Можно предположить, что столь разное проявление этого фактора вызвано разными механизмами реализации процесса разрушения кусков кокса при испытании его в малом барабане:

1) показатель M25 характеризует разрушение кокса по механизму дробления, ведущему к образованию более прочных “отдельностей”;

2) показатель M10 дает оценку процесса разрушения кокса по механизму истирания, ведущему к образованию мелких классов.

Полученные нами данные говорят о том, что степень смешения компонентов шихты как технологический фактор формирует микроструктуру куска кокса и потому преимущественно проявляет себя на показателе “холодной” прочности M10.

Отсюда следует, что этот фактор является существенным также для воздействия на показатели “горячей” прочности и реакционной способности кокса (CSR и CRI соответственно).

ЛИТЕРАТУРА

1. Горский В.Г. Симплексный метод планирования экстремальных экспериментов / В.Г.Горский, В.З.Бродский // Заводская лаборатория. – 1965. – № 7. – С.831-836.

Поступила в редколлегию 20.04.2012.