

**УДК 662.74****Я.С. БАЛАЕВА**, научный сотрудникГосударственное предприятие «Украинский государственный  
научно-исследовательский углехимический институт» («УХИН»), г. Харьков

## ОЦЕНКА ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ТОВАРНЫХ КЛАССОВ КОКСА КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ УКРАИНЫ

На основании комплексных исследований дана оценка влияния состава угольной шихты и режима ее коксования на величину высшей теплоты сгорания кокса товарных классов коксохимических производств Украины. Установлена зависимость этой величины от степени упорядоченности структуры кокса, выраженной выходом летучих веществ. Получено математическое уравнение зависимости низшей теплоты сгорания товарного кокса от влажности, зольности и высшей теплоты сгорания. Данную формулу можно применять для составления статистической отчетности на коксохимических предприятиях Украины.

**Ключевые слова:** товарные классы кокса, состав угольной шихты, режим коксования, теплота сгорания.

В связи с переходом Украины на международную систему статистического учета с начала 2008 г. коксохимические предприятия указывают в статистической отчетности (в соответствии с письмом Госкомстата № 03/2-9/948 от 04.12.2007) выпуск товарных классов кокса, газа, смолы не только в натуральных единицах (тыс. т или млн м<sup>3</sup>), но и в единицах теплоты сгорания (Гкал). В ряде стран Евросоюза (Германии, Франции, Швеции и др.) применение аналогичной практики предусматривает статистическую отчетность по величине теплоты сгорания всех видов потребленного сырья и выпущенной продукции. Включение таких сведений в отчетные документы предусмотрено и в некоторых странах, недавно вступивших в Евросоюз (например, в Польше).

Показатели теплоты сгорания кокса необходимы также для оценки эффективности технологии выплавки чугуна с использованием коксозаменителей, в частности пылеугольного топлива.

Существуют расчетные и экспериментальные методы определения теплоты сгорания твердого топлива,

в т.ч. кокса [1, 2]. Сравнение значений теплоты сгорания, полученных по известным формулам [3], с фактическими значениями показало, что расхождение между ними составляет 3–5 %. В расчете на выпуск 1 млн т валового кокса в год такая погрешность может превышать 300 млн Гкал, что эквивалентно 45 тыс. т условного топлива. Это может привести к заметным искажениям отчетности по теплоте сгорания при ее внедрении в полном объеме, в частности к неоправданному увеличению разницы между теплотой сгорания потребленного сырья и выпущенной продукции либо к уменьшению этой разницы до отрицательного значения.

Учитывая изложенное, представляется целесообразным проведение комплексного исследования коксов товарных классов для определения их теплоты сгорания и разработки рекомендаций по ведению статистической отчетности коксохимических предприятий.

Необходимо отметить, что такое исследование проводилось для заводов Украины в середине 90-х годов прошлого столетия [4]. Его выполнение было вызвано

перебоями в обеспечении заводов Украины коксующимися углями и нестабильностью сырьевой базы коксования по составу, структуре и свойствам углей, что привело к существенному различию на заводах составов шихт и режимов коксования. Для ряда предприятий были характерны удлиненные периоды коксования (до 80 часов) и пониженные температуры в обогревательных простенках (~1100 °C), поэтому возникла необходимость оценить изменение свойств доменного кокса как источника тепла в доменном производстве. В то же время в связи с сокращением объемов агломерации образовались значительные излишки коксовой мелочи, которые можно использовать в качестве топлива в энергетике.

Результаты исследования показали, что значения высшей теплоты сгорания как доменного кокса, так и коксового орешка и мелочи практически не зависят ни от состава угольной шихты, ни от режима коксования в изученных пределах их изменений. Кроме того, было установлено, что при уменьшении крупности кокса величина высшей теплоты сгорания имеет слабо выражен-

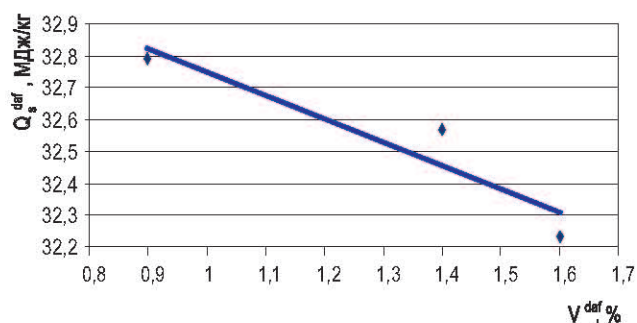
ную тенденцию к снижению, а величина низшей теплоты сгорания снижается заметно (вследствие увеличения влажности и зольности мелких классов).

В рамках нового исследования было отобрано 66 проб кокса товарных классов (кокс доменный, коксовый орешек и коксовая мелочь) на 22 блоках 11 коксохимических предприятий Украины. Максимальные, минимальные и средние значения показателей качества исследованных товарных классов кокса, а также интервалы изменений этих показателей приведены в табл. 1. График зависимости средних значений высшей теплоты сгорания от выхода летучих веществ для каждого товарного класса кокса представлен на рис. 1.

Необходимо отметить, что показатели качества исследованных проб товарного кокса изменялись довольно значительно. Рабочая влага ( $W_t^r$ ) кокса разных классов (с учетом применения на некоторых заводах сухого способа тушения) изменялась от 22,0 до 0,2 %, аналитическая влага ( $W^a$ ) – от 1,4 до 0,1 %, зольность ( $A^d$ ) – от 16,5 до 10,5 %; содержание общей серы ( $S_t^d$ ) колебалось

**Таблица 1 – Максимальные и минимальные значения показателей качества исследованных товарных классов кокса отечественных предприятий, а также интервалы изменений и средние значения этих показателей**

Показатели, единица измерения	Max	Min	Интервал/среднее значение
<b>Кокс доменный</b>			
$W_t^r$ , %	6,0	0,2	5,8/3,1
$W^a$ , %	1,4	0,1	1,3/0,8
$A^d$ , %	12,0	10,5	1,5/11,3
$S_t^d$ , %	1,62	0,93	0,69/1,28
$V^{daf}$ , %	1,7	0,1	1,60/0,9
$Q_s^{daf}$ , МДж/кг	<u>33,22</u>	<u>32,35</u>	<u>0,87/32,79</u>
ккал/кг	7934	7727	207/7831
$Q_t^r$ , МДж/кг	<u>28,77</u>	<u>25,76</u>	<u>3,01/27,27</u>
ккал/кг	6872	6153	719/6513
<b>Коксовый орешек</b>			
$W_t^r$ , %	20,0	0,4	19,6/10,2
$W^a$ , %	1,0	0,1	0,9/0,6
$A^d$ , %	15,9	11,0	4,9/13,5
$S_t^d$ , %	1,82	0,94	0,88/1,38
$V^{daf}$ , %	2,5	0,2	2,3/1,35
$Q_s^{daf}$ , МДж/кг	<u>33,01</u>	<u>32,13</u>	<u>0,88/32,57</u>
ккал/кг	7884	7674	210/7779
$Q_t^r$ , МДж/кг	<u>28,52</u>	<u>22,14</u>	<u>6,38/25,33</u>
ккал/кг	6812	5288	1524/6050
<b>Коксовая мелочь</b>			
$W_t^r$ , %	22,0	0,5	21,5/11,25
$W^a$ , %	1,2	0,1	1,1/0,7
$A^d$ , %	16,5	13,0	3,5/14,8
$S_t^d$ , %	1,98	0,97	1,01/1,48
$V^{daf}$ , %	3,0	0,1	2,9/1,6
$Q_s^{daf}$ , МДж/кг	<u>32,87</u>	<u>31,58</u>	<u>1,29/32,23</u>
ккал/кг	7851	7543	308/7697
$Q_t^r$ , МДж/кг	<u>27,55</u>	<u>20,93</u>	<u>6,62/24,24</u>
ккал/кг	6580	4999	1581/5790



**Рисунок 1 – График зависимости высшей теплоты сгорания от выхода летучих веществ из коксов товарных классов**

от 1,98 до 0,93 %, выход летучих веществ ( $V^{daf}$ ) составлял от 3,0 до 0,1 %; высшая теплота сгорания сухого беззольного состояния ( $Q_s^{daf}$ ) изменялась от 33,22 до 31,58 МДж/кг (от 7934 до 7543 ккал/кг) и низшая теплота сгорания на рабочее состояние топлива ( $Q_r$ ) – от 25,76 до 20,93 МДж/кг (от 6872 до 4999 ккал/кг).

Оценим влияние марочного состава угольных шихт и режима коксования (период коксования и температура в контрольных вертикалах) на величину высшей теплоты сгорания кокса. Выборочные результаты настоящего исследования и данные по аналогичным коксовым батареям, полученные в работе [4], представлены в табл. 2.

Исходя из анализа данных табл. 2 можно констатировать отсутствие закономерности в изменении высшей теплоты сгорания полученных коксов в связи с увеличением содержания в шихтах малометаморфизованных

углей, приводящих к образованию изотропной структуры кокса. Содержание хорошо спекающихся и присадочных углей также не оказывает существенного влияния на высшую теплоту сгорания производимого доменного кокса. Как следует из представленных в табл. 2 данных, для доменного кокса направленность изменения периода коксования совпадает с увеличением/уменьшением величины теплоты сгорания в трех случаях из семи. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии отчетливой тенденции влияния марочного состава шихты и режима коксования на величину высшей теплоты сгорания кокса.

Полученные выводы подтверждают данные работы [4], свидетельствующие о несущественном влиянии марочного (м. с.) и компонентного (к. с.) составов шихты и режима коксования на разных предприятиях на величины теплоты сгорания коксов отдельных классов.

Определим зависимость высшей теплоты сгорания ( $Q_s^{daf}$ ) коксов различных классов от величины выхода летучих веществ ( $V^{daf}$ ) как показателя, характеризующего «готовность» кокса, т.е. степень упорядоченности его структуры.

Исходя из приведенного на рис. 1 графика можно утверждать, что получение доменного кокса по соответствующим техническим условиям [5], в частности с  $V^{daf}$  не более 1,2 %, позволит производить кокс с величиной  $Q_s^{daf}$  не ниже 32,6 МДж/кг (7,79 Гкал/т).

На основе зависимости низшей теплоты сгорания топлива ( $Q_r$ ) от высшей теплоты сгорания ( $Q_s^{daf}$ ), влажности

**Таблица 2 – Состав и режим коксования угольных шихт некоторых коксохимических производств\***

Коксохимический завод, коксовая батарея	Состав шихты, %			Температура в контрольных отопительных каналах, °С		Период коксования, час	Высшая теплота сгорания, МДж/кг ккал/кг
	малометаморфизованные угли ДГ+Г+ ГЖО+ГЖ	угли средней стадии метаморфизма Ж+КЖ+К+КО	присадочные угли ОС+КС+ТС/ СС+КО/КС+Т	к. с.	м. с.		
ОАО «Авдеевский КХЗ», бат. № 3–4	50.0	40.0	10.0	1229	1214	40,05	32,72/7815
	50,0	50,0	0,0	1228	1205	27,83	32,75/7727
бат. № 5–6	51.5	41.0	7.5	1254	1215	21,57	32,76/7825
	39,5	60,5	0,0	1257	1228	29,40	32,92/7863
бат. № 7–8	51.5	41.0	7,5	1245	1215	26,00	32,72/7815
	39,5	60,5	0,0	1260	1204	29,36	32,51/7765
бат. № 9	56.0	38.0	6.0	1231	1212	25,63	33,27/7946
	34,5	65,5	0,0	1225	1210	30,92	32,78/7829
ОАО «Баглейский КХЗ»	40.0	54.5	5.5	1120	1100	80,00	32,98/7877
	45,0	45,0	10,0	1282	1254	18,92	33,03/7889
ОАО «Днепродзержинский КХЗ», бат. № 1	43.0	54.0	3.0	1243	1205	40,00	33,31/7956
	50,0	32,0	18,0	1243	1202	22,75	32,74/7820
ОАО «Запорожжокс»	40.5	57.0	2.5	1253	1219	35,00	32,93/7865
	45,0	35,0	20,0	1248	1219	22,00	32,90/7858

\*В числителе – данные за 1995 г. [4], в знаменателе – за 2009–2010 гг.



и зольности [3] выведена формула для пересчета высшей теплоты сгорания сухого беззольного кокса ( $Q_s^{daf}$ ) на низшую теплоту сгорания рабочего топлива ( $Q_r$ ) с учетом влажности и зольности кокса товарных классов. В качестве прототипа была принята известная формула для каменных углей [6]

$$Q_r = Q_s^{daf}(1 - A^d)(1 - W_r^r) - 2,442[W_r^r + k(1 - A^d)(1 - W_r^r)], \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий содержание водорода в угле (он равен 0,46 для бурых и каменных углей и 0,21 – для антрацита);

$A^d$  – зольность на сухое состояние топлива, в долях

единицы  $\left(\frac{A^d}{100}\right)$ ;

$W_r^r$  – общая влажность на рабочее состояние топлива,

в долях единицы  $\left(\frac{W_r^r}{100}\right)$ .

В общую выборку были включены как результаты настоящих исследований, так и результаты, приведенные в работе [4], – всего 112 проб. Полученное уравнение имеет вид

$$Q_r = 0,869Q_s^{daf} - 0,290W_r^r - 0,283A^d + 3,325. \quad (2)$$

Коэффициент множественной корреляции ( $r$ ) составил 0,991, коэффициент детерминации ( $D$ ) – 98,2 %, а стандартная ошибка расчета ( $\sigma$ ) равнялась 0,348 МДж/кг (83,1 ккал/кг). Установлено, что низшая теплота сгорания в рамках исследованной выборки изменяется в пределах от 20,93 МДж/кг (4999 ккал/кг) до 28,77 МДж/кг (6872 ккал/кг), т.е. на 7,87 МДж/кг (1873 ккал/кг). Следовательно, полученная точность уравнения (2) позволяет достоверно оценивать изменение низшей теплоты сгорания коксовой продукции в зависимости от показателей высшей теплоты сгорания, влажности и зольности.

## ВЫВОДЫ

1. Высшая теплота сгорания сухого беззольного состояния ( $Q_s^{daf}$ ) для кокса отдельных классов крупности существенно не изменяется в зависимости от состава шихты и условий коксования, однако имеет тенденцию к уменьшению от кокса класса крупности 25 мм к коксовому

орешку (10–25 мм) и коксовой мелочи (менее 10 мм), что объясняется менее упорядоченной структурой мелких фракций и характерными для них более высокими значениями выхода летучих веществ. Из этого следует, что предприятиям нет смысла определять теплоту сгорания на сухое беззольное состояние кокса товарных классов отдельно для каждой партии. Достаточно делать это из усредненной пробы (один раз в квартал) либо рассчитывать средневзвешенное значение теплоты сгорания по специальной методике, разработанной УХИН.

2. Низшая теплота сгорания рабочего состояния кокса зависит от его влажности и зольности. Полученное в ходе исследования уравнение позволяет по данным  $Q_s^{daf}$ ,  $A^d$  и  $W_r^r$  определять низшую теплоту сгорания рабочего состояния топлива ( $Q_r$ ) со стандартной ошибкой 0,348 МДж/кг (83,1 ккал/кг). Следовательно, экспериментально или расчетным способом спрогнозировав значение  $Q_s^{daf}$  и зная значения рабочей влаги и зольности каждой партии кокса, можно определить низшую теплоту сгорания отгружаемой продукции. Эта формула применима также для расчета средневзвешенных значений, необходимых для составления статистической отчетности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания.
2. ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT). Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згорання.
3. Нестеренко Л. Л. Основы химии и физики горючих ископаемых / Л. Л. Нестеренко, Ю. В. Бирюков, В. А. Лебедев. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. – 359 с.
4. Влияние состава угольной шихты и условий коксования на теплоту сгорания кокса товарных классов заводов Украины / И. Д. Дроздник, Ю. С. Кафтан, Э. И. Торяник и др. // Кокс и химия. – 1996. – № 8. – С. 21–23.
5. ТУ У 322-00190443-114-96. Кокс доменный. Технические условия.
6. ГОСТ 4083-2002. Уголь каменный и антрацит для пылевидного сжигания на тепловых электростанциях. Технические условия.

Поступила в редакцию 25.04.2014

На підставі комплексних досліджень надано оцінку впливу складу вугільної шихти та режиму її коксування

Based on all-round investigation it is given assessment of impact of coal charge composition and its mode



на величину вищої теплоти згорання коксу товарних класів коксохімічних виробництв України. Встановлено залежність цієї величини від ступеня впорядкованості структури коксу, вираженої виходом летких речовин. Отримано математичне рівняння залежності нижчої теплоти згорання товарного коксу від вологості, зольності та вищої теплоти згорання. Цю формулу можна застосовувати для складання статистичної звітності на коксохімічних підприємствах України.

of coking on the value of the highest combustion heat of coke of commodity classes of by-product coke plants in Ukraine. Dependence of this value on the degree of ordering of coke structure expressed with volatile substances outlier is determined. Mathematical equation of depending low heat value of commodity coke on humidity, ash content and high heat value is stated. This formula can be used to compile statistical reports on by-product coke plants in Ukraine.