

## ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КАМЕННОГО УГЛЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Приведено методику розрахунку оптимальних показників якості кам'яного вугілля для енергетичних об'єктів. Показано наявність мінімуму питомої вартості потенційного тепла від зольності. Отримано вираз для мінімальної вартості годинної витрати палива при заданій продуктивності енергетичного об'єкта по пару. Приведені залежності оптимального значення зольності вугілля від дальності транспортування при різних значеннях вартості перевезення вантажів.

## SUBSTANTIATION OF OPTIMUM PARAMETERS QUALITY OF COAL FOR POWER OBJECTS

The procedure calculation of optimum figure merits of hard coal for energy objects is given. The availability of a minimum the specific cost of potential heat from ash content is rotined. The expression for the minimum cost of consumption per hour of combustible is obtained at given productivity of energy object till a steam. The dependences of a best value ash content coal on range of transporting are given at different values the cost of freight lift.

Проблема зависимости себестоимости топлива для энергетических объектов от содержания в нём балласта не теряет своей актуальности, что напрямую связано с широким использованием каменных углей, которые зачастую являются забалластированным топливом и подвергаются обогащению. В связи с этим в литературе рассматривается вопрос зависимости стоимости углей от транспортной составляющей [1, 2]. Однако существует необходимость выявить и проследить баланс между глубиной обогащения и дальностью транспортировки с целью минимизации суммарных издержек. Для этого необходимо смоделировать процесс ценообразования при прохождении топливом всех технологических этапов от добычи и до получения из него тепловой энергии и получить функциональную зависимость, учитывающую суммарные издержки и описывающую влияние качественных показателей угля на его стоимость.

Для определения нормативной стоимости энергетического угля используется соответствующий прейскурант [3]. Однако, в связи с тем, что фактические показатели отгружаемого угля отличаются от прейскурантных (нормативных), стоимость 1 т энергетического угля до обогащения определяется с учётом скидок и приплат по следующей формуле

$$Ц_{\text{э}} = Ц_{\text{пэ}} \cdot [1 + 0,025 \cdot (A_{\text{п}} - A_{\text{н}}) + 0,013 \cdot (W_{\text{п}} - W_{\text{н}})], \text{ грн/т,}$$

где  $Ц_{\text{пэ}}$  – прейскурантная цена энергетического угля;  $A_{\text{п}}, A_{\text{н}}$  – соответственно прейскурантное и начальное (после добычи) значения зольности энергетического угля, %;  $W_{\text{п}}, W_{\text{н}}$  – соответственно прейскурантное и начальное (после добычи) значения влажности энергетического угля, %; 0,025 – коэффициент скидок (приплат), учитывающий изменение зольности энергетического угля из расчёта 2,5 % прейскурантной цены за 1 % изменения содержания золы; 0,013 –

коэффициент скидок (приплат), учитывающий изменение влажности энергетического угля из расчёта 1,3 % преискурантной цены за 1 % изменения содержания влаги.

После добычи топливо поступает на обогатительную фабрику, где приобретает новые качественные характеристики. В зависимости от этого изменяются его стоимостные показатели.

Фактически влажность угля после обогащения изменяется незначительно. Анализируя данные по 57 обогатительным фабрикам из [3], приходим к выводу о том, что изменение влажности при обогащении составляет от – 5,9 % до 2,4 % или в среднем – 1,37 %, поэтому примем влажность до обогащения равной влажности после обогащения и обозначим её через  $W$ . Далее, усреднив показатели себестоимости обогащения и выхода концентрата для тех же фабрик и произведя соответствующие расчёты, получим значения этих параметров при обогащении угля на 1 % зольности. При этом себестоимость обогащения  $C_0$  определится как

$$C_0 = 0,32 \cdot (A_n - A_2), \text{ грн/т}, \quad (1)$$

где  $A_2$  – значение зольности угля после обогащения, %; 0,32 – себестоимость обогащения угля на 1 %, грн/т.

Коэффициент, учитывающий изменение массы 1 т рядового угля, прошедшего процесс обогащения, определится как

$$K_m = 1 - 0,02 \cdot (A_n - A_2) \quad (2)$$

С учётом вышеизложенного, цена обогащённого топлива запишется в виде

$$Ц_0 = \frac{Ц_э + C_0 \cdot П}{K_m}, \text{ грн/т},$$

где  $П$  – коэффициент, учитывающий нормативную рентабельность обогатительной фабрики.

Далее топливо транспортируется до места переработки его в тепловую энергию, при этом к стоимости  $Ц_0$  добавляются транспортные издержки. Так как каменные угли транспортируются преимущественно железнодорожным транспортом, величина транспортных издержек определяется по формуле

$$T = 1,2 \cdot K \cdot K_1 \cdot (0,656 + 0,002709 \cdot L), \text{ грн/т},$$

где  $T$  – действующий тариф на перевозку [4];  $K$  – коэффициент индексации тарифов;  $K_1$  – коэффициент, применяемый к действующим тарифам и выбираемый с учётом класса груза [5];  $L$  – среднепоясное расстояние перевозки, км.

При этом следует учитывать, что данная формула соответствует тарифной схеме № 1, предполагающей использование универсальных вагонов (в том числе полувагонов), принадлежащих «Укрзалізнице» при отправке более 80 т груза в одной партии [4].

Таким образом, цена 1 т топлива на этом этапе составляет

$$C_1 = C_0 + K_2 + T = \frac{C_3 + P \cdot 0,32 \cdot (A_n - A_2)}{1 - 0,02 \cdot (A_n - A_2)} + K_2 + T, \text{ грн/т} \quad (3)$$

где  $K_2$  – стоимость погрузочно-разгрузочных работ для 1 т угля, грн.

Анализ зависимости (3) показывает, что функция  $C_1$  монотонно убывает с уменьшением глубины обогащения.

Прикладная ценность топлива для энергетических объектов определяется содержанием в нём потенциального тепла. Цена 1 Гкал тепла, содержащегося в топливе, составит

$$C_2 = \frac{C_1}{Q_n^p}, \text{ грн/Гкал}, \quad (4)$$

где  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива, определяемая из выражения [6]

$$Q_n^p = 10^{-5} \cdot (Q_n^g \cdot [100 - (A_2 + W)] - 600 \cdot W), \text{ Гкал/т},$$

где  $Q_n^g$  – низшая теплота сгорания горючей массы, ккал/кг.

Рассмотрим также стоимость топлива, приведённую к единице времени работы парогенератора. В этом показателе учтены суммарные издержки производства тепла. Расход топлива за час работы парогенератора определится как

$$B = \frac{Q_{пг}}{Q_n^p \cdot \eta_{пг}}, \text{ т/ч},$$

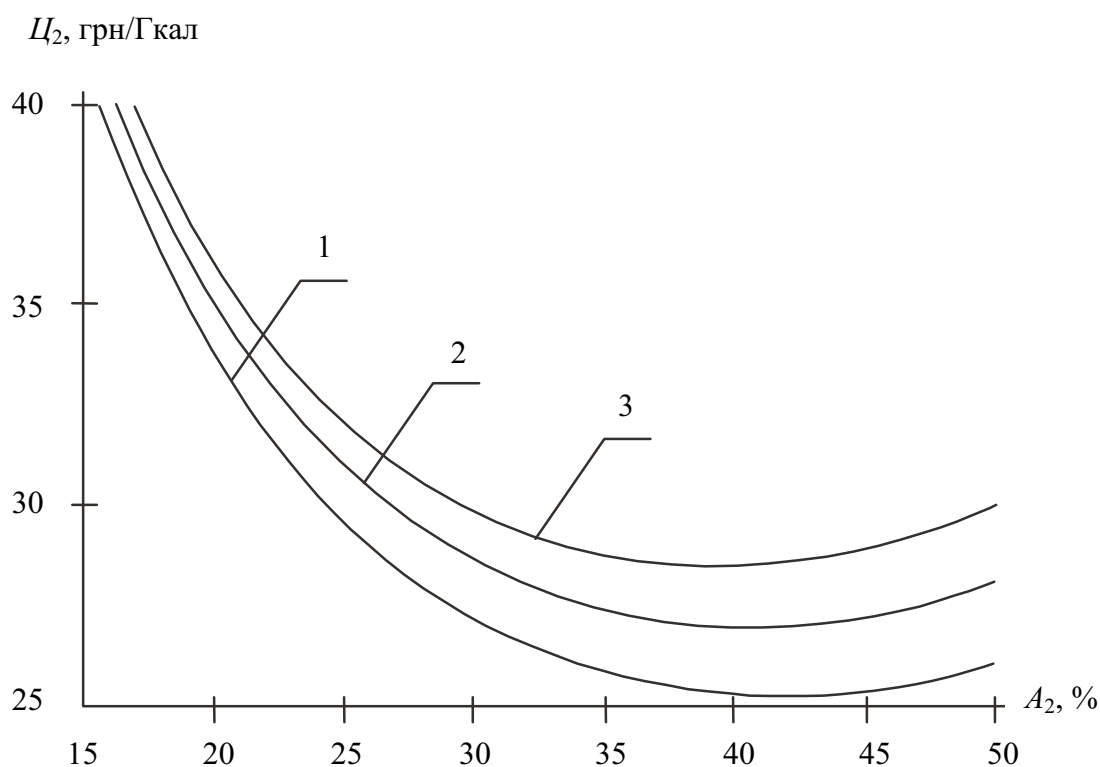
где  $Q_{пг}$  – мощность парогенератора, (Гкал/ч);  $\eta_{пг}$  – КПД парогенератора.

Тогда цена топливной составляющей в единицу времени составит

$$C_3 = C_1 \cdot B, \text{ грн/ч}. \quad (5)$$

На рис.1 и 2 представлено влияние глубины обогащения на стоимостные показатели  $C_2$  и  $C_3$  соответственно, при различных транспортных издержках. Для расчёта зависимостей использованы следующие значения параметров: преysкурантная цена на угольную продукцию для энергетики  $C_{пэ}$  – 107,63 грн/т;

прейскурантное значение зольности угольной продукции  $A_{п} - 27,95 \%$ ; начальное значение зольности угольной продукции  $A_{н} - 50 \%$ ; прейскурантное значение влажности угольной продукции  $W_{п} - 9,56 \%$ ; фактическое значение влажности угольной продукции  $W - 8,35 \%$  (значения  $C_{пэ}$ ,  $A_{п}$ ,  $W_{п}$  и  $W$  получены в результате усреднения значений этих показателей для 57 обогатительных фабрик из [3]); зольность угольной продукции после обогащения  $A_2$  изменяется от 8 до 50 %; коэффициент, учитывающий нормативную рентабельность обогатительной фабрики  $П - 1,2$ ; коэффициент индексации тарифов  $K - 6,071$ ; коэффициент, применяемый к действующим тарифам, выбираем с учётом того, что уголь является грузом 2 класса  $K_1 - 1,38$ ; среднепоясное расстояние перевозки  $L - 800$  км; стоимость погрузочно-разгрузочных работ для угля  $K_2 - 5$  грн/т; низшая теплота сгорания горючей массы  $Q_{н}^Г - 7800$  ккал/кг; мощность парогенератора  $Q_{пг} - 150$  Гкал/ч; КПД парогенератора  $\eta_{пг} - 0,92$ . Расчёты выполнены в среде Mathcad 7.0.



1, 2, 3 – при  $L = 800$  км и  $K_1 = 1,38$ ; 1,7; 2 соответственно

Рис. 1 – Зависимость стоимости потенциального тепла угля от глубины обогащения при различных значениях стоимости перевозки

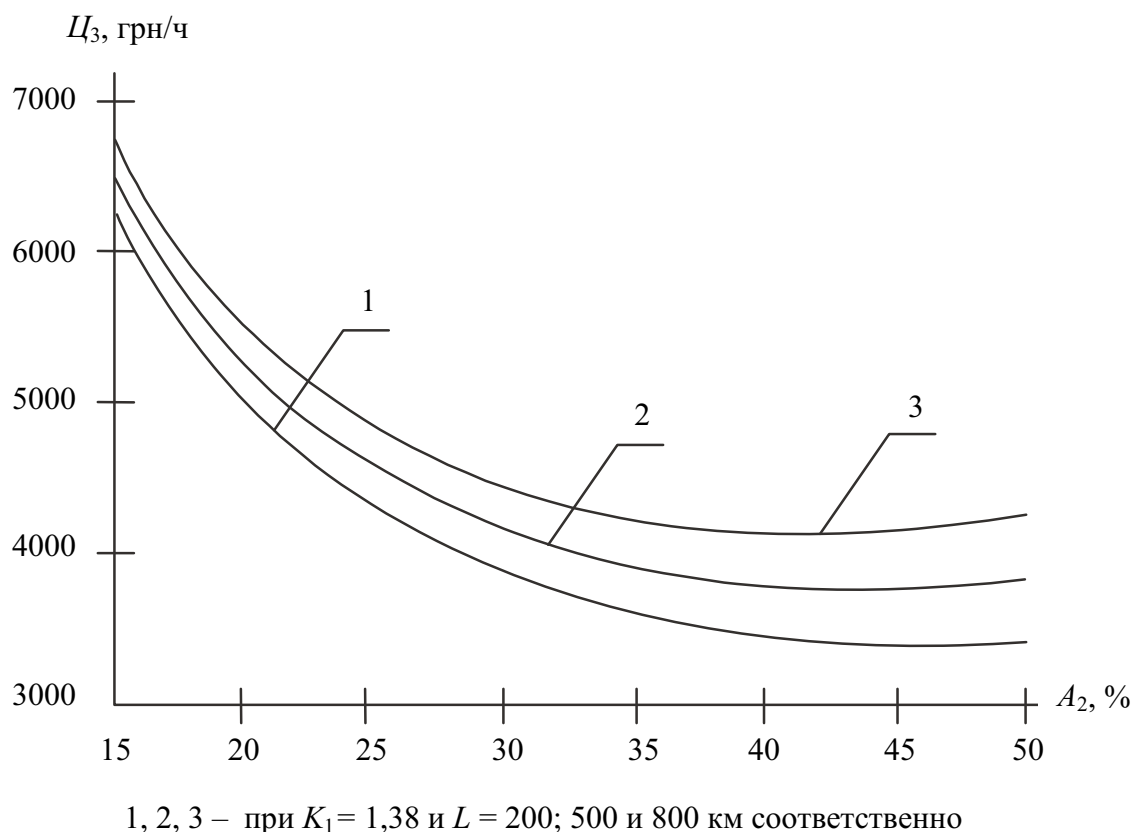


Рис. 2 – Стоимость часовой нормы расхода топлива на ТЭЦ при различных значениях зольности топлива и дальности транспортировки.

Графики на рис.1 и 2 имеют минимумы, которым соответствует оптимальное для такого сочетания параметров содержание зольности. При этом можно проследить смещение минимума цены в сторону увеличения глубины обогащения с ростом транспортных издержек. Это даёт возможность сделать вывод о том, что чем больше транспортные издержки, тем целесообразнее иметь низкое содержание балласта в перевозимом топливе. Наличие минимумов подтверждает предположение о существовании оптимальной зольности, при которой цена топлива минимальна. Однако, при данном сочетании значений входящих в зависимости (4) и (5) параметров оптимальная зольность топлива, как видно из рисунков, близка к начальной (превышает 30 %). Это говорит о том, что транспортная составляющая имеет значительно меньшее влияние на цену топлива, чем стоимость обогащения при таких расстояниях и тарифе на железнодорожные перевозки. Следовательно, необходимо проанализировать зависимости (4) и (5) для нахождения параметров оптимальной рабочей зольности, минимизирующей цену топлива.

Подставив в (4) и (5) все константы, цену, приведённую к Гкал тепла, содержащегося в топливе, можно записать в виде

$$\Pi_2 = \frac{\frac{a - b \cdot A_2}{c + d \cdot A_2} + i}{f - h \cdot A_2}, \text{ грн/Гкал,} \quad (6)$$

где  $a = \Pi \cdot \Pi_{\text{пр}} \cdot [1 + 0,025 \cdot (A_{\text{п}} - A_{\text{н}}) + 0,013 \cdot (W_{\text{п}} - W_{\text{н}})] + 0,32 \cdot \Pi \cdot A_{\text{н}}$ ;  $b = 0,032$ ;  
 $c = 1 - 0,02 \cdot A_{\text{н}}$ ;  $d = 0,02$ ;  $i = K_2 + 1,2 \cdot K \cdot K_1 \cdot (0,656 + 0,002709 \cdot L)$ ;  $h = 10^{-5} \cdot Q_{\text{н}}^{\Gamma}$ ;  
 $f = 10^{-3} \cdot Q_{\text{н}}^{\Gamma} - 10^{-5} \cdot Q_{\text{н}}^{\Gamma} \cdot W - 6 \cdot 10^{-3} \cdot W$ .

Цена часового расхода топлива определится как

$$\Pi_3 = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot \left( \frac{a - b \cdot A_2}{c + d \cdot A_2} + i \right)}{\eta_{\text{пр}} \cdot (f - h \cdot A_2)}, \text{ грн/час.} \quad (7)$$

Для нахождения минимума цены продифференцируем  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$  по  $A_2$  и приравняем полученные результаты к нулю. Так как после дифференцирования при нахождении корней множитель  $Q_{\text{пр}}/\eta_{\text{пр}}$  сокращается, для (6) и (7) получаем тождественные корни. Из двух полученных выражений выберем то, которое соответствует физическому смыслу параметра ( $A_2$  является положительной величиной). В результате получим выражение для нахождения оптимального значения зольности, минимизирующего цены  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$

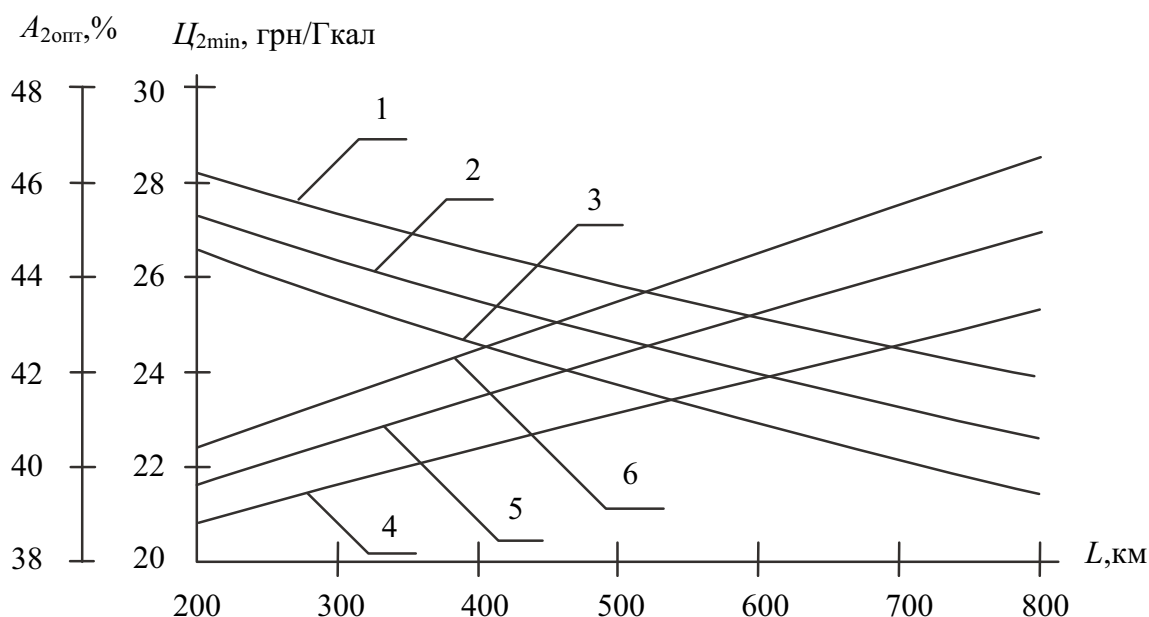
$$A_{2\text{опт}} = \frac{-(a + i \cdot c)}{i \cdot d - b} + \frac{\{d \cdot h \cdot [d \cdot a \cdot h \cdot (a + i \cdot c) + b \cdot c \cdot (-b \cdot f + a \cdot h + i \cdot c \cdot h) + d \cdot f \cdot (i \cdot b \cdot c - b \cdot a + i \cdot d \cdot a)]\}^{1/2}}{h \cdot d \cdot (-b + i \cdot d)}.$$

Подставив в (6) и (7) соответствующие значения  $A_{2\text{опт}}$ , получим два выражения, первое из которых соответствует минимуму цены, приведённой к Гкал тепла, содержащегося в топливе, а второе – минимуму цены часового расхода топлива при заданной удельной паропроизводительности  $Q_{\text{пр}}$ , Гкал/час

$$\Pi_{2\text{min}} = \frac{\frac{a - b \cdot A_{2\text{опт}}}{c + d \cdot A_{2\text{опт}}} + i}{f - h \cdot A_{2\text{опт}}},$$

$$\Pi_{3\text{min}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}} \cdot \Pi_{2\text{min}}$$

На рис. 3 графически представлено влияние изменения дальности транспортировки на оптимальную зольность  $A_{2\text{опт}}$  и стоимость  $C_{2\text{min}}$ . Так при увеличении дальности транспортировки, а, следовательно, и транспортных издержек, значение  $A_{2\text{опт}}$  снижается. При этом увеличение коэффициента, применяемого к действующим тарифам –  $K_1$ , вызывает соответствующее смещение кривых в сторону уменьшения  $A_{2\text{опт}}$ . Другими словами, чем больше железнодорожный тариф, тем больше экономический эффект от обогащения и, соответственно, меньше параметр  $A_{2\text{опт}}$ . Минимум цены тепла, содержащегося в топливе, напротив, с ростом расстояния смещается в сторону больших значений, так как увеличение транспортной составляющей вызывает естественный рост цены. Такое же влияние оказывает на  $C_{2\text{min}}$  увеличение железнодорожного тарифа.



1, 2, 3 –  $A_{2\text{опт}}(L)$  при  $K_1 = 1,38; 1,7; 2,0$  соответственно;  
 4, 5, 6 –  $C_{2\text{min}}(L)$  при  $K_1 = 1,38; 1,7; 2,0$  соответственно

Рис. 3 – Оптимальные значения зольности и стоимости потенциального тепла угля от дальности транспортировки при различных значениях  $K_1$ .

Зависимости минимальной цены часового расхода топлива от  $K_1$ , полученные для цены топливной составляющей в единицу времени имеют тот же характер, что и зависимости, полученные для  $C_{2\text{min}}$ , представленные на рис.3. Они отличаются лишь величиной значений цены, поэтому для них справедливо всё то, что относится к  $C_{2\text{min}}$ . Обработав статистические данные [3], найдём среднюю зольность угля после обогащения  $A_2 = 13,58$ . Анализ полученных графических и аналитических зависимостей показывает, что при рассматриваемом сочетании параметров уголь экономически не выгодно обогащать до такой степени. Например, для условий слоевого или факельного сжигания зольность топлива не должна превышать 30 %. Как следует из рис.1 и рис.2, для минимизации

ции себестоимости топлива, его выгоднее обогащать до максимально приближенного к 30 % содержания золы.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что стоимость 1 т угля, поставляемого на ТЭЦ, монотонно возрастает с уменьшением его зольности, что обусловлено ростом затрат на обогащение топлива. Напротив, цена за 1 Гкал потенциального тепла, а также стоимость часового расхода топлива имеют явно выраженный минимум, обусловленный наличием рационального соотношения между технологическими процессами добычи, обогащения и транспортировки твёрдого топлива (угля). Сопоставляя рассматриваемые системы расчётов за топливо, приходим к выводу о том, что более рациональным является определение цены топлива с учётом скрытого в нём тепла, так как при этом находят своё отражение потребительские свойства топлива как товара, основным из которых является теплотворная способность. Приведенная методика может быть использована как основа для определения рациональных условий поставки на тепловые электростанции каменных углей, что, в конечном счёте, позволит снизить себестоимость вырабатываемой тепловой энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилов П.И., Шаров А.И., Пилова Е.П. Технологическое обоснование качества угля для энергетики//Горный информационно-аналитический бюллетень.– 2001.– №3.– с.161– 165.
2. Рубан В.А., Крапчин И.П., Кирсанова О.П. Экономическая целесообразность обогащения углей//Химия твёрдого топлива.– 1997.– №2.– с.86– 91.
3. Полулях О.Д. Технологические регламенты углеобогащительных фабрик: Справочно-информационное пособие. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2002.– 856 с.
4. Збірник тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом України (Тарифне керівництво №1) та коефіцієнтів, що застосовуються до тарифів цього збірника. Затверджений Наказом Міністерства транспорту України від 15 листопада 1999р. № 551.
5. Коефіцієнти, що застосовуються до тарифів Збірника тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом України. Затверджені Наказом Міністерства транспорту України № 68 від 05 лютого 2001р.
6. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. – М.: Наука, 1971. – 358 с.