

УДК 622.23.05+622.771

**ТЕОРИЯ СЕПАРАЦИИ УГЛЯ ПО ФИЗИЧЕСКОМУ ФАКТОРУ**

Ариненков Ю.Д., канд. тех. наук, доцент,  
Донецкий национальный технический университет

*Поставлена задача установить информационное единство непротиворечивых положений современной теории сепарации угля по физическому фактору разделения для дальнейшего развития этой теории и дано её решение.*

*Set the problem to set informative unity of nonconflicting positions of modern theory of separatic technologe of coal on the physical factor of division for further development of this theory and its decision is given.*

**Постановка проблемы**

Статистика развития угольной промышленности отражает тенденцию её регресса из-за высокой себестоимости добычи и переработки угля. В то же время, уголь занимает первое место в производстве электричества и в ближайшем будущем будет основным источником энергии. При этом углеобогащение относится к приоритетным отраслям промышленности Украины, так как уменьшает безвозвратные потери ценного компонента. Эффективность технологии обогащения угля определяется уровнем её научного обоснования и наличием информационной системы для оперативного управления процессами. Проблема разработки такой системы усугублялась отсутствием методов адекватного представления характеристик сырья и процессов сепарации по физическому фактору и схем их соединения для проведения научно-исследовательских и проектных работ по совершенствованию существующих и новых обогатительных фабрик.

Развитие основ теории сепарации и создание систем технологической информации с целью повышения эффективности переработки угля, особенно в условиях кризисного состояния горнодобывающей промышленности, является важнейшей научно-технической проблемой, решение которой направлено на обеспечение экономической и энергетической безопасности Украины. Данная статья посвящена анализу и обобщению работ автора по указанной проблеме.

### Анализ публикаций по проблеме

Рассмотрим проблемы, которые имели место в моделировании обогатительной технологии, с позиций значительного успеха в развитии прикладной математики, информатики, вычислительной техники и возможности применения достижений этих наук для развития научных основ теории сепарационных процессов и схем их соединения при обогащении угля (рис. 1, а, б), и варианты решения этих проблем.

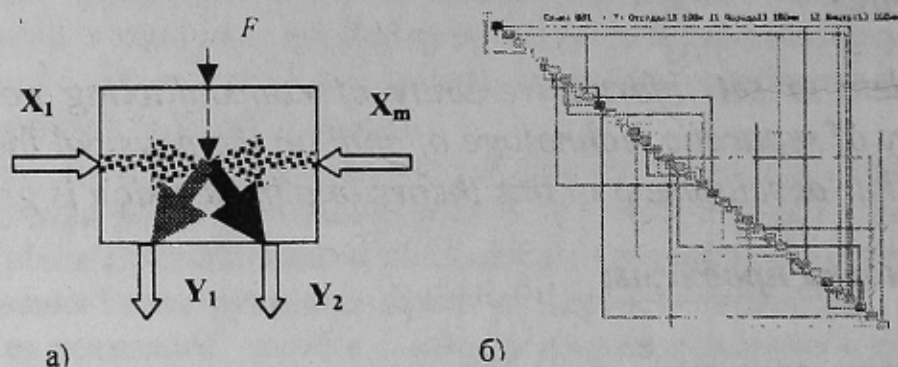


Рисунок 1 – Сепарационные процессы (а) и схема их соединений (б)  
 $X_1$ ,  $X_m$  – входы объекта;  $Y_1$ ,  $Y_2$  – выходы объекта;  $F$  – фактор управления

Существующие теории обогатительных процессов, таких как отсадка, флотация, обогащение в гидроциклонах и др., имели своей целью объяснить законы движения частиц угля, но не давали адекватного описания распределения фракций сепарируемого материала  $X$ , а традиционный метод описания результатов обогащения  $Y$  с помощью т.н. «сепарационной характеристики» имел низкую точность. Расчёт технологических схем решением систем линейных уравнений также давал недопустимо большие невязки баланса. Возникла проблемная ситуация по описанию всех элементов, составляющих теорию сепарации угля.

Для преодоления этой ситуации автором была предложена концепция моделирования "as is" [1], рекомендующая отказ от догматического представления аппроксимации как единственного метода описания экспериментальных массивов. В соответствии с новой концепцией математическая модель процесса сепарации разработана с экономической ориентацией на получение оптимальных результатов переработки угля [2] представлением его характеристик методами рекурсивного продолжения массивов, включая описание технологиче-



ской схемы обогатительной фабрики методом последовательных вычислений [1] и энергосбережения работающими машинами [3].

Разработки готовы к применению в исследовательской, проектной работе и управлении технологией сепарации угля на обогатительных фабриках в режиме энергосбережения [3, 4, 5].

Однако, несмотря на успешное применение разработанных методов в форме универсальной макромоделли сепарационной технологии, вопрос полноты набора этих методов и их непротиворечивости остался не изученным.

### *Постановка задачи*

Для совершенствования методологии сепарации угля путём обоснования новой концепции и методов систематизации данных ставится задача изучить непротиворечивость и полноту набора этих методов и дать рекомендации по дальнейшему развитию теории сепарации угля.

### *Метод решения задачи*

Рассмотрим методы теории сепарации угля в порядке их необходимого и допустимого применения с обобщением этих методов, теорем или правил решения задачи до соответствующих утверждений  $Y_j$ ,  $j$  – номер обобщающего утверждения. Полученная таким образом последовательность  $n$  утверждений (методов, теорем и/или правил) представляет собою минимальный объём  $2n-1$  задач, на решении которых апробирована обсуждаемая теория.

На практике возможны постановки задач, требующие другой последовательности применения перечисленных утверждений добавлением новых или изменением действующих. Такая предполагаемая последовательность применения методов будет допустимой, если допустимой по причинно-следственной связи будет каждая смежная пара утверждений в этой последовательности (т.е. принимаем, что каждый первый метод в рассматриваемой паре является вторым в уже проверенной на допустимость предыдущей его паре).

Количество парных сочетаний из  $n$  утверждений (т.е. из  $n$  по 2) составляет  $(n^2-n)/2$ , но не все из них можно назвать причинно-следственными парами (ПСП). Однако, если вместо причинно-следственных пар утверждений под номерами  $j, i$  как  $(M_j, M_i)$ , соблюдая условие  $j < i$ , рассматривать последовательности ПСП утвержде-

ний как  $\{Y_j, Y_{j+1}, \dots, Y_{i-1}, Y_i\}$ , то это уже будут причинно-следственные кортежи (ПСК) и количество их будет равно количеству сочетаний из  $n$  по 2. Теперь представляется возможным ранжировать эти ПСК в форме элементов нижней треугольной логической матрицы кортежей причинно-следственных связей  $K$ :

$$K = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{3,1} & k_{3,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{5,1} & k_{5,2} & k_{5,3} & k_{5,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{6,1} & k_{6,2} & k_{6,3} & k_{6,4} & k_{6,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{7,1} & k_{7,2} & k_{7,3} & k_{7,4} & k_{7,5} & k_{7,6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{8,1} & k_{8,2} & k_{8,3} & k_{8,4} & k_{8,5} & k_{8,6} & k_{8,7} & 0 & 0 & 0 \\ k_{9,1} & k_{9,2} & k_{9,3} & k_{9,4} & k_{9,5} & k_{9,6} & k_{9,7} & k_{9,8} & 0 & 0 \\ k_{10,1} & k_{10,2} & k_{10,3} & k_{10,4} & k_{10,5} & k_{10,6} & k_{10,7} & k_{10,8} & k_{10,9} & 0 \end{vmatrix}$$

Нужно подчеркнуть, что представленная запись не является матрицей в обычном смысле. Здесь между элементами каждой строки подразумевается условие "или", причём, такое же условие применяется к столбцам (входам) и строкам (выходам) таблицы, т.е. выбирается только какой-нибудь один элемент из этой таблицы.

При разработке теории сепарации угля были изучены кортежи утверждений, расположенные только в первом столбце представленной таблицы. Изучение остальных элементов этой таблицы даст информацию для дополнения и дальнейшего развития теории сепарации угля по физическому фактору.

### *Результаты исследования и их применение*

Рассмотрим кратко положения теории сепарации угля по основным её разделам, выделяя в них результаты (теоремы, правила).



Раздел 1. Теория целеориентирования сепарации

Для исследования взаимосвязей параметров сепарационных процессов предложена и доказана теорема как «правило дифференцирования обогатительных функций» [6]: производная зольности продукта от его выхода прямо пропорциональна снижению зольности продукта по отношению к зольности разделительной фракции и обратно пропорциональна выходу этого продукта, а от зольности разделения – ещё также пропорциональна плотности распределения вероятности разделительной зольности ( $Y_1$ ):

$$\frac{d\beta(\gamma)}{d\gamma} = \frac{\lambda(\gamma) - \beta(\gamma)}{\gamma}, \tag{1}$$

$$\frac{d\beta[\gamma(\lambda_k)]}{d\lambda} = \{\lambda[\gamma(\lambda_k)] - \beta[\gamma(\lambda_k)]\} f(\lambda_k), \tag{1,a}$$

где  $\gamma$  - выход всплывшего продукта,  $\beta(\gamma)$ - зольность всплывшего продукта,  $\lambda(\gamma)$  – зольность фракции,  $f(\lambda_k)$  – плотность распределения вероятности зольности разделения.

Принцип определения экономико-технологического оптимума процесса сепарации основан на представлении уравнения цены плоскостью в отрезках на осях координат системы ценообразования. При таком представлении этой системы становится очевидным условие оптимальности сепарационного процесса при учёте не только золы, но и серы – определением оптимальной зольности разделения, через которую устанавливается оптимальная плотность разделения [1].

Методы анализа и синтеза показателей сепарабельности позволили установить, что для компенсации влияния зольности исходного угля критерий сепарабельности  $\theta$  должен одновременно оценивать извлечение и концентрата, и отходов по формуле среднего пропорционального [7]:

$$\Theta = \left\{ \frac{(\lambda_0 - \beta_k) \cdot \gamma_k \cdot [(\lambda_0 - \beta_k) \cdot \gamma_k + \beta_u - \lambda_0]}{(\lambda_0 - \beta_m) \cdot \gamma_m \cdot [(\lambda_0 - \beta_m) \cdot \gamma_m + \beta_u - \lambda_0]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \tag{2}$$

где  $\beta_u$  - зольность обогащаемого материала;  $\lambda_0$  - заданная зольность разделения; нижним приписным значком  $k$  обозначены параметры концентрата, а значком  $m$  выделены теоретические параметры как наилучшие по определению [2, 6].

Формулы (1), (1,a) и (2) являются целеориентирующими ( $Y_2$ ) для сепарационной технологии.

### Раздел 2. Сепарабельное описание данных сепарации

Исходя из того факта, что предпочтительные аналитические закономерности в характеристиках крупности и фракционного состава, порожденных разными технологиями измельчения, не установлены, постулируется оригинальность этих характеристик. Такая концепция моделирования названа "as is" [1].

На основе этой концепции разработан общеметодологический для теории сепарации, пригодный для обратных задач прогнозный метод рекурсивного *knot*-продолжения массива. Результат применения этого метода показан на рис.2.

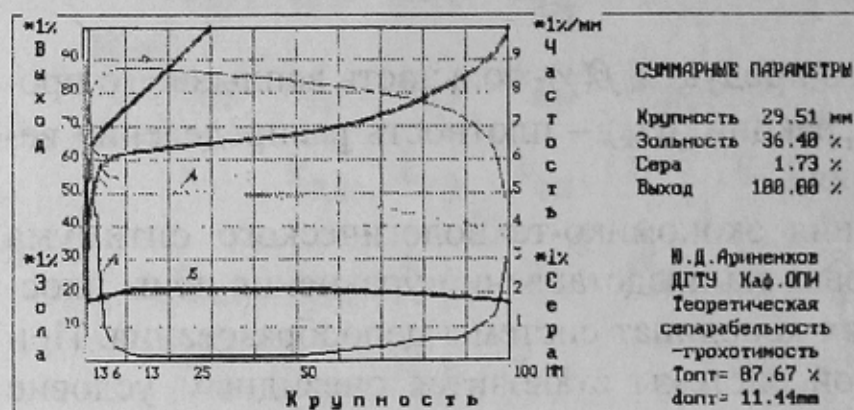


Рис.1. Ситовые характеристики сепарированного материала:  
1 - частота - производная от выхода по крупности, %/мм;  
2 - суммарный выход в функции крупности разделения, %;  
3 - суммарный выход в функции суммарной крупности, %;  
4 - суммарная зольность в функции суммарной крупности разделения, %;  
5 - суммарная сера в функции крупности разделения, %;  
6 - сепарабельность в функции крупности разделения, %

Рисунок 2 - Результат построения ситовых характеристик

Сущность метода состоит в том, что каждая новая опорная точка должна располагаться в центре тяжести доверительного треугольника, образованного хордой, стягивающей точки делимого интервала, и продолжениями хорд смежных интервалов, или посередине хорды делимого интервала, если доверительный треугольник выходит за границы делимого интервала. Доказана адекватность описания гранулометрических массивов [8].

Показаны обоснованность и достоинство метода Макларрена интерполяции данных фракционного анализа 2-кусочно-линейной функцией с закреплением её концов именно посередине высоты ступенек графика зольности (для угля): метод оказывается нейтральным к выбору начала счёта фракций слева направо или справа налево и адаптируемым к применению метода рекурсии. Метод назван рекурсивным *area*-увеличением массива данных. Имитационными исследованиями подтверждено известное, но не объяснённое в литератур-

у. Имитационными исследованиями подтверждено известное, но не объяснённое в литератур-



ных источниках, возможное нарушение монотонности фракционных характеристик. Установлено, что такое явление наблюдается на шихтованном материале. На такой характеристике метод Макларрена не работает. Поэтому разработан метод рекурсивного *area*-продолжения массива фракционной характеристики при наличии у неё экстремумов по зольности, который даёт все решения задачи интерполяции "экстремальной фракции" на отрезке прямой, соединяющей граничные решения, не совпадающие с "плоскостью ступеньки по выходу фракции", чем предложенный метод принципиально отличается от метода Макларрена интерполяции ступенчатых функций. Применяется к любым фракционным характеристикам, например, при учёте серы. Обозначим эти методы как  $Y_3$ .

Метод построения зависимости «плотность-зола» фракций  $Y_4$  основан на совместном применении методов *knot*- и *area*-продолжения массивов. Результаты работы соответствующей графической программы показаны на рис.3.

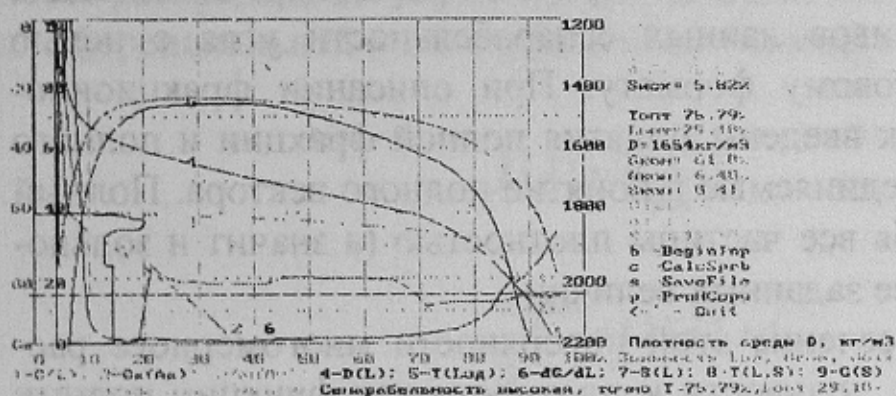


Рисунок 3 - Кривые обогатимости, построены графической программой

На этом рисунке показаны следующие (подчёркнуты новые) кривые:

ты новые) кривые:

- $G(L)$  - зависимость выхода всплывшего от зольности разделения  $L$ ;
- $G_k(A_k)$  - зависимость выхода концентрата от его зольности  $A_k$ ;
- $G_o(A_o)$  - зависимость выхода отходов от их зольности  $A_o$ ;
- $D(L)$  - зависимость плотности фракций от их зольности  $L$ ;
- $T(L_{зд})$  - теоретическая сепарбельность от зольности разделения  $L_{зд}$ ;
- $dG/dL$  - плотность распределения вероятностей зольности фракций;
- $S(L)$  - содержание серы в элементарных фракциях с зольностью  $L$ ;
- $T(L,S)$  - теоретическая сепарбельность как функция золы  $L$  и серы  $S$ ;
- $G(S_{сум})$  - выход продукта как функция суммарной серы  $S_{сум}$ .

Форматирование четырёхмерного массива данных обогатимости представляет собою задачу интерполирования массивов распределения крупности и зольности фракций построением каркаса методом

area-продолжения фракционных массивов для каждого класса крупности и "плазированием" на этот каркас упругой поверхности методом knot-продолжения гранулометрических массивов (рис.4).

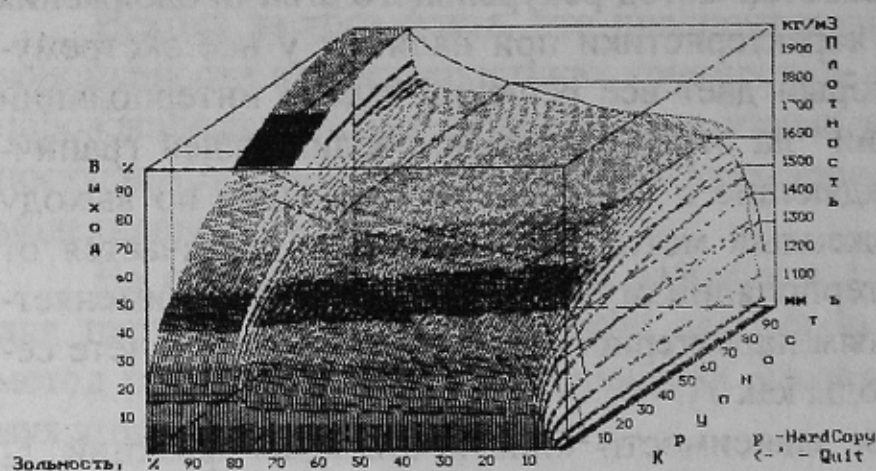


Рисунок 4 - Фракционно-ситовая характеристика сепарабельности угля

Однако, формат объединённого таким образом массива исходных данных может не совпадать с

принятым на конкретной обогатительной фабрике базовым не только по количеству классов крупности и фракций, но и по шкалам зольности, крупности и плотности. Поэтому поставлена и решена задача форматирования массивов данных сепарабельности угля с целью приведения их к базовому формату. При описании фракционно-ситовых характеристик введены понятия полной фракции и полного класса крупности, объединяемые в понятие полного вектора. Полный вектор включает в себя все частицы плотностью (а значит и зольностью) и размером менее заданных величин.

Последующее иссечение этой поверхности многомерного распределения крупности, зольности и плотности как функции полных фракционных классов для выделения частных фракционных классов дано теоремой:

вектор распределений частного фракционного класса  $yas(i, j)$  равен сумме векторов выделяющих его полных векторов главной диагонали с вычетом векторов неглавной диагонали

$$yas(i, j) = [YAS(i, j) + YAS(i-1, j-1)] - [YAS(i-1, j) + YAS(i, j-1)]. \quad (3)$$

В результате такого преобразования в частных классах наблюдалось снижение зольности на величину не более 0,1% как интеграл погрешности кусочно-линейной интерполяции.

Теоретические преобразования распределения фракций выполнены линейным, нелинейным и имитационным методами, в последнем случае при моделировании их как «чёрного ящика» [1, 9, 10].



Линейное преобразование распределения фракций предназначалось для проверки и корректировки баланса таблиц данных обогатитности, но первое же применение разработанной по такому алгоритму программы показало, что оно ещё более необходимо и для обратной задачи по отношению к исходной - для моделирования самоизмельчения, образования шлама и других сходных процессов. Ошибка прогноза результатов грохочения на барабанном грохоте не превысила 0,01% и по выходу, и по золе продуктов. Упростился сам алгоритм преобразования.

Нелинейное преобразование распределения фракций заменой уравнения прямой линии уравнением параболы локализовало эффект уменьшения содержания промежуточных фракций именно в зоне минимума этой параболы и позволило свести дальнейшую задачу к заданию величины прогиба параболы через её связи с параметрами и характеристиками процессов дробления или измельчения.

Имитационное преобразование распределения фракций, плотность распределения вероятностей которых представлена известными дифференциальной и интегральной зависимостями

$$f(\lambda) = \frac{d\gamma(\lambda)}{d\lambda}, \quad (4)$$

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) d\lambda = 1, \quad (5)$$

впервые выполнено с условием получения по крайней мере трёх импульсов: один из них при  $\lambda = \lambda_{\min}$ , второй при  $\lambda = \beta_u$  и третий при  $\lambda = \lambda_{\max}$ , причём, в общем случае эти импульсы не равны друг другу, но форма их и размеры должны быть такими, чтобы и суммарная зола  $\beta_u$  и оценка сепарабельности  $\theta$  из (2) по синтезируемым кривым были равны заданным величинам. Исходя из этих условий, искомая функция  $f(\lambda)$  отличается от распределений Пирсона. Она представлена переменной сепарабельной частью как суммой трех функций, определяющих положение пиков, и корректирующим множителем к сепарабельной части:

$$f(\lambda) = f_0(\beta_u) \cdot [f_1(\lambda_{\min}, \lambda) + f_2(\beta_u, \lambda) + f_3(\lambda_{\max}, \lambda)]. \quad (6)$$

Кроме того, во все составляющие этой функции включен коэффициент раскрытия полезного минерала (по Козину В.З., при учёте этого коэффициента прогнозируется ситовый состав), а в сепарабельные составляющие включены ещё выход теоретического концентрата и коэффициент, корректирующий влияние зольности исходного угля и его сепарабельности на форму импульсов и защищающий от некорректных операций. Результаты работы алгоритма показаны рис.5.

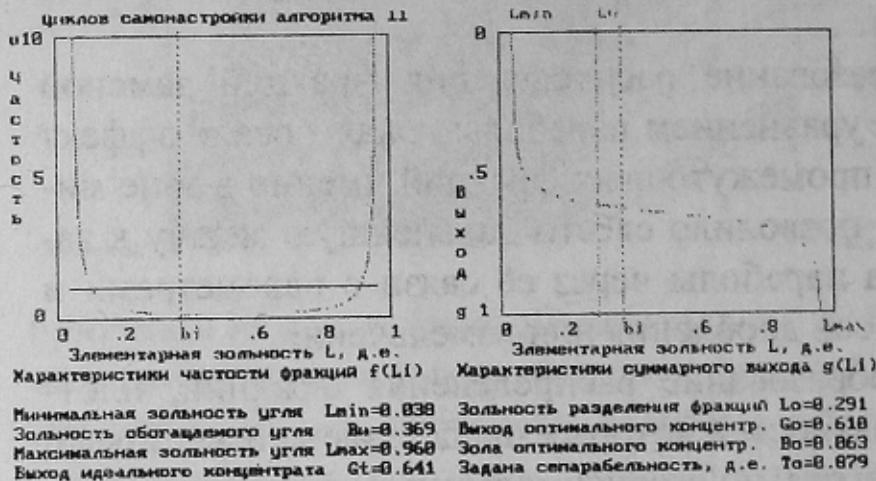


Рисунок 5 – Плотность распределения  $f(\lambda)$  и распределение фракций  $\chi(\lambda)$

В результате разработки перечисленных методов описания массивов ситовых и фракционных

анализов ( $Y_5$ ) стал актуальным вопрос создания микро-СУБД сепарабельности угля.

В основу программного обеспечения микро-СУБД ОУ положены три известные идеи: базовый метод доступа, определяющий характеристики модели данных, макетный метод организации интерфейса с базой данных и организация её по типу инструментальной системы.

### Раздел 3. Теория прогноза параметров сепарации

Анализ методов поиска сепарационных характеристик процессов показал, что традиционно применяемая т.н. «сепарационная характеристика» процесса не учитывает нелинейности распределения фракций  $\chi(\lambda)$ , допуская ошибки по выходу продукта более 10%. Как альтернативный и предпочтительный предложен метод редукции показателя селективности в параметры сепарационного процесса и синтеза по ним через описание известного «треугольника погрешности разделения» в пределах установленной автором области возможных распределений фракций продуктов сепарации.

Распределение фракций реального продукта сепарации всегда хуже лабораторного и лучше «самого плохого», но понятие «самого плохого» распределения фракций продукта сепарации в теории сепара-



рациональных систем не сформулировано. Постулируем, что “самое плохое” распределение фракций продукта сепарации соответствует распределению фракций в исходном материале с точностью до выхода продукта. На таком распределении ошибки разделения соответствуют принципу пропорционального засорения, в то время как на лабораторном распределении – принципу локального засорения. Исходными данными описания фракций продукта приняты:  $\beta_u$  - зольность исходного угля;  $\beta_k$  - зольность концентрата;  $\lambda_0$  - заданная зольность разделения;  $\gamma_u(\lambda)$  - зависимость выхода продукта от зольности разделения  $\lambda$ ;  $\gamma_{кт}$  - выход концентрата теоретического, определяется через зависимость  $\gamma_u(\lambda)$  заданием величины  $\lambda_0$ ;  $\gamma_u$  - выход исходного продукта, причём, для удобства теоретических выкладок, всё в долях единицы. Нижняя (наихудшая) и верхняя (лабораторная) границы фракционных характеристик для концентрата представлены следующими формулами:

$$\gamma_{кн}(\lambda) = \gamma_u(\lambda) \cdot \gamma_{кт} \cdot \gamma_u^{-1}, \quad (7)$$

$$\gamma_{кт}(\lambda) = \begin{cases} \gamma_u(\lambda), & \text{если } \lambda \leq \lambda_0, \\ \gamma_{кт}, & \text{если } \lambda_0 < \lambda, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\gamma_{кн}(\lambda)$  - нижняя зависимость выхода концентрата от зольности разделения;  $\gamma_{кт}(\lambda)$  - теоретический выход концентрата в функции зольности разделения.

Пространство между указанными кривыми по (7) и (8) названо “областью допустимых характеристик концентрата”. Идентичная по форме и размерам область определена и для отходов. Такая область представляет собою вариант наибольшего “треугольника ошибок”. Рассмотрены три принципа формирования треугольника ошибок: пропорциональности, локальности и компромисса. В работе предложена и доказана теорема ( $Y_6$ ) о наибольшей ошибке, утверждающая, что функция выровненной по наихудшему распределению фракций области допустимых параметров имеет высоту

$$H(\lambda) = \gamma_{кт}(\lambda) - \gamma_u(\lambda) \cdot \gamma_{кт}, \quad (9)$$

на зольности разделения  $\lambda_p$  равную произведению долей выходов продуктов

$$H(\lambda_p) = \gamma_{кт} - \gamma_{кт}^2, \quad (10)$$

является своим максимумом, т.е.  $H(\lambda_p) = \max H(\lambda)$ . Знание этой теоремы в форме (10) позволяет обоснованно нормировать выровненную область допустимых ошибок разделения и на этой основе сравнить противопоставляемые принципы пропорционального и локального засорения фракций и синтезировать компромиссный вариант описания характеристики. При локальном засорении фракций все ординаты "треугольника ошибок" определяются формулой

$$h_s(\lambda) = 0,5 [H(\lambda) - H(\lambda_p) + |H(\lambda) - H(\lambda_p) \cdot E_s|], \quad (11)$$

где  $h_s(\lambda)$  - ошибка фракции;  $E_s$  - показатель разделения,  $0 < E_s < 1$ .

Результаты обработки разработанными методами экспериментальных данных из независимых источников привели к заключению, что принцип локального засорения продуктов с реализацией его по формуле (11) наиболее правильно отображает изучаемые взаимосвязи. Принцип компромисса допускает множество вариантов объединения граничных принципов, которые рассмотрены в работе. Пример компромиссного описания фракционных характеристик дан рис.6.

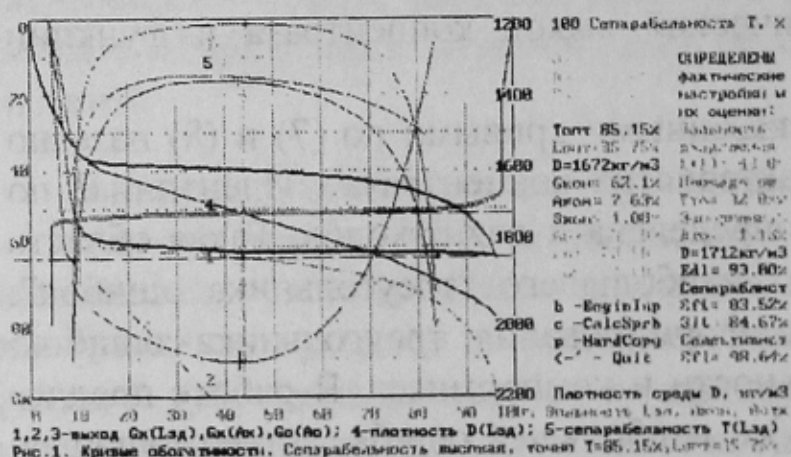


Рисунок 6 - Пример компромиссного извлечения фракций

На этом рисунке толстыми линиями показаны кривые  $\gamma_{кн}(\lambda)$ ,  $\gamma_{с}(\lambda)$  и кривая извлечения фракций,

существенно отличающаяся от интегральной функции Гаусса. Дана теорема, утверждающая, что извлечение разделительной фракции  $E(D_p)$  соответствует выходу концентрата  $\gamma_k$ , а не 50% ( $Y_7$ ).

Для проверки фундаментальности установленного свойства кривой извлечения проведены дискриминационные исследования для случаев с изменением выхода продукта от 58,56% до 87,54% для



зольности разделения от 10% до 80% и на углях с золой от 21% до 36,87%. Селективность задавалась в пределах 90 -95%, плотность изменялась от 1526 кг/м<sup>3</sup> до 2063 кг/м<sup>3</sup>. Результаты этих исследований не опровергли гипотезы о соответствии между величинами  $E_k(D_p)$  и  $\gamma_k$ . Доказано ( $Y_7$ ): всегда  $E_k(D_p) \approx \gamma_k \cdot \gamma_u^{-1}$  и  $E_{отх}(D_p) \approx \gamma_{отх} \cdot \gamma_u^{-1}$ .

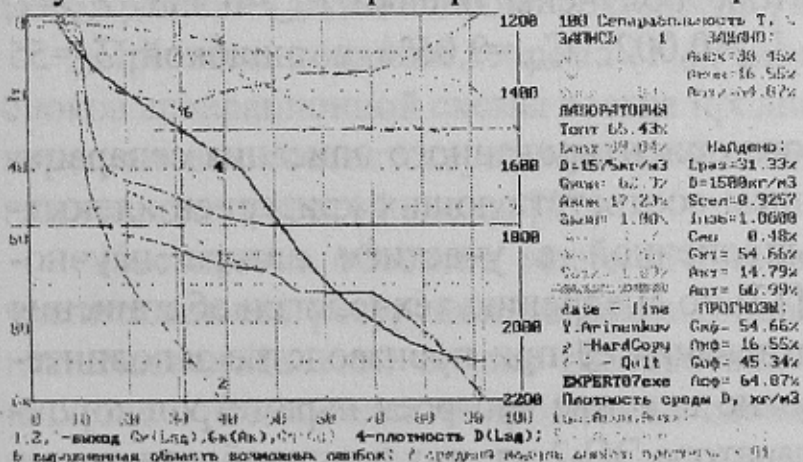
Плотность вероятности физического фактора разделения определяет теорема: при факторе  $\lambda = \lambda_p$  имеет место равенство плотности вероятностей фракций всех продуктов ( $Y_8$ ) [11]. Нужно отметить, что полученные результаты являются следствием выделения области максимальных ошибок сепарации и нормирования изучаемых эффектов в пределах этой области. Установлено также, что нормирование показателя селективности (2) по нижней границе допустимых параметров обогащения упрощает его структуру до вида

$$g = \frac{(\lambda_p - \beta_k) \cdot \gamma_k - (\lambda_p - \beta_u) \cdot \gamma_{кл}}{(\beta_u - \beta_{кл}) \cdot \gamma_{кл}} \quad (12)$$

Эта формула отличается от классического критерия Хенкока-Деламитера-Лященко тем, что явно учитывает заданный параметр разделения  $\lambda_p$ .

Впервые предложена теорема  $Y_9$  - теорема-критерий оценки и прогноза параметров сепарации по результатам экспериментального исследования технологии обогащения. Даны постановка задачи и метод решения задачи, результаты исследования реализованы в программе EXPERT07 [10] (рис.7).

Рисунок 7 - Поиск критерия оценок и прогноза результатов обогащения



Кратко, особенность алгоритма программы EXPERT07 состоит в следующем. Вначале отыскивается зольность разделения  $\lambda_p$ , обеспечивающая получение теоретического выхода концентрата  $\gamma_{кт}$  в соответствии с зольностью исходного

ского выхода концентрата  $\gamma_{кт}$  в соответствии с зольностью исходного

угля  $A_{и}^d$ , концентрата  $A_{к}^d$  и отходов  $A_{о}^d$ .

После этого организуется цикл поиска коэффициента избирательности  $I_{изб}$  по глобальному минимуму средней по модулю ошибки прогноза фракционного состава концентрата  $C_{мо}$ , а внутри этого цикла организуется вложенный цикл поиска треугольника ошибок, обеспечивающего получение заданной зольности концентрата  $A_{к}^d$  и отходов  $A_{о}^d$  с оценкой селективности  $E_{сел}$ .

Завершается работа программы сообщением о 7 найденных оценках процесса ( $\lambda_p, D_p, E_{сел}, I_{изб}, C_{мо}, A_{к}^d, A_{о}^d$ ).

Критерием правильности полученных оценок является малая величина среднего модуля ошибок выхода фракций прогнозируемого концентрата  $C_{мо}$ .

Аппроксимировав стороны "треугольника ошибок" отрезками прямых, оценим основание такого треугольника по плотности как  $\Delta D$  в  $\pm 3$  нормированных ошибки, для которых вероятности  $P(1)=0,(5)$ ;  $P(2)=0,(8)$ ;  $P(3)=1$ , получим ошибку в натуральном масштабе  $\delta_D = \Delta D/6$ , кг/м<sup>3</sup>, по которой легко прогнозируется фракционный состав продуктов сепарации.

С помощью программы EXPERT07 изучены результаты экспериментальных промышленных исследований.

Установлено, что тяжелосредний сепаратор ОК-10 обеспечивает селективность  $E_{сел}=0,9317$  с избирательностью  $I_{изб}=0,9102$  при ошибке описания  $C_{мо}=0,09\%$  и  $\delta_D=57$  кг/м<sup>3</sup>.

Для УОФ ЯКХЗ (за 2.03.90) получена оценка  $E_{сел}=0,9302$ .

В условиях ЦОФ «Узловская» сепаратор СК-32 показал  $E_{сел}=0,99$ ,  $I_{изб}=0,032$ , ошибку описания  $C_{мо}=0,23\%$  при ошибке  $\delta_D=5$  кг/м<sup>3</sup>. При изучении результатов обогащения с выделением трёх продуктов в шнековом сепараторе получены оценки  $E_{сел}=0,935$ ,  $I_{изб}=1$ ,  $C_{мо}=0,48\%$  и  $E_{сел}=0,9999$ ,  $I_{изб}=0,002$ ,  $C_{мо}=0,06\%$  с ошибкой  $\delta_D=55$  кг/м<sup>3</sup>.

Эффективность целевого ориентированного описания сепарационных процессов применением соответствующих критериев иллюстрируется результатами выполненной с участием автора научно-исследовательской работы [12] по внедрению технологии обогащения золы уноса ТЭС для использования её при производстве заполнителей. В этой работе исследовано влияние настроек параметров коронно-электростатического сепаратора ЭС-2 на результаты обогащения в нём золы уноса электростанций.

Результаты сепарации оценены критерием сепарабельности (2).



Благодаря явному учёту параметра разделения  $\lambda_0$  в показателе сепарабельности вариациями этого параметра массив экспериментальных данных был в несколько раз расширен, что позволило анализировать режимы, на которые сепаратор настроен.

Установлено, что положение максимума сепарабельности слабо выражено на зольности разделения  $\lambda_0=0,85$ , но существенно зависит от числа оборотов осаждающего электрода, и величина  $100 \text{ мин}^{-1}$  может рассматриваться как оптимальный параметр сепаратора.

Исследование влияния напряжённости электрического поля на оценку сепарабельности золы уноса ТЭС позволило обнаружить гребень на поверхности функции отклика, на который можно ориентировать электрические параметры режима работы сепаратора, установлен оптимальный уровень напряжённости электрического поля  $390 \text{ КВ}\cdot\text{м}^{-1}$ .

Впервые установлено также, что делитель проводниковой фракции должен устанавливаться на минимальном расстоянии от осаждающего электрода, соответствующем крупности сепарируемого материала, традиционный поиск якобы оптимального положения этого делителя не нужен.

Примененная методология исследования сепарационной технологии многократно ускорила поиск оптимальных режимов. Полученные результаты дают основание утверждать, что целеориентированному описанию сепарации угля альтернативы нет.

#### *Раздел 4. Теория схем сепарационной технологии*

Впервые поставлена задача системно ориентированного описания каждого технологического процесса в технологической схеме и дан метод решения задачи строго по очереди [13].

При этом доказана теорема ( $Y_{10}$ ), утверждающая, что катенация блоков сепарационной схемы всегда предпочтительнее любых других перестановок соответствует заданной композиции блоков по топологии технологической схемы [12].

Постановка объектов технологической схемы в очередь за вычислительными ресурсами регламентирована 9-ю специальными соглашениями. На этой основе разработана макро модель обогатительных схем. Блок-схема макро модели сложной обогатительной технологии показана рис.8.

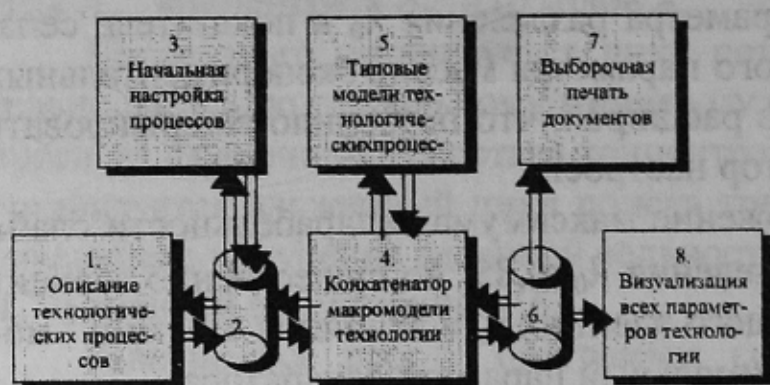


Рисунок 8 - Блок-схема макромоделей

Здесь блоки номер 2 и 6 - это файлы данных о схеме, а остальные все блоки представляют собою exe - файлы. Блок номер 1 в интерактивном

режиме запрашивает описание технологической схемы в следующем порядке:

{Адрес1} {Имя процесса} {Тип} {Номер} {Имя продукта} {Адрес2}.

По типу процесса распознается количество продуктов у данного процесса, и если их два, то в следующей строке выдается запрос по второму продукту:

{Номер+1} {Имя продукта} {Адрес3}.

По существу, эти два предложения образуют простой язык программирования описания технологической схемы обогащения.

Макромодель позволяет проводить необходимые технологические исследования.

Установлено, что накопление шлама в технологической схеме существенно удлиняет кинетику основных параметров (например, в тысячу раз). Наоборот, сброс шлама из оборота происходит весьма быстро, как бы лавинообразно.

Если количество поступающей в схему воды меньше количества выходящей, то возникает "неустраняемая" невязка. В связи с этим эффектом предложен алгоритм автоматической подачи воды в технологическую схему фабрики.

Изучением стилизованных технологических схем установлена связь кинетики вычислительного процесса с топологией схемы и настройками процессов.

Анализ и настройка сепарационной технологии по модели основаны на доступности и точности оценочной и управляющей информации в любой точке технологической схемы, благодаря системно-ориентированному моделированию. Пример окна макромоделей технологической схемы ЦОФ "Киевская" дан рис.9.



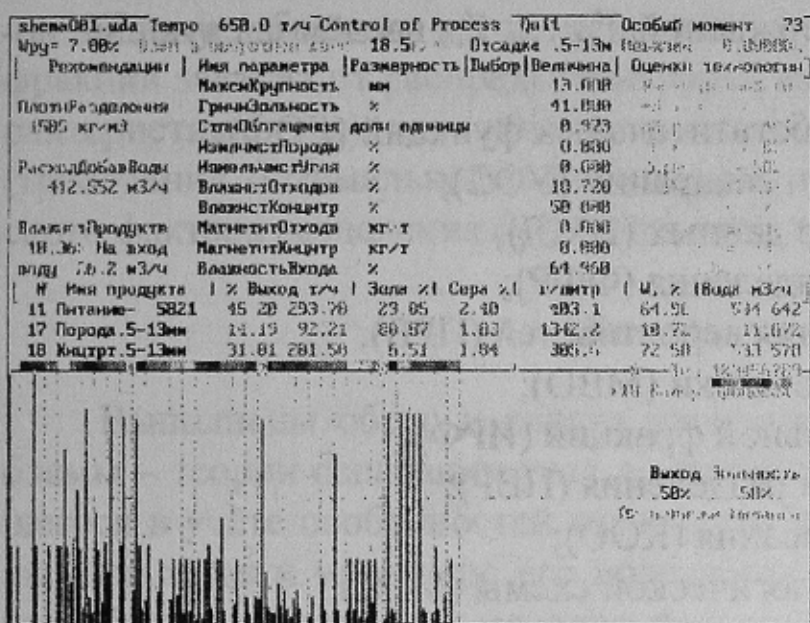


Рисунок 9 - Окно отображения состояния технологической схемы

Представленные на этом рисунке столбиковые диаграммы размещены в колонках с цветовой маркировкой типа объектов и в порядке перечисления процессов и их продуктов (первый продукт и

второй, если есть таковой).

Такое кодирование типа объектов и их параметров делает возможным обзор состояния сразу всей технологии, доступ к каждому объекту для его детального контроля и перенастройки управляющих параметров режима сепарации.

В данном примере (см.рис.9) информация о дифференциальных параметрах всех 59 продуктов схемы по классам крупности, фракциям плотности и поступающей воде для каждого процесса сохраняется в специальном файле в количестве  $(3 \times 6 \times 4 + 1) \times (36 + 59) = 6935$  значений, для нахождения которых из гипотетической системы линейных уравнений потребовалось бы составлять и решать матрицу с количеством элементов  $6935^2 = 48094225$ .

Получаемые на реальном процессе параметры по рекомендуемой разработанной моделью настройкам не нуждаются в последующей оптимизации методом поиска – они заданы по принципу аналитической самонастройки.

В результате выполнены все необходимые исследования сложной проблемы без поиска явных функций для описания объектов и схем и впервые получена универсальная непрерывно действующая макро модель технологии.

По предварительному расчёту, управление технологией ЦОФ «Чумаковская» ОАО «Шахта «Красноармейская – Западная №1» по её макро модели за счёт оптимизации загрузки оборудования уменьшит удельный расход электроэнергии на  $1,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{т}^{-1}$ , что при переработке 2,16 млн. тонн угля в год составит  $3888 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$  [34-36] или 777 тысяч гривен по расценкам 2002г.

Для выделенных утверждений  $Y_1, \dots, Y_{10}$  введём следующие номинальные определения:

- $Y_1$  – дифференцирование обогатительных функций (ДОФ);
- $Y_2$  – условие оптимальности сепарации (УОС);
- $Y_3$  – продолжение массивов данных (ПМД);
- $Y_4$  – физический фактор разделения (ФФР);
- $Y_5$  – плотность распределения вероятностей (ПРВ);
- $Y_6$  – максимальная высота ошибки (МВО);
- $Y_7$  – извлечение разделительной фракции (ИРФ);
- $Y_8$  – плотность вероятности разделения (ПВР);
- $Y_9$  – критерий оценки – описания (КОО);
- $Y_{10}$  – моделирование технологической схемы (МТС).

Применение номинальных определений вместо числовых индексов кортежей разработанных методов теории сепарации придаёт этим именам смысловое содержание. Рассмотрим, например, кортеж  $k_{6,2} \equiv k_{\text{МВО, УОС}}$ . Сразу видно, что здесь стоит вопрос об описании области максимальных ошибок (по выходу фракций) для заданной зольности разделения  $\lambda_p$  (рис. 10).

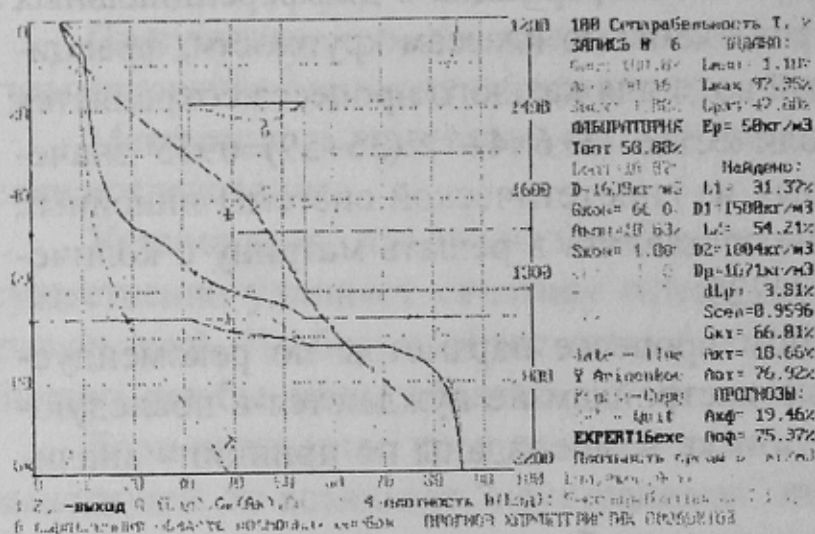


Рисунок 10 – Прогноз фракционного состава продуктов для  $\lambda_p = 47\%$

Представленный рисунок является как бы вторым кадром кинограммы к рис. 7 – он отличается только зольностью разделения и наличием указания диапазона

ошибки по плотности. Теперь можно достоверно утверждать, что на зольности разделения  $\lambda_p = 62.66\%$  вершина области допустимых ошибок станет плоской, а взаимозасорение продуктов – минимальным, при неизменной ошибке разделения по плотности  $\delta_D = 50 \text{ кг/м}^3$ . Очевидно, на угле с идеальной обогатимостью вся выровненная область допустимых ошибок превращается в прямоугольную. Следовательно, утверждение о том, что основание ошибки выходов фракций располагается параллельно основанию выровненной области допустимых ошибок, см. формулу (11), является наиболее правдоподобным.



Таким образом, здесь установлено, что взаимное засорение фракций зависит от распределения фракций в исходном угле  $\gamma(\lambda)$  (характеристики угля), величины физического фактора разделения  $D(\lambda_p)$  (требования оптимальности процесса) и ошибки величины физического фактора разделения  $\delta_D$  (совершенства конструкции машины).

### Выводы

Выполнены обзор и анализ решения актуальной научной проблемы – теории сепарации угля по физическому фактору, заключающегося в учёте особенностей характеристик сепарируемого материала, аппаратов и машин по его переработке и схем их соединения, и разработке принципов и методов прогнозного определения их оптимальных настроек, имеющее важное народнохозяйственное значение и позволяющее увеличить до 10% эффективность работы обогатительной фабрики. Общие выводы и рекомендации полученных результатов следующие:

1. Впервые разработана полная теория сложной непрерывной сепарационной технологии углеобогатительных фабрик [1], устранившая проблему большой невязки материального баланса, имевшую место в расчёте таких схем матричными или итерационными методами, и позволившая установить, что последовательное описание объектов технологии с соблюдением принципа причинно-следственных связей предпочтительнее любых других перестановок блоков [12] и делает структуру разработанной макромоделли универсальной в применении к технологии сепарации угля [14]; макромоделль решает задачи контроля и оптимизации более чем 7600 параметров технологии, экологии и энергосбережения устойчиво, с невязкой материального баланса близкой к нулю [3, 4].

2. Теория прогноза параметров и характеристик получаемых продуктов сепарации [1] позволяет применить закономерности сепарационного процесса при проектировании новых технологий и расчёте действующих технологических схем; результаты сепарации зависят от распределения фракций в исходном угле, величины физического фактора разделения и ошибки его поддержания.

3. Выполнена систематизация методов теории сепарации угля в форме допустимых кортежей этих методов; для расширения возможностей использования теории составлена треугольная матрица частных связей методов теории и дан пример применения этой матрицы.

Список источников

1. Arinenkov Y. Universal model for research both optimization of technological processes and circuits of coal preparation factories on the COMPUTER / 2nd Regional APCOM'97 Symposium on COMPUTER APPLICATIONS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRIES. Published by: The Moscow State Mining University Publishing Center. Moscow, Russia - 1997. -P.209-214.
2. Ариненков Ю.Д. Аналитическая оптимизация процессов переработки полезных ископаемых // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія. Економічна. – Донецьк: ДонДТУ, 2000. Випуск 37. –С.181-188.
3. Ариненков Ю.Д. Энергосбережение на обогатительной фабрике при управлении по макромоделю её технологии // Энергосбережение: Н-тех. Ж. – Донецк, ООО «Технический центр «РИТМ», 2002. № 1. –С.15-17.
4. Ариненков Ю.Д. Оптимизация технологии обогащения как беззатратный метод энергосбережения // Энергосбережение: Н-тех. Ж. – Донецк, ООО «Технический центр «РИТМ», 2001. № 11. –С.13-15.
5. Ариненков Ю.Д., Гаркушин Ю.К. Резервы энергосбережения на обогатительной фабрике // Энергосбережение: Н-тех. Ж. АЭНУ, АТНУ, ИЭП НАНУ. – Донецк, ОАО «УкрНТЭК», 2002. № 4. –С.13-16.
6. Ариненков Ю.Д. Методы анализа и синтеза показателей обогатимости полезных ископаемых / В кн. Применение ЭВМ и математических методов в горных отраслях промышленности. Труды 17-го Международного симпозиума APCOM'80. М., Недра, 1982. Т.2. –С.364, 447-451.
7. Ариненков Ю.Д., Никифоров Т.И. Опытная технологическая оценка работы обогатительной фабрики // Обогащение и брикетирование угля: Научно-тех. сб. / МУП СССР. –М.: ЦНИИТЭИУ. -1976. №9. –С.10-12.
8. Ариненков Ю.Д. Метод минимизации массива классов крупности сыпучих материалов // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск: 27. Серія: Гірничо-електромеханічна. Донецьк, 2001. -С.17-22.
9. Ариненков Ю.Д. Преобразования фракционных характеристик сыпучих материалов // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. –Донецьк. –2002. Випуск 42. –С.25-31.
10. Ариненков Ю.Д. Имитация характеристики плотности распределения фракций полезного ископаемого // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк, 2002. Випуск 39. –С.166-174.
11. Ариненков Ю.Д. Влияние физического фактора разделения на сепарацию угля // Вісті Донецького гірничого інституту. ДонНТУ. –Донецьк. –2004. №2. –С.88-92.
12. Переработка золы тепловых электростанций электросепарацией / Ю.Д. Ариненков, А.С. Киричок, Л.А. Коткина, Н.Д. Оглоблин //Совершенствование процессов электросепарации и конструкции электросепараторов: Межведомственный сб. научных трудов /»Механобр». –Л.: -1987. –С.130-139.
13. Ариненков Ю.Д. Имитационное исследование структуры сепарабельной макромоделю обогащения // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 25. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Донецьк, 2001. -С.175-181.
14. Ариненков Ю.Д. Макромодель схемы обогатительной технологии // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – Донецьк. –2001. Випуск 27. –С.7-16.