

Флюс 4	38,80 7			3,6518	13,27	38,8072	40,7476	4,1	42,4454
Твёрдое топливо:									
Топливо 1	28,87 9	0,5163	23,225 1	0,1464	0,603	28,8798	29,9194	11,5	33,8073
Топливо 2	15,21 2	0,0063	8,7162	0,3787	4,058	15,2115	15,7591	59,85	39,2505
Всего шихты	1054, 2	1,0007	45,150 0	20,577 6	28,12	1054,183	1089,397	8,05	1184,80
Прирост (+), потеря (-)		-0,7005	-42,892		-26,9				
Агломерат		0,3002	2,2575	20,577 6	1,181	1000,192			

Невязка расчета: $[(1000 - 1000,192) / 1000] \cdot 100 = -0,019 \%$

Полный рассчитанный химический состав агломерата приведен в табл. 10.

Таблица 10

Расчетный химический состав агломерата, %									
Материал	Fe _{общ}		Mn _{общ}	P	S _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Агломерат	55,21		1,05	0,026	0,032	14,00	63,38	7,68	1,14
Материал	CaO	MgO	MnO	SO ₃	P ₂ O ₅	C _r	Прочие	ппп	Всего оксидов
Агломерат	8,83	1,03	1,36	0,08	0,06	0,23	2,09	0,12	100

$CaO / SiO_2 = 1,1497$ д.ед. (при заданной 1,15)

Вывод. Разработана программа расчета удельных расходов компонентов шихты для производства окускованного сырья (агломерата и окатышей) для доменной плавки, которая позволяет производить с высокой точностью (невязка менее 0,05 %) расчет химического состава готового продукта из широкого набора компонентов шихты. Расчет производится с точностью до четвертого знака после запятой. Расчет был опробован в цехах по производству агломерата и окатышей и показал существенное увеличение точности химического состава полученного продукта по сравнению с используемыми на предприятиях.

Рукопись поступила в редакцию 23.03.13

УДК 662.749:067.5

В.П. ЛЯЛЮК, д-р техн. наук, проф.,

Д.А. КАССИМ, И.А. ЛЯХОВА, В.П. СОКОЛОВА, кандидаты техн. наук, доц.,

КМИ ГВУЗ "Криворожский национальный университет"

КАЧЕСТВО КОКСА И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ

Предложена методика определения показателя $K_{\text{опт}} (V_t)$, позволяющего осуществлять как оперативную оценку оптимальности состава коксующей угольной шихты, так и прогнозировать механическую прочность кокса.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Одними из основных направлений и способов повышения качества кокса является оптимизация марочного состава и свойств угольной шихты, которые определяют физико-механические свойства кокса. При постоянстве технологии подготовки угольной шихты и температурных режимов коксования единственным инструментом, имеющимся у специалистов коксохимического передела и позволяющим управлять прочностью кокса, является состав и качество угольной шихты [1]. Состав угольной шихты и колебания ее качества на 70-80 % определяют прочность кокса. В связи с этим в практике работы коксохимических предприятий для улучшения качества кокса основное внимание уделяют угольной сырьевой базе коксования, а именно оптимизации состава и качества шихты [2].

Анализ исследований и публикаций. В СССР оптимальные составы угольных шихт для конкретных коксохимических предприятий разрабатывали, и при необходимости, корректировали специалисты отраслевых институтов ВУХИН и УХИН. Так опыт работы коксохимических заводов Украины и исследования УХИН в 1969-1970 гг. в области совершенствования технологии производства кокса показывали, что оптимальной шихтой был следующий марочный ее состав: Г 32, Ж 35, К 15, ОС 15, Т 3 [3].

В статье [4], опубликованной в 2000 году, авторы отмечают, что существующая классическая технология слоевого коксования обеспечивает производство кокса из донецких углей с показателями прочности M_{25} 90 % и истираемости M_{10} 6 %. При этом шихта для коксования должна быть следующего состава, %: Г 25-30; Ж 35-40; К 15-20; ОС 15-20; при суммарном содержании жирных и коксовых углей 50 %. Толщина пластического слоя такой угольной шихты должна быть не менее 16 мм, выход летучих веществ не более 28 %, содержание класса 0-3 мм 75-80 %.

В период 2004-2006 гг. на коксохимических предприятиях Украины коксовали шихты со средней массовой долей углей Донбасса 68-73 % и марочным составом: Г 21; Ж 25-26; К 22-26; ОС 1,8-2,2 %. Массовая доля импортируемых углей из России была в среднем 27-32 %. При производстве кокса только из углей Донецкого бассейна оптимальным считали следующий марочный состав шихты, %: Г 32; Ж 35; К 18; ОС 15, коксование которой обычным слоевым методом обеспечивало получение прочного кокса (M_{25} 88-90 % и M_{10} 6,0-6,5) [5].

Авторы работы [6] предложили определиться с критериями оптимальности угольной шихты с точки зрения получения кокса максимально возможной прочности. Критерии оптимальности угольных шихт распространяются как на марочный состав, так и на свойства угольных шихт. Они находятся в тесной взаимосвязи и не исключают, а дополняют друг друга. Оптимальность марочного состава определяется тем, какое сырье используется в качестве спекающей основы шихты. Оптимальный марочный состав шихты для коксования из Кузнецких углей, на которых работали практически все коксохимические предприятия России в то время (до 2000 года) выглядел следующим, %: ГЖ 20-25; Ж 25-20; ОС+К+КО 35-40; КС 20-15.

Авторы работы [6] также отмечают, что критерии оптимальности распространяются и на ряд показателей свойств шихты. Оптимальная шихта независимо от присутствия в ней того или иного угольного сырья должна соответствовать следующим показателям: $V^d \geq 25$ % (что в пересчете на V^{daf} составляет 27-27,8 %); $u \geq 15$ мм; $R_{o,n} \geq 1,12$ %; $V_t > 60$ % (на безминеральную массу). Этой точки зрения придерживаются и авторы работы [7], которые отмечают, что указанные оптимальные значения свойств являются едиными для любых шихт, независимо от бассейнового сырья.

Авторы работы [6] делят шихту на группы: спекающую основу (Ж+ГЖ+КЖ), коксовую присадку (ОС+К+КО), отошающую присадку (КС+КСН), слабоспекающиеся (Г+ГЖО+ТС) и некоксуемые (Д+ДГ+СС+Т). Согласно их расчетам оптимальное содержание спекающей основы угольной шихты для Череповецкого металлургического комбината колебалось в диапазоне 48-49,7 %, коксовой присадки 34-36 % и отошающей присадки 15,8-16,4 %.

Нарушение критериев оптимальности стало проявлять себя с наступлением дефицита углей коксовой группы (ОС+К+КО), представляющих сырье с пониженным выходом летучих веществ и повышенной коксуюмостью [7]. Сегодня угольная сырьевая база и шихта России по критериям оптимальности марочного состава не соответствует требованиям производства высококачественного по прочности кокса из-за дефицита коксовой основы [8].

При делении шихты на спекающие и отошающие компоненты авторы работы [9] оптимизацию ее состава производят по их соотношению, %: 43:57 (средние), содержанию коксовых углей 37 % в отошающих компонентах, содержанию углей марки Ж 23 % в спекающей части. Исходя из этого, для оценки оптимальности состава угольных шихт предложен обобщающий показатель – коэффициент оптимальности K_{opt} , который они предлагают считать мерой приближения производственного марочного состава угольной шихты к базовому оптимальному. Данный показатель рассчитывается как произведение коэффициентов оптимальности по трем параметрам [9]

$$K_{opt} = 100(K_c \cdot K_k \cdot K_j), \%$$

где K_c – коэффициент оптимальности соотношения спекающих и отошающих компонентов $K_c = [100 - (\Sigma SK - 43) \cdot 2] / 100$; K_k – коэффициент оптимальности содержания в шихте коксовых углей $K_k = [100 - (\Sigma K - 37)] / 100$; K_j – коэффициент оптимальности содержания в шихте жирных углей $K_j = [100 - (\Sigma J - 23)] / 100$.

В приведенных формулах K_c , K_k и K_j подсчитывается абсолютная величина разности между фактическим и оптимальным содержанием без учета знаков \pm . Из формулы K_{opt} следует, что шихта оптимизирована на 100 % лишь в идеальном случае, когда каждый из коэффициентов K_c , K_k и K_j равен 1, т.е. шихта оптимизирована по всем трем параметрам. В работе [9] установлено, что чем выше значение K_{opt} тем прочнее кокс, показатели M_{40} и M_{25} растут. Также отмечается, что предлагаемый показатель K_{opt} позволяет осуществлять как оперативную оценку оптималь-

ности состава коксующей угольной шихты, так и в ретроспективе, а также прогнозировать механическую прочность кокса.

В работе [5] также использовали для оценки оптимальности состава угольной шихты коксохимических предприятий Украины коэффициент $K_{\text{опт}}$, принимая во внимание высказывание авторов работы [9], что этим коэффициентом можно объективно оценить состояние сырьевой базы коксования как в целом по России, так и различных коксохимических предприятий. В связи с этим в уравнениях определения коэффициентов K_c , K_k и K_j были оставлены значения 43, 37 и 23, как оптимальные, и для коксохимических предприятий Украины. Выполненный анализ для коксохимических предприятий Украины за период 2004-2006 гг. показал, что изменение коэффициента $K_{\text{опт}}$ по годам свидетельствует об ухудшении состояния сырьевой базы коксования в целом для заводов Украины. Так, в 2004 году $K_{\text{опт}} = 77,4 \%$, в 2005 году $K_{\text{опт}} = 73 \%$, а в 2006 году $K_{\text{опт}} = 66,9 \%$. Это обусловлено, главным образом, снижением величины коэффициента K_c , т.е. возрастанием дефицита углей спекающей основы шихты. Авторы также установили, что с ростом коэффициента $K_{\text{опт}}$ в коксе снижается показатель M_{10} и растет M_{25} , т.е. качество кокса улучшается. Подытоживая свои исследования, авторы работы [5] делают вывод, что коэффициент $K_{\text{опт}}$ представляет собой объективную количественную характеристику оптимальности марочного состава шихты как в целом по Украине, так и по отдельным цехам и заводам.

Постановка задачи. Используя методику определения коэффициента $K_{\text{опт}}$ и его компонентов, определим их значения по результатам работы коксохимических предприятий Украины в 2010 и 2011 гг. В уравнениях определения коэффициентов K_c , K_k и K_j оставим принятые в работах [5 и 9] коэффициенты 43, 37 и 23 как оптимальные. Результаты расчетов показали, что средний показатель $K_{\text{опт}}$ для коксохимических предприятий Украины в сравнении с 2004-2006 гг. продолжал снижаться до 49,7 % в 2010 г. и до 43,6 % в 2011 г. Кроме того, высокое значение $K_{\text{опт}}$ не всегда соответствует показателям наиболее прочного кокса. Указанное несоответствие взаимосвязи улучшения качества кокса с ростом коэффициента оптимальности иллюстрирует зависимость между показателями M_{25} от $K_{\text{опт}}$ украинских коксохимических предприятий за 2010-2011 гг., приведенная на рис. 1.

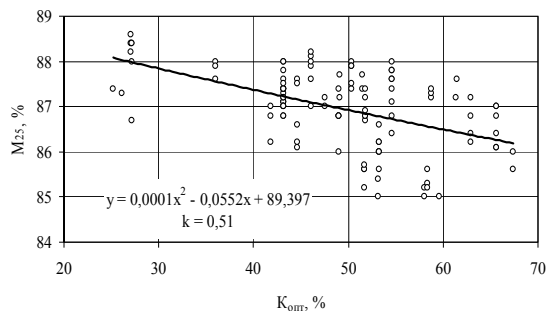


Рис. 1. Взаимосвязь между показателями $K_{\text{опт}}$ и M_{25} украинских коксохимических предприятий в 2010-2011 годах

Анализ изменения коэффициента оптимальности угольной шихты на КХП ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” с учетом данных, приведенных в работе [5], также свидетельствует о низком уровне оптимизации марочного состава угольной шихты и нестабильности сырьевой базы коксования предприятия. Так, если в 2004 году $K_{\text{опт}} = 63,4 \%$, а в 2005 = 53,7 %, то в 2010 году $K_{\text{опт}} = 67,9 \%$, а в 2011 году произошло довольно резкое снижение $K_{\text{опт}}$ до 38,5 %.

По суточным данным о работе КХП “АрселорМиттал Кривой Рог” за 2011 год нами был определен коэффициент оптимальности $K_{\text{опт}}$ по методике, изложенной в работе [9], с учетом предложенных оптимальных значений коэффициентов 43, 37 и 23 при расчете значений K_c , K_k и K_j , соответственно, и проанализировано влияние данного показателя на механическую прочность кокса КХП по показателю M_{25} (рис. 2).

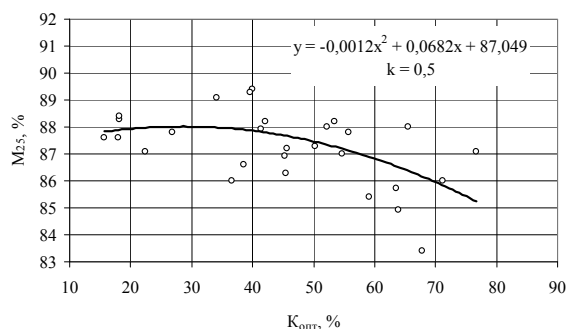


Рис. 2. Зависимость механической прочности кокса от коэффициента оптимальности

Как видно из рисунка, для условий работы КХП в 2011 г., также получена обратная зависимость, т.е. с увеличением $K_{\text{опт}}$ показатель прочности кокса M_{25} не увеличивается, а снижается. По нашему мнению такое различие полученных результатов и данных, приведенных в работах [5,9], может быть обусловлено, во-первых, тем, что ряд concentra-

тов отдельных углеобогащительных фабрик, маркируемых в удостоверении как уголь одной марки, фактически являются смесью углей различных марок. Во-вторых, тем, что для конкретных условий работы коксохимического завода необходимо определять оптимальный марочный состав шихты ориентируясь, при этом, на максимальные значения показателей качества полученного на предприятии кокса.

Изложение результатов исследований. В течение 2011 г. на коксохимическом производстве “АрселорМиттал Кривой Рог” поступали угольные концентраты разных поставщиков Украины, России, Казахстана и дальнего зарубежья (корпорации “АрселорМиттал”). Так как спекаемость коксующихся углей по толщине пластического слоя (y) исследователи дальнего зарубежья (кроме индийских) не определяют, то в качестве классификационного показателя при установлении соответствия марочной принадлежности американских концентратов в соответствии с ДСТУ 3472:2010 “Угли бурые, каменные и антрацит. Классификация” был выбран выход летучих веществ (V^{daf} , %). Сертификатные значения выхода летучих веществ марок импортных углей имели следующие значения V^{daf} , %: MV Blend - 29,0; Shoal Creek - 26,5-29,0; Clear Creek - 28,0; Mechel Creek - 29,0; Toms Run, Xcoal - 29,0; HV INR - 35; HV Blend - 35,5; High Volatile Fluid Cjal - 35,0. Следовательно марки импортных углей группы HV отвечают украинским углям марок ДГ и Г, а все остальные рассмотренные марки - углям марок К и Ж.

В связи с тем, что фактический состав шихты радикально отличается от того, который дается в задании на дозировку входящих в нее компонентов, большое значение имеет правильное определение и подбор марочного состава. Для чего целесообразно, наряду с показателями выхода летучих веществ и спекаемости, использовать петрографический и рефлектограммный анализы. Установленный с помощью данных петрографического анализа компонентный состав шихты позволяет, прежде всего, оценить истинное количество углей марок Ж, К и ОС, которые определяют технологическую ценность шихты в целом, а также количество неспекающихся составляющих, приходящихся на эти компоненты. Фактический марочный состав шихты с участием концентратов иностранных поставщиков также должен определяться с учетом рефлектограммы витринитовой составляющей шихты.

В настоящее время на коксохимическом производстве ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” специалистами ОТК КХП и ЦЛ КХП производится постоянный контроль углей и шихт с определением технического, пластометрического и петрографического анализов, гранулометрического состава и насыпной массы шихты, а также показателей качества кокса. Кроме того на КХП используют разработанные УХИН [10] комплексные петрографические показатели $C_{ш}$ (спекаемость) и $K_{ш}$ (коксуемость). Для получения металлургического кокса высокого качества $M_{25} \geq 88\%$ и $M_{10} \leq 7\%$ величины указанных показателей свойств шихты должны быть $C_{ш} \geq 53$, а $K_{ш} \geq 3,7$. Чем выше величина комплексного показателя $C_{ш}$, тем лучше прочностные характеристики кокса, получаемого из этой шихты. В свою очередь, чем выше показатель $K_{ш}$, тем большая вероятность при прочих равных условиях получить малоистирающийся и мелкодробимый кокс.

В 2011 г. во второй половине июля на 1-4 батареях на КХП ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” был получен кокс с лучшими показателями механической прочности, в среднем за период $M_{25} 88,3\%$ и $M_{10} 7,3\%$. Шихта в этот период характеризовалась следующими показателями: $W = 7,6\%$, $\gamma = 0,787 \text{ т/м}^3$, содержание класса 3-0 мм 87%, содержание “отошающего” класса 0,5 мм 46%, $y = 18 \text{ мм}$, $R_{o,r} = 1,11\%$, $C_{ш} = 58,4$; $K_{ш} = 2,5$. В соответствии с маркировками в удостоверениях поставщиков марочный состав угольной шихты был следующим, %: К 31, К+КЖ 16, Ж 12, MV Blend 25, Mechel Creek 5, Toms Run, Xcoal 11. Фактический марочный состав шихты, определенный по рефлектограмме витринитовой составляющей в этот период был следующим, %: Г 14, Ж 65, К 14, ОС 7. Этот марочный состав, несмотря на повышенное содержание углей, отвечающих марке Ж, принимаем в качестве оптимального при расчетах коэффициента K_{opt} , который предлагаем рассчитывать с учетом фактического марочного состава угольной шихты, определяемого при проведении рефлектограммного анализа, обозначив его $K_{opt(Vt)}$.

При выполнении исследований показатель рассчитывался как произведение коэффициентов оптимальности по четырем параметрам

$$K_{opt(Vt)} = 100 \cdot (K_r \cdot K_{ж} \cdot K_k \cdot K_{oc}), \% \quad (1)$$

где K_r – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 0,65-0,89%, т.е. соответствующих марке Г

$$K_{\Gamma} = (\sum Vt_{R_0=0,65\pm 0,89} - 14) / 100 ; \quad (2)$$

$K_{\text{ж}}$ – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 0,9-1,19 %, т.е. соответствующих марке Ж

$$K_{\text{ж}} = (\sum Vt_{R_0=0,9\pm 1,19} - 65) / 100 ; \quad (3)$$

$K_{\text{к}}$ – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 1,2-1,39 %, т.е. соответствующих марке К

$$K_{\text{к}} = (\sum Vt_{R_0=1,2\pm 1,39} - 14) / 100 ; \quad (4)$$

$K_{\text{ос}}$ – коэффициент оптимальности содержания составляющих витринита с величиной показателя отражения 1,4-1,69 %, т.е. соответствующих марке ОС

$$K_{\text{ос}} = (\sum Vt_{R_0=1,4\pm 1,69} - 7) / 100 . \quad (5)$$

В уравнениях (1-5) величины соответственно 14, 65, 14 и 7 приняты в качестве оптимальных, а отклонения от них фактических значений соответствующих составляющих витринита подсчитываются без учета знаков \pm , т.е. по абсолютным величинам.

В соответствии с предложенной методикой в условиях КХП ПАТ “АрселорМиттал Кривой Рог” установлена взаимосвязь механической прочности M_{25} с показателем $K_{\text{опт}}(V_t)$ (рис. 3).

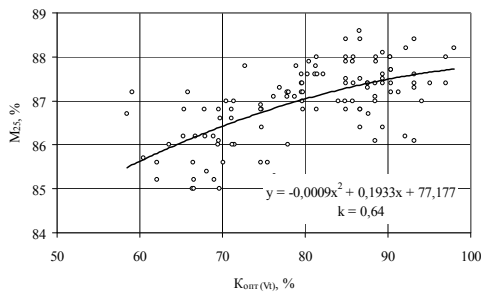


Рис. 3. Зависимость механической прочности кокса от $K_{\text{опт}}(V_t)$

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о более тесной взаимосвязи $K_{\text{опт}}(V_t)$ с показателями качества кокса, по сравнению аналогичными связями для предложенного ранее коэффициента $K_{\text{опт}}$. Кроме того, при использовании предложенного коэффициента оптимальности восстановлена логическая связь роста качества кокса с увеличением показателя $K_{\text{опт}}(V_t)$. Таким образом, выполненные исследования подтвердили необходимость применения петрографического и рефлектограммного методов анализа с целью контроля фактического марочного состава угольной шихты при его оптимизации.

Список литературы

1. Завалишин Д.А. Оценка угольного сырья, его влияние на качество кокса и ход доменной плавки / Д.А. Завалишин, Л.Д. Никитин, Л.С. Белая, Г.Р. Гайничева // Бюллетень Черная металлургия ОАО “Черметинформация”. – 2010. – №1. – С. 18-24.
2. Степанов Ю.В. Влияние оптимизации состава шихты и ее зольности на показатели качества кокса / Ю.В. Степанов, Р.Р. Гилязетдинов, Н.К. Попова, Л.А. Махортова // Кокс и химия. – 2005. – №7. – С. 14-18.
3. Торяник Э.И. Состояние и развитие сырьевой базы коксования Украины / Э.И. Торяник, Б.И. Штромберг, Ю.С. Кафтан и др. // Кокс и химия. – 1977. – №11. – С. 31-33.
4. Васильев Ю.С. Совершенствование процесса коксового производства с целью улучшения качества энерговосстановителей и обеспечения эффективной работы доменных печей / Ю.С. Васильев, А.Г. Старовойт, И.Г. Зубилин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №3. – С. 13-15.
5. Улановский М.Л. Оценка угольных шихт заводов Украины по коэффициенту оптимальности марочного состава / М.Л. Улановский, А.Н. Лихенко // Кокс и химия. – 2008. – №7. – С. 14-18.
6. Киселев Б.П. Сырьевая база коксования России. 1. Ретроспектива / Б.П. Киселев, В.А. Леушин // Кокс и химия. – 1999. – №11. – С. 2-9.
7. Киселев Б.П. Варианты перспективной базы коксования и возможный состав производственных угольных шихт / Б.П. Киселев, Л.И. Серебренников // Бюллетень Черная металлургия ОАО “Черметинформация”. – 2004. – №10. – С. 38-41.
8. Гайничева Г.Р. Оценка угольного сырья. Его влияние на качество кокса и ход доменной плавки / Г.Р. Гайничева, В.И. Бызова, Н.Н. Назарова и др. // Кокс и химия. – 2008. – №10. – С. 14-19.
9. Штарк П.В. Об оценке оптимальности состава угольной шихты / П.В. Штарк, Ю.В. Степанов, Н.К. Попова, Д.В. Ворсина // Кокс и химия. – 2007. – №3. – С. 2-6.
10. Чернышов Ю.А. Использование петрографических характеристик и новых комплексных показателей для оценки свойств углей и межбассейновых шихт ОАО “Запорожжкокс” / Ю.А. Чернышов, С.А. Овчинникова, А.В. Поддубный и др. // УглеХимический журнал. – 2009. – №1-2. – С. 12-20.

Рукопись поступила в редакцию 23.03.13