

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ  
СОСТАВЛЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШИХТ  
ИЗ УГЛЕЙ РАЗНЫХ БАССЕЙНОВ**

© 2010 Кафтан Ю.С., к.т.н.,  
Дроздник И.Д., к.т.н.,  
Мирошниченко Д.В., к.т.н.,  
Бидоленко Н.Б.,  
Головки М.Б. (УХИН)

*Угольная сырьевая база коксохимических заводов Украины включает угли разных стран и бассейнов, резко различающихся по технологическим свойствам и петрографическим характеристикам. Существовавшая ранее практика не позволяет достоверно оценивать технологическую ценность угольных концентратов и шихт. С учетом мирового и отечественного опыта использования петрографических характеристик в практике составления производственных шихт были разработаны комплексные петрографические показатели  $C_{cu}$  (спекаемость) и  $K_{cu}$  (коксовость), включающие данные мацерального состава и рефлектограмму витринита таких шихт. Промышленный опыт использования этих показателей на ряде заводов, лаборатории которых были оснащены петрографическими комплексами фирмы «Лекс», дал хорошие результаты. Разработаны математические модели описания показателей прочности кокса по данным петрографических исследований.*

*A coal source raw of materials of coal-chemical factories of Ukraine includes coals of different countries, which are sharply differentiating on technological properties and petrographic descriptions. Existing practice does not allow to estimate the actual technological value of coal concentrates and charges. Taking into account world and experience of the use of petrographic descriptions in practice of productions charges the complex petrographic indexes of  $C_{cu}$  cakingability and  $K_{cu}$  cakingability were developed. Industrial experience of the use of these indexes on the factories, laboratory of which were equipped by the petrographic complexes of firm of «Leks», showed a positive results. The mathematical models of description of indexes of durability of coke are developed from data of petrographic researches.*

Ключевые слова: межбассейновая сырьевая база коксования, мацеральный состав, рефлектограмма витринита, комплексные петрографические показатели, кокс, прогнозирование, математические модели.

Известно [1, 2, 3], что органическая масса углей состоит в основном из трех групп веществ, различающихся по петрографическим признакам, элементному составу и технологическим характеристикам. По петрографическим признакам эти вещества различаются по цвету, структуре, микрорельефу и отражательной способности. Таким образом идентифицируются мацералы группы витринита, липтинита и инертинита. Считается, что они образованы из различных растительных остатков. Так, витринит образовался из целлюлозы и лигнина; липтинит – из смол, восков, кутикул, спор, алыг и водорослей. Происхождение мацералов группы инертинита не столь однозначно. Степень превращенности в нем наиболее высока, хотя при этом сохранилась исходная клеточная структура растений-углеобразователей.

Все указанные мацералы неодинаковы по содержанию углерода, водорода, кислорода, а также различаются по выходу летучих веществ и спекаемости. Свойства мацералов групп липтинита и инертинита мало изменяются у каменных углей под влиянием факторов метаморфизма. Липтинит характеризуется низкой термической стойкостью, что приводит к повышенному выходу летучих веществ и раннему образованию значительных количеств жидкоподвижных продуктов термической деструкции. Инертинит, напротив, при нагреве не образует пластично-вязкие продукты и характеризуется пониженным выходом летучих веществ.

Мацералы группы витринита существенно изменяют свойства под действием факторов метаморфизма. На ранних стадиях метаморфизма они характеризуются низкой спекаемостью и высоким выходом летучих веществ. При повышении стадии метаморфизма проявляется все более выраженная способность витринита образовывать значительные количества термоустойчивых жидких продуктов термической деструкции, что, в свою очередь, обуславливает повышенную спекаемость. Она достигает максимума у витринита средних стадий метаморфизма и

снижается вплоть до полного исчезновения у углей высоких стадий метаморфизма. Выход летучих веществ из мацералов группы витринита с ростом стадии метаморфизма закономерно снижается.

Отражательная способность витринита (блеск угля) является наиболее наглядным внешним выражением глубоких изменений строения и состава органических веществ угля, происходящих в процессе метаморфизма. Признано, что показатель отражения витринита – наиболее надежный параметр для количественной оценки метаморфизма углей. По данным замера показателя отражения на всей поверхности испытуемой пробы помимо среднего значения показателя отражения рассчитывается стандартное отклонение от среднего значения. Последнее дает количественную оценку степени неоднородности веществ, слагающих витринит. Строится также рефлектограмма распределения значений показателя отражения с интервалом, равным 0,1 (0,05) % от общего числа замеров. Это позволяет дать количественную оценку процентного соотношения низко-, средне- и высокометаморфизованных составляющих угля. Рефлектограммный анализ позволяет установить фактическое наличие в товарной продукции шахт, в

конcentратах углеобогатительных фабрик и в угольных шихтах составляющих витринита, соответствующих той или иной марке угля.

Угольная сырьевая база коксохимических заводов Украины в настоящее время характеризуется наличием в ее составе углей различных стран и бассейнов: Украина (Донецкий бассейн), Россия (Кузнецкий, Печорский, Южно-Якутский бассейны), Казахстан (Карагандинский бассейн), США (Аппалачский бассейн). Угли указанных стран резко различаются по комплексу технологических свойств и по петрографическим характеристикам.

Обогатительные фабрики Украины в основном не имеют постоянной угольной сырьевой базы, в результате чего вынуждены обогащать угли двух и более марок, что приводит к взаимозасорению и снижению технологической ценности получаемого концентрата. В связи с этим декларируемая в удостоверениях качества марочная принадлежность концентратов зачастую не соответствует действительности, что затрудняет получение кокса планируемого качества. В табл. 1 и 2 приведены примеры фактического качества концентратов донецких и зарубежных углей.

Таблица 1

Технологические свойства угольных концентратов

Происхождение пробы	Марка по удостоверению	Технический анализ, %				Пластметрические показатели, мм		Средний показатель отражения витринита, %
		A <sup>d</sup>	S <sub>t</sub> <sup>d</sup>	V <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	x	y	
ЦОФ «Дзержинская»	Ж	10,0	2,64	31,6	35,2	45	17	0,86
ЦОФ «Пролетарская»	К	8,1	1,15	23,2	25,2	23	14	1,25
ЦОФ «Калининская»	К	9,6	1,70	23,2	23,6	16	17	1,28
ЦОФ «Узловская»	ОС	6,8	0,38	16,5	17,7	12	7	1,68
ЦОФ «Березовская»	К+КО+КС	9,3	0,50	19,2	21,2	27	10	1,27
Разрез «Черниговец»	КСН	8,9	0,29	20,5	22,5	33	6	1,15
ЦОФ «Печорская»	ГЖО	9,5	1,09	31,9	35,2	29	13	0,82
ЦОФ «Восточная»	КЖ+К+КО	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

Как видно из данных табл. 1, марочная принадлежность донецких углей, задекларированная в удостоверениях качества, формально подтверждается значениями классификационных показателей. Однако рефлектограммы витринита указывают на то, что витринитовая составляющая рассматриваемых углей крайне неоднородна. Она включает составляющие, соответствующие практически всему метаморфическому ряду. Для зарубежных углей, помимо значительной неоднородности витринита, характерно

также высокое содержание низколетучих неспекающихся мацералов группы инертинита. Таким образом, существовавшая ранее практика шихтования с учетом марочной принадлежности концентратов, а также данных их технического анализа и пластметрических показателей, не позволяет оценить фактическую технологическую ценность углей и прогнозировать ожидаемое качество кокса из шихт с их участием.

Таблица 2

Петрографические характеристики угольных концентратов

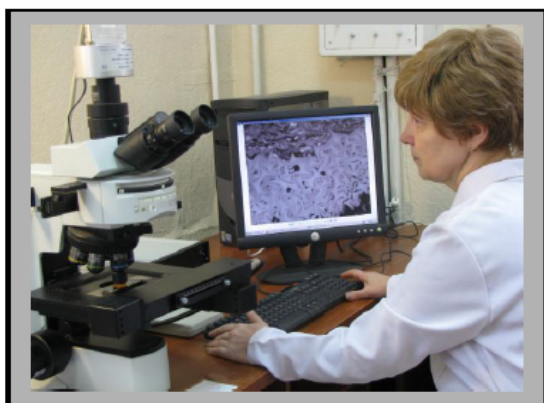
Происхождение пробы	Мацеральный состав чистого угля, %				Сумма отошающих компонентов, %	Средний произвольный показатель отражения витринита, %	Рефлектограмма витринита, %																					Стандартное отклонение
	Vt	Sv	I	L			Σ ОК	R <sub>0</sub> , г	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	σ		
ЦОФ «Дзержинская»	90	1	7	2	8	0,86	14	17	5	21	15	14	9	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,212			
ЦОФ «Пролетарская»	92	0	8	0	8	1,25	0	0	2	8	1	9	29	20	6	4	13	6	2	0	0	0	0	0	0,228			
ЦОФ «Калининская»	89	0	11	0	11	1,28	0	0	0	3	9	13	19	22	4	3	16	7	1	1	1	1	0	0,249				
ЦОФ «Узловская»	89	1	10	0	11	1,68	0	0	0	0	1	1	2	2	8	7	10	20	21	13	5	4	6	0,249				
ЦОФ «Березовская»	41	2	57	0	59	1,27	0	0	0	0	5	18	8	16	31	20	2	0	0	0	0	0	0	0,160				
Разрез «Черниговец»	33	3	63	1	65	1,15	0	0	1	6	25	17	8	15	15	10	3	0	0	0	0	0	0	0,195				
ЦОФ «Печорская»	70	0	28	2	28	0,82	0	7	41	31	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,096				
ЦОФ «Восточная»	60	1	38	1	39	1,19	0	0	2	7	6	17	23	16	13	13	3	0	0	0	0	0	0	0,186				
СПА «Альфа»	72	2	23	3	25	1,16	0	0	3	8	21	17	11	8	13	10	9	0	0	0	0	0	0	0,225				
СПА «Альфа»	78	1	15	6	16	0,89	0	1	12	42	34	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,085				

Многолетняя мировая практика [3] и исследования, проведенные в связи с разработкой единой промышленно-генетической классификации в странах-членах СНГ [4], показали, что надежный входной контроль качества поступающих на завод концентратов и научно-обоснованное составление угольных шихт невозможно без использования петрографических показателей: мацерального состава, среднего показателя отражения и рефлектограммы витринита.

В связи с изложенным по рекомендации УХИНа большинство лабораторий коксохимических заводов Украины было оснащено высокопроизводительными автоматизированными петрографическими комплексами «Lucia» фирмы «LECO».

Сотрудниками УХИНа была оказана консультативная и научно-методическая помощь лабораториям ОАО «Запорожжкокс», ОАО «Ачевсккокс», ОАО «АКХЗ», ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в освоении этих установок и введении петрографических характеристик в схему контроля поступающих угольных концентратов и производственных шихт.

В результате анализа и обобщения опыта использования петрографических методов исследования углей и шихт в УХИНе были разработаны границы значений показателя отражения для отдельных групп составляющих витринита, которые условно соответствуют маркам углей, обычно используемым для коксования, вне зависимости от их бассейновой принадлежности.



«Условная» шкала соответствия стадий отражения витринита маркам угля имеет следующий вид:

Стадии метаморфизма витринита, $R_o$ , %:	Марка угля:
Менее 0,5	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	ОС
1,70-2,59	Т
более 2,60	А

Как показали исследования, проведенные на углях Кузнецкого бассейна [2], Карагандинского бассейна [5], США [6], Индии и ЮАР [3], каждому значению показателя отражения витринита соответствуют определенные значения спекаемости и коксующести, близкие для углей разных бассейнов и стран. Так, витринит средних стадий метаморфизма ( $R_o = 0,90-1,39$  %) представляет составляющие витринита, которые в процессе термической деструкции образуют значительные количества термостойких жидких продуктов, способных, взаимодействуя с остаточным материалом деструктирующих зерен и инертными составляющими органической массы угля, образовывать кокс различной прочности. Количество указанных составляющих витринита в пересчете на органическую массу угля (в %), названное нами комплексным показателем, характеризующим спекаемость шихты [7], рассчитывается по формуле:

$$C_{ш} = \frac{\sum(0,90 - 1,39)Vt}{100} \quad (1),$$

где:  $\sum(0,9-1,39)$  – содержание составляющих витринита с величиной показателя отражения от 0,90 до 1,39 %;

$Vt$  – содержание мацералов группы витринита, %.

Чем выше величина комплексного показателя  $C_{ш}$ , тем лучше должны быть прочностные характеристики получаемого из этой шихты кокса.

Помимо составляющих витринита, условно соответствующих углям марок Ж и К, мацералы группы липтинита также образуют при термической деструкции заметное количество жидкоподвижных продуктов, активно участвующих в процессах спекания и коксообразования, поэтому их необходимо учитывать при оценке потенциала спекаемости угля или шихты в целом.

В то же время, мацералы группы инертинита, которые не обладают способностью спекаться, должны рассматриваться, как отошающая добавка – аналогично неспекающимся составляющим витринита, условно соответствующим углям марок Т и А. Составляющие витринита, соответствующие углям марок ДГ, Г и ОС, обладают невысокой спекаемостью, однако проявляют способность, в отличие от инертных материалов, вступать в химическое взаимодействие с составляющими, соответствующими углям марок Ж и К.

С учетом изложенного был разработан второй комплексный показатель, отражающий соотношение хорошо спекающихся составляющих органической массы углей и шихт к инертным составляющим [8]. Этот показатель (в условных единицах), названный нами показателем коксующести, рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{ш} = \frac{(\sum(0,90 - 1,39)Vt/100) + L}{\sum OK + \sum(\geq 1,70)Vt/100} \quad (2),$$

где:  $\sum(0,90-1,39)$  – содержание составляющих витринита с величиной показателя отражения от 0,90 до 1,39 %, %;

$Vt$  – содержание мацералов группы витринита, %;

$L$  – содержание мацералов группы липтинита, %;

$\sum OK$  – сумма отошающих мацералов ( $I^{+2}/_3Sv$ ), %;

$\sum(\geq 1,70)Vt/100$  – содержание составляющих витринита с величиной показателя отражения 1,70 % и более, %.

Показатель  $K_{ш}$  представляет собой отношение суммарного содержания составляющих витринита с показателем отражения от 0,9 до 1,39 % (которые проявляют высокую спекаемость и обладают способностью принимать отошающие присадки) и мацералов группы липтинита к сумме отошающих мацералов и неспекающихся составляющих витринита с показателем отражения более 1,7 %. Естественно, чем выше это отношение, тем большая вероятность при прочих равных условиях (т.е. при близости среднего произвольного показателя отражения и выхода летучих веществ) получения малоостирающегося и мелкодробимого кокса.

Таким образом, показатели  $C_{ш}$  и  $K_{ш}$  позволяют дать обобщающую количественную оценку петрографических характеристик угольных шихт, включающую в себя данные определения мацерального состава и рефлектограммного анализа.

Одним из существенных достоинств разработанных показателей Сш и Кш является возможность расчета их величины для угольной смеси по данным о содержании и качестве входящих в эту смесь компонентов.

В табл. 3 и 4 приведены примеры использования показателей Сш и Кш для оптимизации угольных шихт с целью улучшения прочностных характеристик получаемого металлургического кокса.

Таблица 3

Предприятие	Шихта	Технический анализ, %				Пластометрические показатели, мм		Показатели прочности кокса, %	
		A <sup>d</sup>	S <sub>t</sub> <sup>d</sup>	V <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	x	y	M <sub>25</sub>	M <sub>10</sub>
ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»	производственная, 1 очередь (бат. №1, 2, 3)	11,0	0,74	26,6	29,9	36	16	84,5	8,9
	оптимизированная	10,0	0,70	25,7	28,5	15	17	87,0	7,9
ОАО «Запорожжкокс»	производственная	8,9	1,51	28,4	30,7	24	15	86,3	7,9
	опытная	9,3	1,52	26,9	29,6	18	16	87,1	7,7

Таблица 4

Предприятие	Шихта	Петрографический состав (без учета минеральных примесей), %		Средний показатель отражения витринита, %	Стадии метаморфизма витринита, %							Спекаемость шихты, %	Коксующесть шихты			
		Vt	Sv		I	L	Σ OK	R <sub>0</sub>	Д	ДГ	Г			Ж	К	ОС
		Марки угля, условно соответствующие стадиям метаморфизма витринита:							Сш	Кш						
ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»	производственная, 1 очередь (бат. №1, 2, 3)	73	1	24	3	25	1,05	0	4	35	45	4	6	5/1	35,28	1,306
	оптимизированная	73	1	24	2	25	1,09	0	0	17	61	13	8	1	54,02	2,177
ОАО «Запорожжкокс»	Производственная шихта	77	1	21	1	22	0,96	0	6	36	46	10	2	0	43,12	2,005
	Опытная шихта	83	1	15	1	16	1,06	0	1	26	54	9	9	1	52,29	3,173

Так, на ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» у оптимизированной шихты незначительно увеличилась толщина пластического слоя (с 16 до 17 мм), на 0,04 % повысился показатель отражения витринита и на 1,5 % снизился выход летучих веществ. Таким образом, указанные показатели не отразили каких-либо существенных изменений свойств оптимизированной шихты сравнительно с производственной. В то же время, показатели Сш и Кш заметно улучшились у оптимизированной шихты (соответственно с 35,28 до 54,02 % и с 1,306 до 2,177). Заметное улучшение свойств опытной шихты нашло отражение в столь же заметном улучшении показателей M<sub>25</sub> и M<sub>10</sub> с 84,5 до 87,0% и 8,9 до 7,9 % соответственно.

Аналогичная картина наблюдается и для условий ОАО «Запорожжкокс» [9]. Кокс из опытной шихты,

оптимизированной по показателям Сш и Кш, имеет более высокие прочностные характеристики, чем из производственной шихты.

В работе [7] были проведены результаты коксования вариантов шихт, включающих все типы донецких углей, используемых для коксования, и два типа кузнецких углей, в наибольших количествах представленных в поставках кузнецких углей на Украину. В результате математической обработки полученных результатов установлено, что использование показателей Сш и Кш совместно с параметрами V<sup>daf</sup> или R<sub>0</sub> шихты в математических моделях существенно повышает точность прогноза показателей M<sub>25</sub> и M<sub>10</sub> кокса по сравнению с моделями, в которых используются параметры V<sup>daf</sup> или R<sub>0</sub> и у.

Указанные математические модели представляют собой регрессионные уравнения первой степени со следующими статистическими оценками:

R – коэффициент множественной корреляции;

D = 100 · R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации;

σ – среднеквадратичное отклонение расчетных данных от фактических.

В табл. 5 приведены полученные регрессионные уравнения зависимости прочности кокса от свойств шихты.

Таблица 5

Математические модели описания показателей прочности кокса по показателям свойств шихты

№ модели	Вид модели	Статистические оценки		
		R	D, %	σ, %
1	$M_{25}=26,984 \cdot R_0+0,364 \cdot y+53,437$	0,809	65,4	1,11
2	$M_{10}=-6,050 \cdot R_0-0,028 \cdot y+13,931$	0,769	59,1	0,27
3	$M_{25}=15,7346 \cdot R_0+0,1662C_{ш}+63,7045$	0,962	92,5	0,51
4	$M_{10}=-4,1104 \cdot R_0-0,0324 C_{ш}+12,905$	0,899	80,8	0,20
5	$M_{25}=22,6481 \cdot R_0+1,4171K_{ш}+59,2555$	0,941	88,6	0,63
6	$M_{10}=-5,424 \cdot R_0-0,2978K_{ш}+13,8092$	0,903	81,5	0,19
7	$M_{25}=14,1107 \cdot R_0+0,2067C_{ш}-0,3821 \cdot K_{ш}+64,851$	0,963	92,7	0,51
8	$M_{10}=-4,965 \cdot R_0-0,0111C_{ш}-0,2011 K_{ш}+13,5084$	0,963	92,7	0,15

Как видно из приведенных в табл. 5 аппроксимирующих уравнений, использование показателей Сш и Кш совместно с R<sub>0</sub> обеспечивает детерминацию показателя M<sub>25</sub> на 88,6-92,5 % а показателя M<sub>10</sub> – на 80,8-81,5 %. При этом величина стандартного отклонения для указанных показателей прочности существенно ниже, чем погрешность параллельных измерений показателей M<sub>25</sub> и M<sub>10</sub>. Совместное использование в математических моделях показателей Сш и Кш практически не повышает точности прогноза показателя M<sub>25</sub> и несколько улучшает точность прогноза показателя M<sub>10</sub>. Это обусловлено особенностями полученной выборки, для которой показатели Сш и Кш находятся в тесной взаимосвязи, так как содержание неспекающих составляющих органической массы в шихтах (Σ ОК) изменяется в узких пределах: от 12 до 16 %.

В то же время в шихтах некоторых заводов содержание отошающих мацералов достигает 35 %, что при достаточно высоком значении Сш может привести к заметному ухудшению показателей прочности кокса и, прежде всего, его истираемости.

Подставляя в указанные в табл. 5 уравнения значение показателя R<sub>0</sub> шихты, равное 1,0, которое характерно для большинства угольных шихт коксохимических заводов Украины, рассчитываем значения показателей Сш и Кш шихты, обеспечивающее получение кокса с прочностными характеристиками M<sub>25</sub> и M<sub>10</sub> равными 88,0 и 7,0 % соответственно. Расчет показывает, что этим значениям прочностных показателей кокса соответствуют следующие значения показателей шихты: Сш – 51,5-55,4 %; Кш – 4,3-4,6%.

Естественно, что особенности режима подготовки и коксования углей, существующие на каждом заводе, могут вносить определенные коррективы в уровень абсолютных значений показателей M<sub>25</sub> и M<sub>10</sub>,

рассчитываемых по величине значений Сш, Кш и R<sub>0</sub>. В связи с этим необходимо для конкретных заводских условий и фактических значений показателей прочности кокса уточнить коэффициенты в прогнозирующих уравнениях.

В то же время, зная величины комплексных петрографических показателей, можно дать обоснованную сравнительную оценку потенциала спекаемости и коксемости производственных шихт разных заводов, характеризовать технологическую ценность планируемых к поставке шихт, а также оперативно корректировать составы производственных шихт.

В заключение необходимо констатировать, что применение петрографических характеристик и разработанных на их основе комплексных показателей в условиях сложной межбассейновой сырьевой базы, используемой на ряде коксохимических заводов Украины, позволяет обоснованно оценивать технологическую ценность угольных концентратов и производственных шихт.

#### Библиографический список

1. Аронов С.Г., Нестеренко Л.Л. Химия твердых горючих ископаемых. – Харьков: Издательство Харьковского госуниверситета, 1960. – 371 с.
2. Амосов И.И., Еремин И.В., Банникова Н.И. и др. Петрографические особенности и свойства углей. – М.: Издательство АН СССР, 1963. – 380 с.
3. Штах Э., Маковски Т. М., Технолдер и др. Петрология углей. – М.: Мир, 1978. – 555 с.
4. Еремин И.В., Броновец Т.М., Ольшанецкий Л.Г., Кафтан Ю.С. Единая промышленно-генетическая классификация углей СССР // Кокс и химия. – 1983. – № 5. – С 4-10.

5. Глушенко И.М. Прогноз качества кокса. – М.: *Металлургия*, 1976. – 200 с.
6. Scharif N., Gray R. J. // *Fuel*. – 1964. – V. 37. – P. 234-239.
7. Кафтан Ю.С., Дроздник И.Д., Мирошниченко Д.В., Бидоленко Н.Б., Рыщенко А.И. Взаимосвязь органической и минеральной частей угольной шихты с «холодной и «горячей» прочностью кокса // *Углехимический журнал*. – 2007. – № 3-4. – С. 3-13.
8. Чернышов Ю.А., Овчинникова С.А., Поддубный А.В., Кафтан Ю.С., Бидоленко Н.Б. Использование петрографических характеристик и новых комплексных показателей для оценки свойств углей и межбассейновых шихт ОАО «Запорожжкокс» // *Углехимический журнал*. – 2009. – № 1-2. – С. 12-20.
9. Фоменко А.П., Набока В.И., Крутас Н.В., Шаранов М.Е., Рубчевский В.Н., Чернышов Ю.А., Коптаниец А.И., Поддубный А.В., Ковалев Е.Т., Шульга И.В., Кафтан Ю.С. Опытная доменная плавка на коксе улучшенного качества ОАО «Запорожжкокс» // *Кокс и химия*. – 2009. – № 4. – С.17-23.

Рукопись поступила в редакцию 29.04.2010

