

ОСТАТОЧНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ОТХОДОВ УГОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА: КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Во Вселенной существует множество источников энергии. Одни из них доступны человечеству для целенаправленного использования, другие – самостоятельно формируют среду его обитания. В развитии земной цивилизации энергии вообще и её природному источнику – ископаемому топливу – в частности принадлежит главная роль. Полнота преобразования первичного потенциала топлива в другие виды энергии определяется множеством показателей, в их числе важное значение имеет его теплотворная способность, обусловленная не только молекулярным строением, но и содержанием в нем балласта, т.е. негорючих веществ, вынужденными и невынужденными потерями органической (горючей) части в виде отходов производства.

Процессы добычи, обогащения и сжигания угля сопряжены с образованием и складированием на земной поверхности отходов (шахтная и фабричная порода, шламы, флотохвосты), сопоставимых по своей массе с реализуемой в Украине угольной продукцией. Общая масса этих отходов, скопившихся на территории Донбасса, оценивается в 6-7 млрд. тонн. Отвалы и хранилища, рассредоточенные на территории горнопромышленных районов, создают множество проблем, связанных с техногенной нагрузкой на окружающую среду, выводом из сельскохозяйственного оборота земель, их рекультивацией, тушением породных отвалов и т.д. Осуществление действенных мер по ликвидации вредного воздействия породных отвалов и различного рода хранилищ и накопителей требует больших финансовых и технических ресурсов. На протяжении последних двух десятилетий в связи с энергетическими кризисами и необходимостью выполнять обязательства, принятые Украиной в соответствии с требованиями Киотского протокола, программ энергосбережения, интерес к

низкокалорийным отходам как вторичному источнику природных ресурсов значительно увеличился, хотя до настоящего времени крупных инновационных проектов, которые предусматривали бы использование этих источников сырья, нет. В значительной мере это вызвано и отсутствием доступной информации о качественном диапазоне минерального и энергетического потенциала сырья, характеризуемого однозначными техническими критериями, которые могут служить ориентиром для сопоставления и выбора объектов инвестиций.

Цель публикации – изложить возможные методические подходы к определению таких критериев.

При отборе технических характеристик, предлагаемых в качестве критериев, следует, как нам представляется, руководствоваться определенными принципами.

Так, управление природными ресурсами, в том числе и определение экономической эффективности их использования, вопросы энергосбережения требуют использования единого инструментария и критериев оценки показателей во внутригосударственных, международных экономических отношениях, соблюдения единых стандартов и тождества в используемой терминологии. Исходные данные для определения количественных показателей критерия должны базироваться на минимальном количестве исходной информации, не требующей проведения специальных опытов, иметь простую, доступную для понимания математическую форму и физический смысл, быть однозначными, а в случае необходимости характеризоваться категориями математической статистики (дисперсия, вариация, стандартное отклонение и др.).

Часть аналитических методов определения полноты (эффективности)

извлечения органической части угля, используемых при оценке результатов обогащения (показатели содержания в каждом из продуктов посторонних примесей, удельная плотность, содержание минеральных составляющих и т.д.), можно было бы использовать для оценки потерь органической составляющей угля в конкретных породных отвалах шахт. Однако целенаправленного систематического контроля фракционного, гранулометрического состава, содержания золы в складированной породе службами контроля качества на шахтах не ведется, поскольку это сопряжено с чрезвычайно высокой трудоемкостью операций, связанных с отбором, разделкой и лабораторным анализом многотоннажных потоков породы и ограниченными возможностями впоследствии использовать полученную информацию на практике, поскольку рынок вторичного природного сырья в Украине не сформирован. В этих условиях остается возможность ориентироваться на специальные исследования по установлению вещественного состава породных отвалов и на его зольность.

Зольность – это одна из наиболее широко используемых технических и потребительских характеристик твердого топлива, определяемая по весу минерального остатка в озоленной без доступа воздуха аналитической пробе. Однако в процессе прокаливании пробы испаряется влага, образуются химические соединения, в результате чего количество золы оказывается меньше, чем содержание минеральных примесей в породе [1]. Для компенсации погрешностей при определении потерь (органической составляющей в породе) предложено много методов [2]. Однако все они основаны на результатах лабораторного анализа, что требует агрегации больших массивов информации в случае, когда это касается угольной отрасли, и поэтому как возможный источник информации зольность может быть использована ограничено.

В процессах обогащения в последние годы из-за возросшего содержания породы в горной массе многие фабрики стали выделять только два продукта – концентрат и породу. Продукт промежуточной удельной плотности (1500-1800 кг/м³) большей своей частью, а в

коксуемых углях почти целиком направляют в отвал. В таких случаях для вычисления зольности породы может быть использован материальный баланс не трех, а двух продуктов, представленный в виде равенства

$$100A_o^d = \gamma_1 A_1^d + \gamma_2 A_2^d, \quad (1)$$

где A_o^d, A_1^d, A_2^d – зольность добытого угля, товарной продукции и породы соответственно; γ_1, γ_2 – долевое участие в смеси добытого угля, товарной продукции.

Преобразуя (1), получим

$$A_2^d = \frac{100 \cdot A_o^d - \gamma_1 \cdot A_1^d}{\gamma_2}, \% . \quad (2)$$

Таким образом, используя степень извлечения в породу сухой беззольной массы ε как соотношение

$$\varepsilon = \frac{\gamma_2(100 - A_2^d)}{100 - A_o^d}, \quad (3)$$

можно оценить размеры потерь горючей массы.

Теплотворная способность. Основной характеристикой всех видов твердого топлива является его тепловой потенциал, измеряемый количеством тепловой энергии, т.е. теплота сгорания. Поскольку угольное вещество – это не только углерод, но и различные негорючие элементарные примеси (влага, соединения, сера, минералы), не выделяющие при сгорании тепла, то, как уже упоминалось, его потенциал измеряется нижней теплотворной способностью Q_n^p .

Как видно из приведенного ниже уравнения [3], процедура вычисления Q_n^p учитывает влагу

$$Q_n^p = Q_B^p - 6(W^p + 9H), \text{ ккал/кг}, \quad (4)$$

где Q_B^p – высшая теплотворная способность; W^p и H – содержание влаги и водорода в топливе соответственно, %.

Несоответствие зольности угля в качестве критерия потенциальных потерь топлива не исключает возможности использовать этот показатель как важную информативную единицу в тепловых, технологических расчетах, при нормировании показателей, разработке технических условий и других нормативных документов. В международной энергетической системе в качестве технико-экономической единицы используют теплоту

сгорания 1 кг твердого и жидкого или 1 м³ газообразного топлива, равную 7000 ккал/кг [4], под названием «условное топливо». Удельная теплота сгорания зависит от свойств угольного вещества, от его влажности и зольности (4). Для расчета высшей удельной теплоты сгорания Q_B (кДж/кг) по элементарному составу углей используют еще и формулу, предложенную Д.И. Менделеевым [5], в тех случаях, когда данные, полученные калориметрически,

отсутствуют:

$$Q_B = 4,18[81(C_i + 300H_i - 26(O - S)_i)], \quad (5)$$

где C_i, H_i, O_i, S_i – теоретическое содержание углерода, водорода, кислорода и серы соответственно.

Что касается донецких каменных углей, то они достаточно изучены и данные, характеризующие их основные показатели, приведены в табл. 1 [6].

Таблица 1

Средневзвешенная теплота сгорания по выходу марок угля

Марка У.к. (типа донецких)	Выход летучих веществ (V^T), %	Элементарный состав (в % на горючую массу)				Теплота сгорания (Q_B^T), ккал/кг
		C^T	H^T	$O^T + S^T_{орг}$	N^T	
Д	43,0	80,0	5,5	12,7	1,8	7950
Г	38,0	84,0	5,0	9,3	1,7	8200
Ж	33,0	87,0	5,0	6,3	1,5	8450
К	24,0	88,0	4,8	6,0	1,5	8600
ОС	14,0	89,0	4,5	5,0	1,5	8600
Т	12,0	91,0	4,0	4,0	1,0	8500
А	7,0	93,0	3,0	3,0	1,0	8200

Для установления в исходном материале истинного содержания минеральных веществ (в отличие от экспресс-анализа зольности) требуются длительные и трудоемкие лабораторные исследования. Из-за этого на практике для определения количества горючих веществ в отходах добычи и обогащения угля, предназначенных, например, для дорожного строительства, применяют расчётные методы. Наиболее простым из них является эмпирическое уравнение, предложенное В. Ланге,

$$B = 100 - 1,1A^d, \% \quad (6)$$

Углеродный показатель. Наиболее представительным генетическим показателем степени метаморфизма является выход летучих веществ V^T (%). Немецкий углехимик В.Шольц установил эмпирическую связь V^T с содержащимся в отходах обогащения каменных углей Рурского бассейна с углеродом C^T . Она описана нелинейным уравнением

$$C^T = 29,23 + 0,0104(V^T) - 0,00583(V^T)^2. \quad (7)$$

При этом В. Шольц исходит из того, что содержание в угле азота и органической серы не зависят от степени метаморфизма, а двухпроцентная погрешность количества летучих в производимых расчетах даёт ошибку не более 0,1 абс. % [7].

Используя данные Донути [8] о содержании летучих в донецких каменных углях, в результате статистического анализа нами установлено:

а) все данные о V^T распределены по нормальному (гауссовскому) закону, что свидетельствует о случайном характере их отклонений от средней величины в выборке (рис. 1);

б) средние значения выхода летучих укладываются в границы величин, приведенных в справочной литературе (табл. 2) [6];

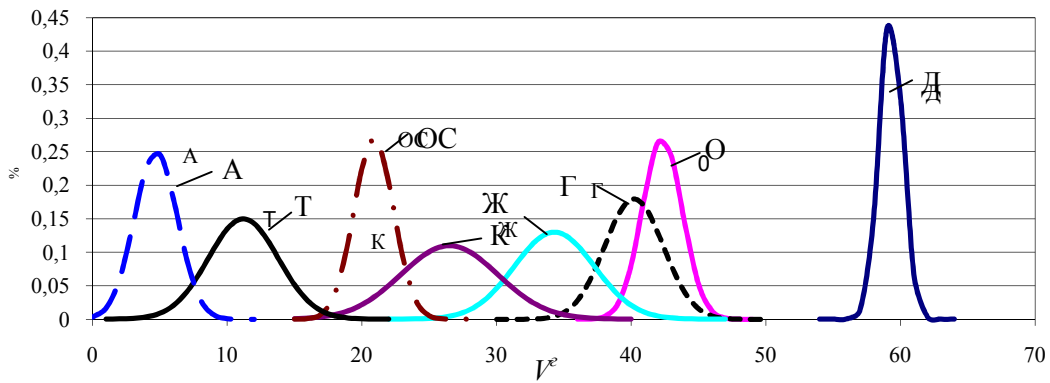


Рис. 1. Распределение в выборке марок углей по содержанию летучих веществ

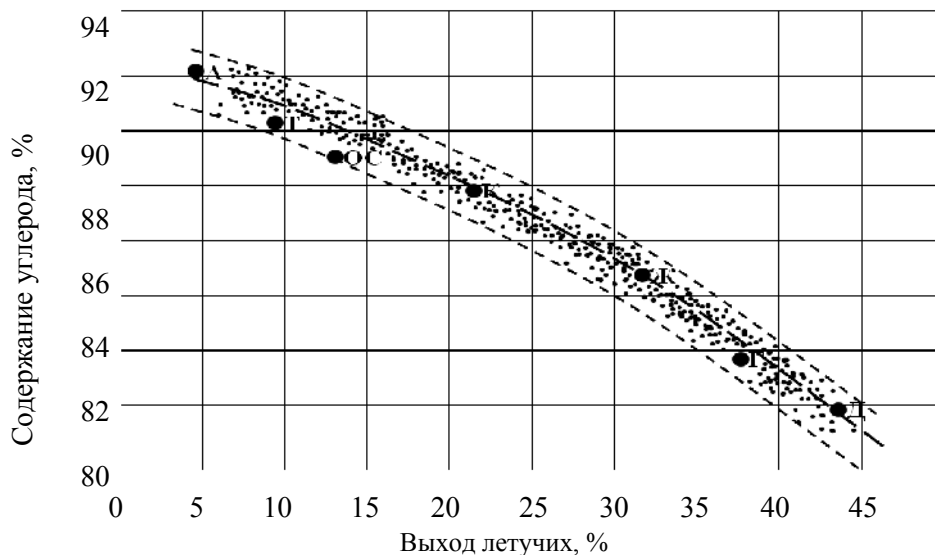
Таблица 2

Характеристики донецких каменных углей

Марка угля	Элементарные составляющие		По К. Рамзину V^r , %	По результатам статобработки данных, приведенных в [8]			Расчетные значения C^r по [2]	По данным [9]
	C^r , %	V^r , %		V^r , %	σ , %	число объектов		
Д	80,0	43,0	42	42,3	1,5	16	81,3	81,0
Г	84,0	38,0	35-44	40,2	2,2	37	82,4	83,4
Ж	87,0	33,0	26-35	34,3	3,0	20	85,0	85,3
К	88,0	24,0	18-26	26,5	23,6	16	87,9	88,6
ОС	89,0	14,0	12-18	20,9	1,5	5	89,5	90,9
Т	91,0	12,0	17	11,2	2,6	24	91,4	91,3
А	93,0	7,0	9	4,7	1,6	42	92,0	91,9

в) точки координат донецких каменных углей (V^r , C^r), приведенные в табл.2, укладываются в границы 95%-го доверительного

интервала, построенного В.Шольцем для рурских углей (рис. 2).



Займствовано: Шольц А. Определение содержания горючих веществ в отходах углеобогащения // Глюкауф. – 1974. – № 14.

Пунктиром обозначены границы 95%-ного доверительного интервала.

Рис. 2. Зависимость между содержанием углерода и выходом летучих в сопоставлении с углями Донецкого бассейна

Таким образом, результаты наших исследований позволяют вполне правомерно рекомендовать углеродный показатель F_k , предложенный В.Шольцем, и для оценки количества связанного углерода в отходах обогащения донецких углей. Этот показатель – частное от деления сухого органического угольного вещества K на содержание связанного углерода, приведенного к сухой массе C^r , т.е.

$$F_k = \frac{K}{C^r}. \quad (8)$$

Графико-аналитический метод. Технические характеристики разрабатываемых пластов угля и вмещающих их пород в пределах Донбасса имеют значительные отличия, обусловленные как природными, так и техногенными факторами. Поэтому исследуемые нами выборки данных об уровне минерализации породных отходов характеризуются определенным размахом варьирования. Для характеристики отвальной породы шахт и отходов обогащения угля использованы методы математической статистики и, в частности, законы распределения упорядоченных ранжированных показателей с разбивкой их на отдельные интервалы. Наиболее распространенным видом графического

изображения распределения данных является гистограмма, которая характеризуется положениями центра группирования, представляющего собой среднюю арифметическую величину, медиану, моду.

Используемые нами показатели, характеризующие ресурсный потенциал отходов угольного производства, представлены в виде дискретных случайных величин, которые получены в результате статистической обработки показателей, рассредоточенных во времени и пространстве. На самом деле, как отмечают специалисты [8], мы имеем дело с непрерывными величинами, которые могут быть представлены в виде ряда последовательных значений, ограниченных временем. В рассматриваемом нами случае – это зольность, теоретически ограниченная, с одной стороны, максимальными потерями в отходах органической части угольного пласта, с другой – максимальной зольностью негорючего остатка в лабораторных пробах.

Таким образом, для оценки горючего остатка в забалансовых продуктах и отходах нами предложен ряд интегральных функций распределений непрерывных значений зольности, приведенных на рис. 3.

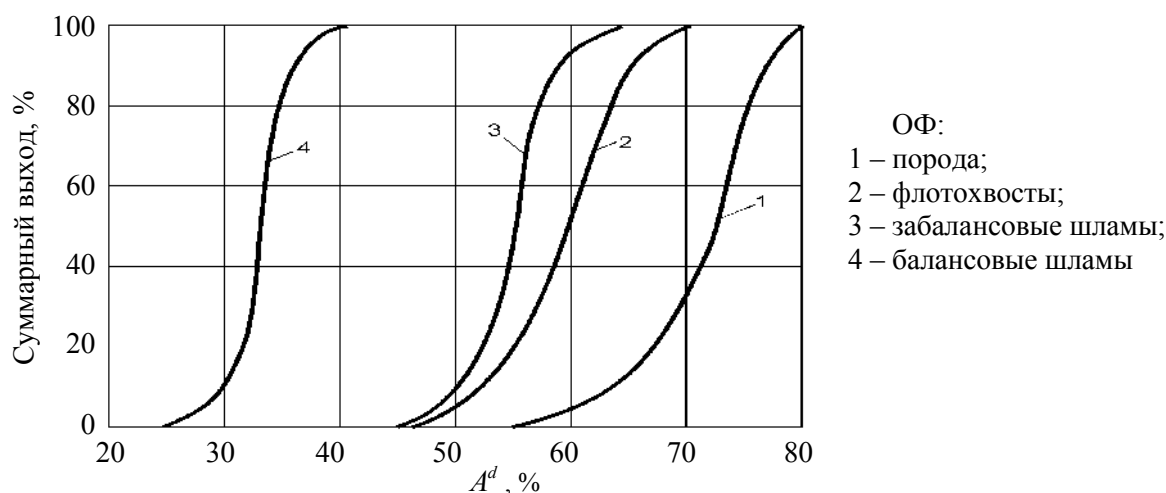


Рис. 3. Интегральные кривые распределения зольности во вторичных ресурсах

Графики этих функций не имеют скачков и представляют собой монотонно возрастающие кривые. Проецируя заданную величину A^d на каждую из кривых, по точке её пересечения с графиком можно определить выход (содержание) материала, зольность которого не превышает заданной величины. Каждая из кривых описывается эмпирическим уравнением вида

$$\gamma = k \ln A^d + b, \% . \quad (9)$$

Данные о результатах обработки исходной информации и значения членов уравнения 9 приведены в табл. 3.

Графо-аналитический метод оценки

потерь органической массы угля, как и другие рассмотренные подходы, основан на данных материального баланса компонентов элементарного состава каменного угля, использованных для определения минерального (негорючего) остатка в отходах десятков обогатительных и сотен угледобывающих предприятий. Поэтому использованные нами значения выхода летучих являются дискретными величинами, агрегированными по результатам лабораторных анализов проб различных марок угля Донбасса за определен-

Таблица 3

Данные статистической обработки информации

Объект анализа	Число объектов	Средняя зольность материала, %	Члены уравнения		
			k	b	
Породные отвалы ОФ	65	77,2	5,5511	51,066	0,99
Хвостохранилища ОФ	36	66,1	5,0667	41,219	0,98
Забалансовые шламы	44	59,2	4,8928	37,008	0,97
Балансовые шламы ОФ	21	35,4	2,793	23,948	0,99
Вмещающие породы угольных пластов	888	86,52	0,1941	$3 \cdot 10^{-6}$	0,99

ный промежуток времени. В научных публикациях, справочниках, материалах статотчетности не приведены стандартные характеристики выборок либо границы вероятных отклонений точечных показателей генеральной совокупности и, наконец, хотя бы отдельных выборок. Поэтому в широком смысле их следует рассматривать как обобщенную оценку, укладываемую в определенные границы.

Государственными и международными стандартами на проведение всех операций по отбору, разделке, подготовке и химическому анализу проб установлены допустимые двусторонние отклонения от средних показателей. Например, расхождения значений в пробах угля для определения выхода летучих веществ на сухую массу (ГОСТ 27313-95 (ISO 1170-77) по необеззоленным и обеззоленным углям составляют 5-6% (абс.). Расхождение между зольностью и долей минеральной массы в угле может превышать 5% [9].

Таким образом, назрела острая необходимость в Государственном стандарте

Украины на допустимую эффективность извлечения в товарной продукции органической части топлива. Отсутствие такого нормативного документа крайне осложняет проведение маркетинговой оценки потенциальных энергетических потерь в отходах.

Предложенные методические подходы правомерно могут рассматриваться в числе других показателей в качестве оценки потерь топлива в отходах угольного производства.

Литература

1. Камнева А.И. Теоретические основы химической технологии твердых горючих ископаемых / А.И. Камнева, В.В. Платонов. – М.: Химия, 1990. – 288 с.

2. Филиппенко Ю.Н. Достоверность определения теплоты сгорания и выхода летучих веществ каменных углей в широком диапазоне зольности / Ю.Н. Филиппенко, Е.В. Рудавина, П.Т. Скляр, Н.В. Чернявский // Энерготехнология и энергосбережение. – 2009. – № 2. – С. 11-17.

3. Теплота сгорания низшая. Краткая химическая энциклопедия. Т. 5. – М.: Сов. энцикл., 1967. – 1184 с.

4. Угли каменные. Краткая химическая энциклопедия. Т. 5. – М.: Сов. энцикл., 1967. – 1184 с.

5. Справочник по обогащению углей. 2-е изд. – М.: Недра, 1984. – 614 с.

6. Полулях А.Д. О методике расчета качественно-количественных показателей продуктов обогащения углей / А.Д. Полулях // Уголь Украины. – 2010. – № 2. – С. 30-34.

7. Шольц А. Определение содержания горючих веществ в отходах обогащения угля / А. Шольц // Глюкауф. – 1974. – № 11. – С. 17-20.

8. Кадастр угольных пластов на шахтах и разрезах Госуглепрома Украины. – Донецк: Донецкий научно-исслед. угольный ин-т, 2001. – 126 с.

9. Дунин-Барковский И.В. Теория вероятности и математическая статистика в технике / И.В. Дунин-Барковский, Н.В. Смирнов. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1955. – 556 с.