

УДК 330.46

к.т.н. Лепило Н. Н.,
Катан К. С.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, lepilonn@gmail.com)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ СППР

В статье предложены математическая модель, позволяющая определять оптимальные параметры для машинных классов процесса обогащения угля с целью получения максимально возможного выхода концентрата, и концептуальная схема системы поддержки принятия решений на ее основе.

Ключевые слова: эффективность, математическая модель, углеобогажительное предприятие, система поддержки принятия решений.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время угольная промышленность является ключевой отраслью для Луганской Народной Республики. В разработанной программе социально-экономического развития ЛНР на период до 2023 года «Наш выбор» подчеркивается важность для экономики Республики дальнейшего развития угледобывающей отрасли, поэтому большое внимание будет уделяться увеличению объемов добычи угля [1].

Для улучшения качества добываемого угля (уменьшения содержания примесей и пустых пород) применяется процесс его обогащения на обогатительных фабриках (ОФ). Однако вопросу эффективности работы углеобогажительных фабрик уделяется недостаточно внимания. Выбор параметров технологических процессов, как правило, базируется на опытно-вероятностном подходе.

Анализ последних исследований и публикаций. Поскольку основным бизнес-процессом углеобогажительного предприятия является процесс обогащения угля, этот процесс в основном определяет эффективность деятельности ОФ. Понятие эффективности обогащения угля сформулировано в ГОСТ 17321–2015 как отношение фактического значения показателя обогащения угля к теоретически достижимому значению [2]. В работе [3] описана

суть используемых в настоящее время аналитических, графоаналитических и графических методов оценки эффективности обогащения. В работе [4] рассмотрены подходы к оптимизации работы углеобогажительной фабрики с целью достижения максимального выхода концентрата.

Вопросам автоматизации технологических процессов ОФ как одного из направлений повышения эффективности ее работы посвящены работы Г. В. Иванова, А. А. Куранова, А. В. Костромитина, А. В. Плотникова, С. К. Рамазанова и др. [5–6]. В работе [6] предложена структура автоматизированной системы организационно-экономического и экологического управления обогатительной фабрикой. Она включает автоматизированные рабочие места (АРМ): директора, главного инженера, планово-экономической службы, бухгалтера, учета основных фондов, учета материальных ценностей, службы механика, главного энергетика, маркетолога, эколога, службы АСУ, АРМ «Кадров». Однако, как отмечено в работе [6], в настоящее время на ОФ при организации информационных процессов и процессов управления недостаточно используются современные компьютерные информационные технологии.

Постановка задачи. Целью статьи является разработка математической модели, позволяющей определять параметры про-

цесса обогащения угля для получения максимального выхода концентрата, и концептуальной схемы системы поддержки принятия решений (СППР) на ее основе.

Изложение материала и его результаты. Несмотря на использование углеобогатительными фабриками различных технологических схем, их конечной целью является получение товарного концентрата заданного качества. При этом основными показателями работы ОФ являются объем переработки угля и выход концентрата, а показателем качества концентрата является процентное содержание в нем золы. Согласно технологическим схемам обогащения, уголь делится на несколько машинных классов. При этом конструкция каждого класса предназначена для обогащения материала определенной крупности.

Как правило, технологические процессы на ОФ организуют таким образом, чтобы в смежных машинных классах получать концентраты с одинаковой зольностью, равной требуемой зольности общего товарного концентрата. Такой подход гарантирует обеспечение заданной зольности концентрата, но способствует снижению его общего выхода примерно на 2 % от максимально возможного [4].

В теории обогащения угля существует теорема Рейхардта. Ее суть сводится к тому, что для получения максимально возможного выхода концентрата заданной общей зольности необходимо поддерживать в элементарных слоях разделения машинных классов одну и ту же зольность, соответствующую зольности элементарной фракции суммарного класса [4]. Это достигается корректировкой плотностей разделения в смежных машинных классах.

Рассмотрим реализацию этого подхода на конкретном примере. Исходными данными для расчета являются результаты гранулометрического и фракционного анализов углей двух шахт, процент участия этих шахт в шихте и результаты дробной флотации угля класса 0–0,5 мм.

Исходные данные фракционного и гранулометрического анализов углей подвергаются предварительной обработке, в результате которой рассчитываются гранулометрический состав шихты и фракционные составы для тех машинных классов, которые приняты на ОФ.

Выход k -того класса шихты определяется по формуле

$$\gamma_{ku} = \gamma_{k1} \cdot \alpha + \gamma_{k2} \cdot (1 - \alpha), \quad (1)$$

где γ_{k1} , γ_{k2} — выходы k -того класса исходных гранулометрических составов рассматриваемых шахт, %;

α — доля участия в шихте первой шахты, доли ед.

Зольность шихты k -того класса рассчитывается путем определения средневзвешенного значения для соответствующего класса:

$$A_{ku}^d = \frac{A_{k1}^d \cdot \gamma_{k1} \cdot \alpha + A_{k2}^d \cdot \gamma_{k2} \cdot (1 - \alpha)}{\gamma_{ku}}. \quad (2)$$

Зольность суммарного класса шихты рассчитывается путем определения средневзвешенного значения зольностей ее классов:

$$A^d = \frac{1}{100} \cdot \sum_{k=1}^n \gamma_{ku} \cdot A_{ku}^d, \quad (3)$$

где n — число классов шихты.

Для расчета принято, что на ОФ два машинных класса: 13–100 мм и 0,5–13 мм. Чтобы найти их выходы, надо просуммировать выходы классов шихты, составляющих соответствующий машинный класс. Для определения зольностей классов следует рассчитать средневзвешенные значения зольностей, составляющих данный машинный класс. Расчетный гранулометрический состав шихты приведен в таблице 1, а фракционный состав машинных и суммарного классов — в таблице 2.

Получаем таблицы итоговых выходов всплывших и потонувших фракций для машинных классов и суммарного машинного

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА

класса. Выход всплывших фракций находим путем последовательного суммирования сверху вниз выходов всех фракций, а выход потонувших фракций — путем последовательного суммирования снизу вверх выходов всех фракций. Суммарные показатели фракционных составов машинных классов и суммарного класса приведены в таблице 3, данные которой используем для построения кривых обогатимости [7–9].

Таблица 1
Гранулометрический состав шихты

Класс крупности, мм	Выход, %	Зольность, %
50–100	21,82	36,70
13–50	9,67	23,53
6–13	15,86	20,74
0,5–6	42,65	17,03
0–0,5	10,01	20,56
Итого	100,00	22,89

Таблица 2
Фракционный состав машинных классов и суммарного класса

Плотность фракций, г/см ³	Класс 13–100 мм		Класс 0,5–13 мм		Суммарный класс	
	γ_k , %	A^d , %	γ_k , %	A^d , %	γ_k , %	A^d , %
<1,5	34,83	4,82	60,99	5,30	51,84	5,19
1,5–1,7	20,73	14,62	18,14	12,95	19,05	13,59
1,7–1,8	3,74	28,43	2,60	28,27	3,00	28,34
1,8–1,9	3,66	33,25	2,58	37,70	2,96	35,77
>1,9	37,04	71,52	15,69	76,16	23,16	73,56
Итого	100,00	33,48	100,00	19,24	100,00	24,22

Таблица 3
Суммарные показатели фракционных составов машинных классов и суммарного класса

Плотность фракций, г/см ³	γ_k , %	A^d , %	Всплывшие фракции		Потонувшие фракции	
			γ_k , %	A^d , %	γ_k , %	A^d , %
Класс 13–100 мм						
<1,5	34,83	4,82	34,83	4,82	100,00	33,48
1,5–1,7	20,73	14,62	55,56	8,47	65,17	48,80
1,7–1,8	3,74	28,43	59,30	9,73	44,44	64,74
1,8–1,9	3,66	33,25	62,96	11,10	40,70	68,08
>1,9	37,04	71,52	100,00	33,48	37,04	71,52
Итого	100,00	33,48				
Класс 0,5–13 мм						
<1,5	60,99	5,30	60,99	5,30	100,00	19,24
1,5–1,7	18,14	12,95	79,13	7,05	39,01	41,03
1,7–1,8	2,60	28,27	81,73	7,73	20,87	65,44
1,8–1,9	2,58	37,70	84,31	8,65	18,27	70,73
>1,9	15,69	76,16	100,00	19,24	15,69	76,16
Итого	100,00	19,24				
Суммарный класс 0,5–100 мм						
<1,5	51,84	5,19	51,84	5,19	100,00	24,22
1,5–1,7	19,05	13,59	70,88	7,44	48,16	44,71
1,7–1,8	3,00	28,34	73,88	8,29	29,12	65,07
1,8–1,9	2,96	35,77	76,84	9,35	26,12	69,28
>1,9	23,16	73,56	100,00	24,22	23,16	73,56
Итого	100,00	24,22				

За начало кривых зольностей всплывших фракций $\beta = f(A^d)$ и элементарных фракций $\lambda = f(A^d)$ принимаем величину 3 %, считая эту величину минимальной зольностью для отдельных кусков угля. Принимаем максимальную зольность отдельных кусков породы 95 %, что соответствует окончанию кривых элементарных фракций и выхода потонувших фракций $\theta = f(A^d)$. При этом для построения кривых элементарных фракций предварительно находим средние значения выходов двух соседних фракций и полученные точки соединяем плавной линией. Кривые обогатимости для машинных классов и суммарного класса 0,5–100 мм показаны на рисунках 1–3.

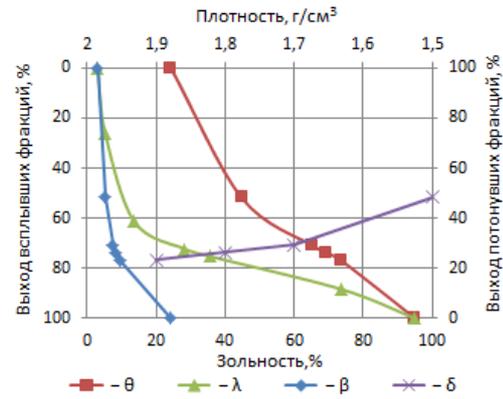


Рисунок 3 Кривые обогатимости для класса 0,5–100 мм

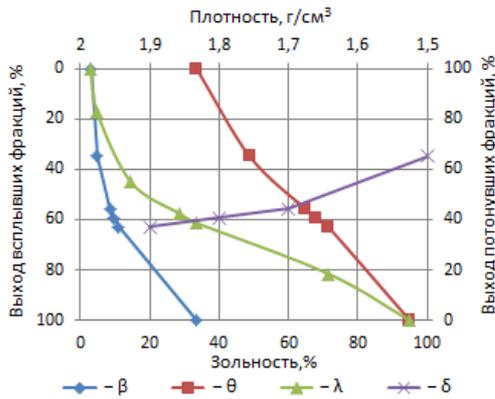


Рисунок 1 Кривые обогатимости для класса 13–100 мм

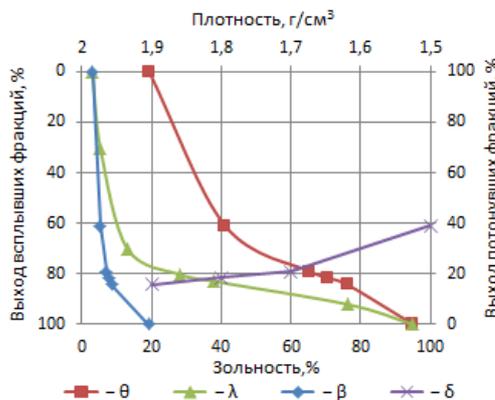


Рисунок 2 Кривые обогатимости для класса 0,5–13 мм

Кривая плотности δ характеризует зависимость выхода всплывших фракций от плотности разделения. Поскольку выходы потонувших фракций являются дополнением к выходам всплывших фракций, для кривой θ использована правая вертикальная шкала.

С помощью полученных кривых можно составить теоретический баланс продуктов обогащения графическим способом. Его суть сводится к следующему [4]. Чтобы найти значение $\beta_3 = f(A_3^d)$, надо задаться зольностью концентрата суммарного класса A_3^d и воспользоваться рисунком 3. Чтобы найти зольность элементарной фракции $A_{эл}^d$, надо из точки β_3 спроектировать горизонталь на кривую λ и найти зольность, которая соответствует этой точке. Это и будет зольность, по которой выполняется разделение, по теореме Рейнгардта, получается максимально возможный выход концентрата. Чтобы найти соответствующие $A_{эл}^d$ выходы и зольности концентратов машинных классов, необходимо воспользоваться рисунками 1 и 2 и выполнить построения в обратном порядке.

Запишем модель определения параметров процесса обогащения в аналитическом виде. Целью моделирования является получение максимально возможного выхода концентрата $V_K \rightarrow \max$ при заданном значении его зольности A_3^d .

Необходимо найти такие значения зольностей концентратов машинных классов A_{k1}^d и A_{k2}^d , при которых будет соблюдаться система ограничений:

$$\begin{cases} \lambda(A_{эл}^d) = \beta(A_3^d) = \beta_3, \\ \beta_{k1}(A_{k1}^d) = \lambda_{k1}(A_{эл}^d), \\ \beta_{k2}(A_{k2}^d) = \lambda_{k2}(A_{эл}^d), \end{cases} \quad (4)$$

где β , β_{k1} , β_{k2} — кривые зольностей всплывших фракций для суммарного класса 0,5–100 мм и машинных классов 13–100 мм и 0,5–13 мм соответственно;

λ , λ_{k1} , λ_{k2} — кривые зольностей элементарных фракций соответствующих классов.

λ -кривые аппроксимированы функциями, состоящими из двух участков. Первые участки описываются логарифмическими зависимостями, вторые — полиномами 3-ей степени:

$$\lambda(A^d) = \begin{cases} 40,2 \ln(A^d) - 42,6 \text{ при } A^d \leq 14 \\ 0,0001(A^d)^3 - 0,0182(A^d)^2 + \\ + 1,333A^d + 46,4 \text{ при } A^d > 14, \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{k1}(A^d) = \begin{cases} 27,9 \ln(A^d) - 28,9 \\ \text{при } A^d \leq 14,6 \\ 0,0001(A^d)^3 - 0,0197(A^d)^2 + \\ + 1,577A^d + 26 \\ \text{при } A^d > 14,6, \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{k2}(A^d) = \begin{cases} 47,6 \ln(A^d) - 51 \text{ при } A^d \leq 13 \\ 0,0001(A^d)^3 - 0,0182(A^d)^2 + \\ + 1,245A^d + 57 \text{ при } A^d > 13. \end{cases} \quad (7)$$

β -кривые также аппроксимированы функциями, состоящими из двух участков. Первые участки описываются линейной либо квадратичной зависимостями, вторые — логарифмическими зависимостями:

$$\beta(A^d) = \begin{cases} -3,44(A^d)^2 + 51,9A^d - \\ -124,7 \text{ при } A^d \leq 7,4 \\ 24,5 \ln(A^d) + 21,9 \\ \text{при } A^d > 7,4, \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_{k1}(A^d) = \begin{cases} 19,2A^d - 57,7 \text{ при } A^d \leq 4,8 \\ 33,35 \ln(A^d) - 16,9 \\ \text{при } A^d > 4,8, \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta_{k2}(A^d) = \begin{cases} -3,994(A^d)^2 + 59,7A^d - \\ -143,1 \text{ при } A^d \leq 7 \\ 20,36 \ln(A^d) + 39,9 \\ \text{при } A^d > 7. \end{cases} \quad (10)$$

Моделирование осуществляется в следующем порядке. По формуле (8) находим значение $\beta(A_3^d)$. Исходя из соотношений (4), $\lambda(A_{эл}^d) = \beta(A_3^d)$. Решая уравнение (5), находим значение зольности элементарной фракции $A_{эл}^d$. После этого по уравнениям (6) и (7) находим значения $\lambda_{k1}(A_{эл}^d)$ и $\lambda_{k2}(A_{эл}^d)$. Учитывая соотношения (4), решаем уравнения (9) и (10). Найденные значения A_{k1}^d и A_{k2}^d , как указывалось ранее, будут соответствовать зольностям машинных классов, при которых должен быть получен максимально возможный выход концентрата. На практике это достигается регулированием плотностей разделения машинных классов, которые для соответствующих классов аппроксимированы зависимостями:

$$\delta_{k1}(A_{k1}^d) = 0,0031(A_{k1}^d)^2 + 0,0149A_{k1}^d + 1,36, \quad (11)$$

$$\delta_{k2}(A_{k2}^d) = 0,001(A_{k2}^d)^2 + 0,1062A_{k2}^d + 0,907. \quad (12)$$

Для оценки адекватности разработанной модели выполнено моделирование в среде Excel. При этом для решения уравнений использован инструмент «Подбор параметра». Для рассмотренного примера при заданной зольности концентрата 9 % получены значения зольностей $A_{k1}^d = 10,74$ и $A_{k2}^d = 8,35$. Их получение достигается при плотностях разделения 1,88 и 1,86 г/см³ соответственно. При этом получено увеличение выхода концентрата на 1 % по сравнению с вариантом, когда в обоих машинных классах поддержи-

вается одинаковая зольность 9 %. Результаты моделирования подтвердили адекватность построенной модели.

Предложенная модель положена в основу системы поддержки принятия решений, концептуальная схема которой приведена на рисунке 4.

В базу данных заносится информация о гранулометрическом и фракционном составе, зольности, общей влаге и количестве углей шахт, поступающих на ОФ, а также показатели, определяемые на ОФ в результате опробований.

На основании этих данных по запросу пользователя выполняется моделирование с выдачей рекомендаций технологическому персоналу ОФ. При необходимости выполняется расчет теоретического баланса продуктов обогащения с учетом продуктов флотации класса 0–0,5 мм, не рассматриваемый в рамках настоящей статьи.

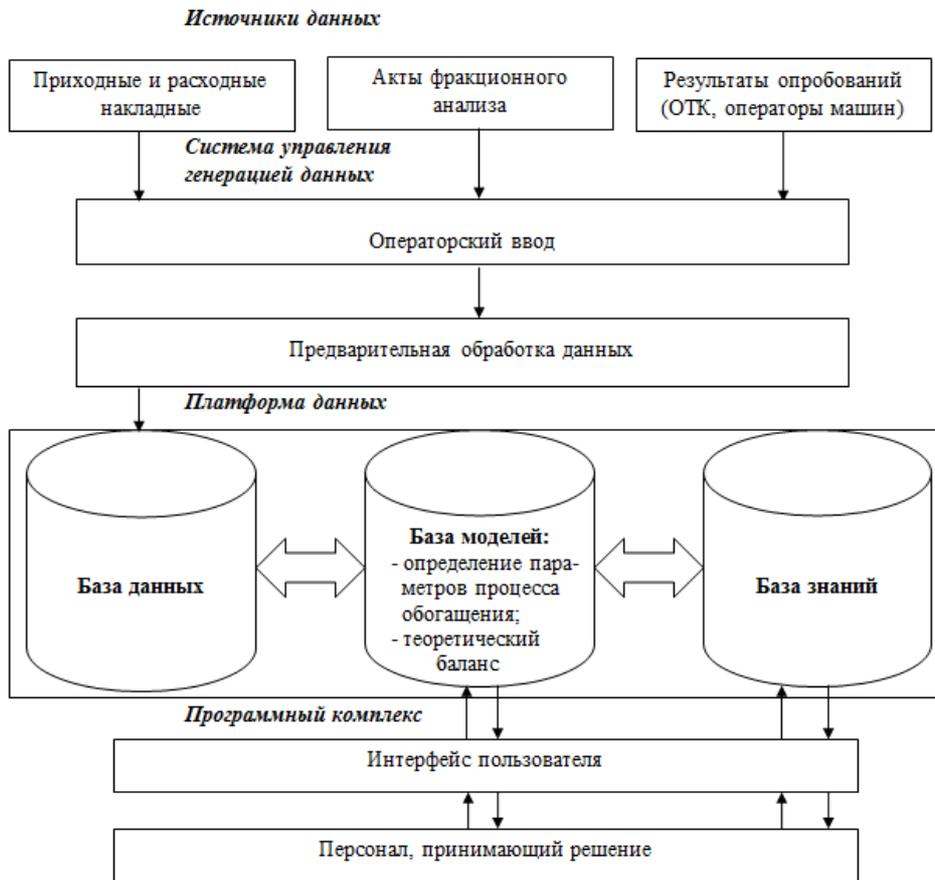


Рисунок 4 Концептуальная схема СППР

Информация о времени выполнения расчета, выданных рекомендациях и результатах принятия решения заносится в базу знаний. Информация о количестве и качестве отгруженного концентрата заносится в базу данных.

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработаны математическая модель, основанная на использовании известной из теории обогащения теоремы Рейнхардта и позволяющая определять оптимальные параметры процесса обогащения

угля с целью получения максимально возможного выхода концентрата, и концептуальная схема СППР на ее основе. Для практического применения предложенной СППР необходима ее реализация в виде программного продукта. Накопление информации в базах данных и знаний позволит уточнить предложенные в модели зависимости, дополнить базу моделей, проанализировать и обобщить опыт лиц, принимающих решения, что и определяет направление дальнейших исследований авторов.

Библиографический список

1. Программа развития Луганской Народной Республики на 2018–2023 годы [Электронный ресурс] // Народная трибуна. — Режим доступа: https://nt1941.su/allnews/important_day/2553-programma-razvitiya-luganskoj-narodnoj-respubliki-na-2018-2023-gody.html (дата обращения: 12.09.2019).
2. ГОСТ 17321–2015. Уголь. Обогащение. Термины и определения [Текст] : межгосударственный стандарт. — Введ. 2017.04.01. — М. : Стандартинформ, 2016. — 11 с.
3. Мала гірнича енциклопедія [Текст]. В 3 т. Т. 1 / за ред. В. С. Білецького. — Донецьк : Донбас, 2004. — 640 с.
4. Козлов, В. А. Оптимизация работы углеобогатительной фабрики с целью получения максимального выхода концентрата [Текст] / В. А. Козлов, В. И. Новак // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С 175–186.
5. Автоматизация технологических процессов обогатительной фабрики — путь к увеличению выпуска товарной продукции и снижению эксплуатационных затрат [Текст] / Г. В. Иванов, А. А. Куранов, А. В. Костромитин, А. В. Плотников // Уголь. — 2016. — № 4. — С. 76–78.
6. Рамазанов, С. К. Инструменты эколого-экономического управления предприятием [Текст] : монография / С. К. Рамазанов ; под ред. проф. Ю. Г. Лысенко. — Донецк : Юго-Восток. Лтд, 2008. — 351 с.
7. ГОСТ 4790–2017. Топливо твердое. Определение и представление показателей фракционного анализа. Общие требования к аппаратуре и методике [Текст] : межгосударственный стандарт. — Введ. 2019.03.01. — М. : Стандартинформ, 2018. — 19 с.
8. Антипенко, Л. А. Методы оценки обогатимости углей [Текст] / Л. А. Антипенко // Уголь. — 2018. — № 4. — С. 69–74.
9. Авдохин, В. М. Обогащение углей [Текст] : учебник для вузов. В 2 т. Т. 2. Технологии / В. М. Авдохин. — М. : Горная книга, 2012. — 475 с.

© Лепило Н. Н.

© Катан К. С.

Рекомендовано к печати д.э.н., проф. каф. менеджмента ЮРИУ РАНХиГС Момот А. И.

Статья поступила в редакцию 08.10.19.

к.т.н. Лепіло Н. М., Катан К. С. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ВУГЛЕЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА НА ОСНОВІ СППР

У статті запропоновано математичну модель, що дозволяє визначати оптимальні параметри для машинних класів процесу збагачення вугілля з метою отримання максимально можливого виходу концентрату, і концептуальну схему системи підтримки прийняття рішень на її основі.

Ключові слова: ефективність, математична модель, вуглезбагачувальне підприємство, система підтримки прийняття рішень.

Ph.D. in Engineering Lepilo N. N., Katan K. S. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE COAL PREPARATION PLANT BASED ON DSS

The paper proposes a mathematical model that allows determining the optimal parameters for the machine classes of the coal preparation process in order to obtain the maximum possible yield of concentrate, and a conceptual diagram of a decision support system based on it.

Key words: efficiency, mathematical model, coal preparation plant, decision support system.