УДК 626.631

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДА СЕРЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ОБОГАЩЕННОГО УГЛЯ

Пивняк Г.Г., Пилов П.И., Пилова Е.П.

Национальный горный университет Украины, Днепропетровск, Украина

АННОТАЦИЯ

Задачей технологического цикла добычи и использования углей является производство конечной продукции - электрической энергии или тепла с минимальной их себестоимостью при данных природных свойствах энергоносителей и техническом уровне энергетики. Решение этой задачи требует применения технологий, обеспечивающих получение угольной продукции оптимального качества, т.е. такого сочетания потребительских свойств, которое обеспечило бы максимальный экономический эффект с учетом всех затрат связанных с производством и потреблением угля, что достигается снижением удельного расхода.

ВВЕДЕНИЕ

Экономическая эффективность использования обогащенных углей в энергетике многие годы является предметом исследований. Неоднозначность ответов на этот актуальный вопрос в различные периоды была обусловлена, с одной стороны, изменением во времени соотношений услуг и цен на уголь, угольную продукцию, технологический передел, транспортные услуги. С другой стороны, дальнейшее развитие угольных энерготехнологий, ужесточение экологических требований и нормативов по выбросам в атмосферу вредных веществ приводили к новым сочетаниям экономических условий, которые выдвигали новые задачи исследований в данной области.

Качество добытого угля формируется под совокупным воздействием большого числа факторов, которые объединяют в группы: природных, экономических и технологических.

Каждый из приведенных факторов, за исключением природных, может быть отнесен к управляемым, в том числе ограниченно управляемым, и неуправляемым, в том числе конъюнктурным. Неуправляемые факторы не поддаются каким-либо управляющим воздействиям. К ним относится группа природных и экономических факторов. Ряд факторов можно отнести к конъюнктурным [2,3].

Они связаны с изменчивостью потребности в данном виде угольной продукции, с ее количеством на рынке, а также с колебанием цен и другими экономическими изменениями, проявляющими случайно и независящими от производителя и потребителя.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Природные свойства углей заданы геолого-генетическими факторами, определившими их петрографические и химико-технологические характеристики, а также физические свойства. Добытый уголь обладает рядом единичных свойств качества, среди которых с позиции потребителя можно выделить полезные, вредные и нейтральные [2].

Вредные свойства угля усложняют технологические процессы с его использованием, удорожают стоимость продукта производства (электроэнергии, чугуна и пр.) и нередко приводят к ухудшению его качества. Зольность угля существенно снижает экономические показатели работы тепловых электростанций, повышает расход кокса при доменной плавке,

примеси серы, фосфора и мышьяка вместе с коксом попадают в чугун и сталь, ухудшая их качество.

Одной из существенных технических и экологических проблем использования каменных углей украинских месторождений является повышенное содержание серы. Она содержится, в основном, в виде вкрапленных зерен пирита (FeS_2) размером от нескольких миллиметров до микрометров. Их распределение по фракциям плотности для большинства углей является почти равномерным. При этом может быть незначительное повышение содержания в породных фракциях и понижение в угольных фракциях, и, наоборот, с повышение содержания в угольных фракциях и понижение в породных. Наибольшая концентрация пирита почти всегда наблюдается в промежуточных фракциях плотностью 1500-1800 кг/м^3. В среднем содержание серы в украинских углях составляет 3% с колебанием от 1 до 5%. Но выход промежуточных фракций, как правило, незначителен и составляет порядка нескольких процентов, поэтому количество серы в этих фракциях мало.

В качестве аргументации приведем распределение серы по фракциям плотности для углей марки Г, добываемых в Западном Донбассе (рис.1,2).

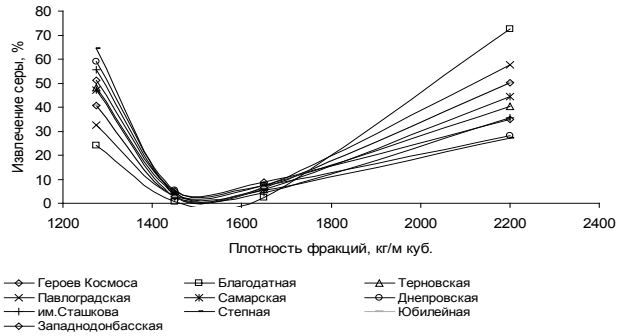

Рис.1 Распределение серы по фракциям плотности углдя.

Одним из направлений совершенствования угольных энерготехнологий является использования топлива с качеством, при котором обеспечивается его максимальная энергетическая эффективность для каждого из используемых способов сжигания.

Повышение качества добытых углей осуществляется путем их механического обогащения, при котором от угля отделяется высокозольная порода или ее часть. При этом используются в основном гравитационные методы сепарации, разделительным признаком для которых является плотность фракций, составляющих рядовой уголь.

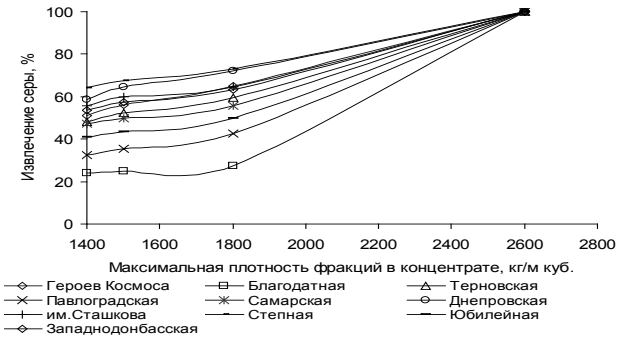

Рис.2 Извлечение серы в концентрат.

Содержание серы в очищенном угле (концентрате) в большинстве случаев остается такой же, как и в рядовом угле, либо незначительно снижается, либо повышается в зависимости от распределения серы по фракциям. Таким образом, можно утверждать, что при гравитационном обогащении каменных углей, особенно крупных классов, десульфурации концентратов не происходит из-за нераскрытых зерен пирита. Их раскрытие осуществляется при измельчении углей, однако это существенно усложняет и удорожает технологию обогащения и делает ее экономически несостоятельной.

Поскольку пирит относится к слабомагнитным минералам, то извлечение его зерен может быть осуществлено с помощью высокоградиентной магнитной сепарации в циклах пылеприготовления на электростанциях.

С другой стороны, снижение выбросов оксида серы на тепловых электростанциях возможно за счет снижения удельного расхода высокосернистого топлива.

Интегральной характеристикой качества каменных углей как топлива и главным их потребительским свойством является теплотворная способность.

Она, как известно, определяется теплотворной способностью содержащейся в них горючей массы Q^e, их зольностью A^d, а также влажностью и в общем виде может быть описано уравнением:

$$Q_c = Q^e\left(1 - kA^d - W\right) - aA^d - cW ,$$

где k – поправочный коэффициент на термическую диссоциацию минералов золы; α - коэффициент, зависящей от теплоемкости компонентов золы и количества тепла, необходимого

на их термическую диссоциацию; *c* - коэффициент, учитывающий расход тепла на нагрев и испарение воды.

Исходя из того, что высшая теплота сгорания угля $Q^в$, является теплоэнергетической характеристикой ископаемых углей, в практике энергетических расчетов используется следующая приближенная формула для определения низшей теплоты сгорания рабочего топлива (или низшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива) путем пересчета высшей теплоты сгорания с учетом количества балластных примесей:

$$Q_p^н = Q_в \frac{100 - A^d - W}{100} - 0{,}025W, \text{ МДж/кг}$$

где $Q^в$ - высшая удельная теплота сгорания угля; A^d - фактическая зольность угля на воздушно-сухое состояние, %; W - влажность угля, %.

При сжигании каменных углей доля полезно используемого тепла характеризуется коэффициентом полезного действия (к.п.д.) процессов и устройств для превращения энергетического потенциала углей в другие виды энергии. В зависимости оттого, что является конечным продуктом теплоэнергетики, технологический цикл производства может включать несколько последовательных операций: сжигание в топке, производство пара в котле с использованием выделившегося при сжигании тепла и превращение энергии пара в электрическую энергию в генераторе.

Коэффициент полезного действия топки зависит от потерь тепла с горячими шлаками и золой, а также термической диссоциации некоторых минералов, содержащихся в угольной породе, т.е.:

$$\eta_к = \frac{Q_п}{Q_0} = \frac{Q_0 - \Delta Q}{Q_0}.$$

Поскольку потери тепла при сжигании ΔQ пропорциональны количеству породы в угле, характеризующемуся зольностью A^d, то зависимость к.п.д. от зольности должна иметь линейный характер:

$$\eta_к = a - bA^d,$$

что подтверждается практикой работы тепловых электростанций.

Используя данные, полученные в Институте угольных энерготехнологий Национальной академии наук Украины, получены линейные зависимости к.п.д. некоторых твердотопливных электростанций от зольности сжигаемых углей. Например, при сжигании углей зольностью 12…40% для Трипольской ТЭС с использованием котла ТПП-210А для марок А, АШ получена зависимость

$$\eta_c = 39{,}18 - (0{,}192...0{,}233)A^d, \%.$$

Значение коэффициента b зависит от степени изношенности котла.

Меньшие его значения соответствуют лучшему техническому состоянию (новый котел или после капитального ремонта). Коэффициент увеличивается с ростом степени изношенности котла, т.е. котел становится более чувствительным к зольности топлива.

Для того же котла, но при сжигании углей марок А, ТР к.п.д. определяется уравнением:

$$\eta_c = 37{,}2 - (0{,}14...0{,}15)A^d, \%.$$

Для Старобешевской и Луганской ТЭС при сжигании в котле ТП-100 антрацитов марки АШ, зольность которых также изменялась в пределах 12…40%, зависимость к.п.д. от зольности характеризуется такими уравнениями:

$$\eta_c = 38{,}5 - (0{,}2...0{,}26)A^d, \%,$$

$$\eta_c = 36{,}5 - 0{,}3A^d, \%.$$

Более низкий к.п.д. для Луганской ТЭС и большая его чувствительность к зольности связано с низким техническим состоянием используемого котла.

Влияние зольности на экономическую эффективность угольных электростанций проявляется еще и в повышении расходов на топливоприготовление в связи с ухудшением размолоспособности углей из-за большей доли в них породы [1,4,5].

В случае обогащения угля количество топлива снижается пропорционально выходу концентрата $\gamma_к$, определение которого осуществляется по известным методикам с использованием гранулометрических и фракционных составов рядового угля [11].

Затраты ТЭС на топливо, получаемого из одной тонны угля составят:

$$C_m = C_y + C_{об} + \gamma_к \sum_{i=1}^{n} C_i.$$

где C_y, $C_{об}$, C_i - соответственно, затраты на добычу угля, его обогащение, на транспорт и операции по обработке топлива на электростанциях (транспорт, складирование, пылеприготовление и др.); γ_k - выход концентрата.

Количество тепла, получаемого из этого топлива и превращаемого в электроэнергию, рав-

но произведению массы, пропорциональной выходу концентрата, низшей теплоты сгорания рабочего топлива и коэффициента полезного действия ТЭС, т.е.

$$Q_n = \gamma_к Q^н_{pk} \eta_e .$$

Изменение топливной составляющей в себестоимости производства электроэнергии в зависимости от качества и количества обогащенного угля можно оценить по стоимости топлива в производстве полезного тепла:

$$C_Q = \frac{C_m}{Q} = \frac{C_y + C_{об} + \gamma_к \sum_{i=1}^{n} C_i}{\gamma_к \left[Q^в (100 - A_к - W)/100 - 0{,}025W\right]\eta_e} .$$

Минимизация стоимости топливной компоненты или себестоимости производства пара при сложившемся уровне цен и услуг и неизменном техническом уровне ТЭС может быть осуществлена за счет вариации соотношения зольности и выхода угольных концентратов, производимых на обогатительных фабриках при использовании имеющихся технологических возможностей углеобогащения.

В результате вычислительного эксперимента с использованием фракционных составов рядовых углей ранее нами установлена экстремальная зависимость количества полезного тепла, выделяющегося при сжигании концентрата, полученного из килограмма рядово-

Таблица 1. Результаты определения теплоэнергетических показателей обогащенного угля марки Г, добываемого шахтой им. Сташкова.

Концентрат			$Q_р^н$, МДж/кг	η	Расход топлива на 1 кВт•ч, г		$Q_п$, МДж/кг	s, г/кВт•ч	Снижение выбросов серы, %	
A,%	γ,%	S,%			q	qo			Δ_1	Δ_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	58,34	1,64	27,17	0,3640	364	623,94	5,77	5,97	52,09	30,84
10	60,15	1,67	26,50	0,3600	377	627,33	5,74	6,30	49,42	26,99
12	61,9	1,7	25,83	0,3560	391	632,41	5,69	6,65	46,59	22,90
14	63,67	1,73	25,16	0,3520	406	638,34	5,64	7,03	43,57	18,54
16	65,58	1,75	24,49	0,3480	422	643,99	5,59	7,39	40,68	14,38
18	67,45	1,72	23,83	0,3440	439	651,19	5,53	7,55	39,37	12,48
20	69,51	1,73	23,16	0,3400	457	657,79	5,47	7,91	36,51	8,36
22	71,52	1,69	22,49	0,3360	476	666,16	5,40	8,05	35,38	6,72
24	73,75	1,68	21,82	0,3320	497	673,84	5,34	8,35	32,99	3,28
26	76,18	1,71	21,15	0,3280	519	681,18	5,28	8,87	28,78	
28	80,05	1,71	20,48	0,3240	542	677,68	5,31	9,28	25,55	
30	83,06	1,71	19,81	0,3200	568	683,58	5,27	9,71	22,07	
32	86,45	1,71	19,14	0,3160	595	688,34	5,23	10,18	18,33	
34	89,84	1,71	18,48	0,3120	625	695,17	5,18	10,68	14,29	
36	93,23	1,71	17,81	0,3080	656	704,10	5,11	11,22	9,91	
38	96,61	1,71	17,14	0,3040	691	715,21	5,03	11,82	5,17	
40	100	1,71	16,47	0,3000	729	728,63	4,94	12,46	0,00	

Обозначения столбцов: 1,2,3 – соответственно, зольность концентрата, его выход и содержание серы; 4 – низшая теплота сгорания рабочего топлива; 5 – к.п.д. электростанции; 6,7 –расход на 1 кВт•ч, соответственно, концентрата и рядового угля; 8 – количество полезного тепла, выделяющегося при сжигании концентрата, полученного из килограмма рядового угля; 9 – количество серы, выделяющейся при выработке 1 кВт•ч электроэнергии; 10,11 - снижение выбросов серы, соответственно, по отношению к рядовому углю и концентрату с зольностью 25%.

го угля при различной степени обогащения [7-10,13].

Наличие экстремума доказывает повышение количества полезного тепла с увеличением степени обогащения угля за счет повышения теплотворной способности угольного концентрата и роста к.п.д. его сжигания. Установлено, что экстремум наблюдается при зольности концентрата, равной зольности беспородной массы угля (угольные и промежуточные фракции).

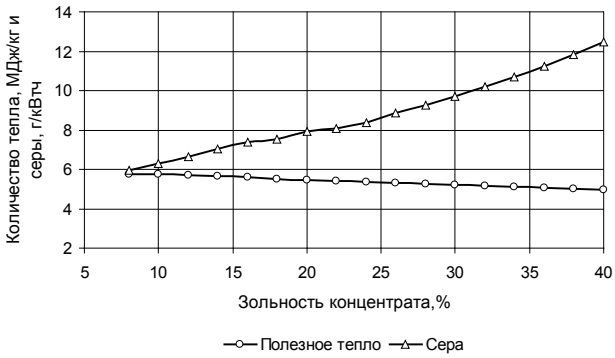

Рис.3 Количество тепла, выделяющегося при сжигании концентрата, полученного из килограмма рядового угля при различной степени обогащения и количество серы, выделяющейся при выработке 1 кВт•ч электроэнергии.

В качестве примера приведем результаты расчета для каменного угля, добываемого шахтой им. Сташкова, представленные в табл.1 и рис.3.

Из данных табл.1 и рис.3 следует, что с повышением степени обогащения угля, что приводит к снижению зольности концентрата и его выхода, количество полезного тепла не уменьшается, а даже несколько возрастает. При этом интенсивность роста связана с чувствительностью к.п.д. котлоагрегата к зольности топлива.

Таким образом, объем выработки электроэнергии сохраняется, а расход топлива снижается (столбец 6 табл.1).

Поскольку содержание серы в зависимости от степени обогащения топлива практически не меняется (колонка 3), а его расход на выработку 1 кВт•ч электроэнергии снижается при уменьшении зольности угольного концентрата, то количество серы, поступающей на сжигание, сокращается (колонка 9 табл.1, рис.3) пропорционально выходу концентрата. При этом снижение количества серы, поступающей в топку, приводит к сокращению выбросов оксида серы с дымовыми газами в 2 раза по сравнению со сжиганием необогащенного угля с зольностью 40% и на 30% по сравнению со сжиганием угля с зольностью 25% (колонки 10,11 табл.1). Отметим, что настоящее время в твердотопливной электроэнергетике Украины используется в основном уголь с зольностью 25%.

ВЫВОДЫ

В результате исследования рядовых углей различных марок и различного качества [7-10,13], обусловленного как природными, так и горно-технологическими факторами, установлено, что минимальная стоимость единицы полезного тепла имеет место при сжигании максимального извлеченных из горной массы и очищенных от засоряющих примесей угольных и промежуточных фракций. Величина этого минимума связана также с применяемыми технологиями углеобогащения и сжигания. Дополнительное извлечение угольных фракций при обогащении, связанное с применением новых технологий приводит к повышению эффективности использования энергетического потенциала угля, однако оно должно быть экономически оправдано. Выход концентратов должен быть максимально возможным для углей данного фракционного состава в условиях применяемых технологий обогащения. Такой подход обеспечит также существенное снижение выбросов оксида серы в атмосферу, сокращение объема дымовых газов, направляемых на десульфурацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков А.С. Технико-экономические показатели тепловых электростанций. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984.- 240 с., ил.
2. Еремин И.В., Броновец Т.М. Марочный состав улей и их рациональное исполь-

зование: Справочник.- М.: Недра, 1994.- 254 с.: ил.
3. Ломоносов Г.Г. Горная квалиметрия. М.: Издательство МГГУ, 2000.-201 с.
4. Марченко М.Г., Филиппов В.М. Стандартизация и нормирование качества углей. М., Недра, 1977. 247 с.
5. Неженцев В.В., Дубовик В.С. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности. – К.: Техника, 1990. –128 с.
6. Пилов П.И., Шаров А.И., Пилова Е.П. Технолого-экономическая модель обоснования качества угля для энергетики// Горный информационно-аналитический бюллетень 2001.- №3.-С.161-165.
7. Пилов П.И., Пилова Е.П. Технолого-экономическое обоснование качества каменных углей для энергетики//8-й международный семинар «Уголь в металлургии и энергетике». – Ялта. – 2002. – с.40-52
8. Пилова Е.П. Улучшение экономических показателей производства угольных концентратов для энергетики за счет повышения их качества/ Ин-т экономики промышленности НАН Украины. Экономика промышленности (сб. науч. тр.). Донецк- 2002. – С.373-281.
9. Пілова К.П. Економічна ефективність та раціональний ступень збагачення кам'яного вугілля для енергетики// СХІД №2 (52). – лютий 2003. – с.13-17
10. Пилова Е.П. Методология экономического обоснования качества каменных углей на основе повышения степени использования их энергетического потенциала// Академічний огляд. - №1. – 2003. – с. 53-61
11. Справочник по обогащению углей. Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткин, Л.С. Зарубина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984, 614 с.
12. Pilov P.I., Pivnyak G.G., Bondarenko V.I. Tratchuk A.M. The development conception of coal technologies in Ukraine//United Nations commission for Europe. Meeting of experts on clean coal technologies. - Szczyrk (Poland), 1995. - p. 57-63.