

К ВОПРОСУ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНЦЕНТРАТОВ УГЛЯ

С. Циерпиш, докт. техн. наук, проф.,
Силезский политехнический институт, Польша

В статье представляются системы управления, максимизирующие количество концентрата с заданным качеством, которые используют алгоритм поиска оптимальной рабочей точки через шаговые изменения плотности разделения в параллельных процессах обогащения угля в тяжелых жидкостях, отсадочных машинах и в процессе флотации.

Проблема и её связь с научными или практическими задачами. Угольные концентраты производятся в процессах механической переработки угля, таких как обогащение в тяжёлых жидкостях, отсадочных машинах или в процессе флотации. Концентраты угля, получаемые в этих процессах, соединяют друг с другом и посылают потребителям как конечный продукт. На коксохимических заводах шихта коксования образуется всегда вследствие соединения концентратов, производимых в отдельных параллельных выше указанных технологических процессах. Часто так обстоит дело и с энергетическими углями, для которых применяется обогащение рядового угля в отсадочных машинах и тяжелосредних сепараторах, а самых мелких классов по крупности - в процессе флотации.

Существенной технологической проблемой является обеспечение постоянного качества продуктов обогащения (зольность, содержание влаги, теплота сгорания) в условиях переменных характеристик исходного питания (гранулометрический состав, характеристика обогатимости) и переменной эффективности разделения обогатительных машин. Отдельные технологические процессы снабжаются системами автоматики, улучшающими их помехоустойчивость, например, системы стабилизации плотности тяжёлой жидкости в процессах обогащения крупного угля или системы регулирования выгрузки продуктов для отсадочных машин. В процессах флотации контролируют количество флотационных реагентов, добавляемых в камеры флотационных машин с целью повышения эффективности процесса и рационального расхода реагентов.

Анализ исследований и публикаций. В указанных выше системах главный упор контроля и автоматического управления положен на стабилизацию качественных параметров продуктов. Это следует из необходимости поддержания товарной продукции в данном классе цен и улучшения стабильности продукции, определяемой условиями контракта на продажу угля.

Относительно мало внимания уделяется на практике вопросам максимализации количества концентратов с заданным качеством (ценой продажи) [1, 2, 3]. Это обусловлено, наряду с другими факторами, техническими трудностями при реализации систем экстремального регулирования, а также отсутствием твердой уверенности в экономической эффективности оптимального управления в условиях непостоянства характеристик исходного питания рядового угля.

Постановка задачи. В статье поставлена и решена задача: обосновать возможность максимализации количества производимых концентратов с заданным качеством в технологической системе параллельного обогащения угля разных классов крупности, получаемых после предварительной классификации. В рассматриваемых примерах внимание сосредоточено на концентраты, получаемые в процессе обогащения в тяжёлых жидкостях и отсадочных машинах, как наиболее распространённых на наших обогатительных фабриках. Нижеприведенные рассуждения легко обобщить на случаи присоединения к конечному продукту флотоконцентрата, как это имеет место при обогащении коксовых углей и всё чаще при обогащении энергетических углей.

Изложение материала и результаты. Примерная технологическая система производства концентрата угля представлена на рис. 1. В ЭТОЙ системе уголь обогащается в тяжелых жидкостях и в отсадочных машинах. В обоих сепараторах (DISA и отсадочная машина) существует возможность влияния на плотность разделения тяжёлой жидкости через изменение плотности тяжёлой жидкости (DISA) или положение поплавка, соединённого с системой выгрузки отходов (отсадочная машина). В этом втором случае, плотность разделения известна только косвенно, однако, на ее рост или снижение можно довольно легко влиять. Концентраты крупного и мелкого угля, соединенные друг с другом, дают конечный продукт в данном классе товарного продукта согласно договору между производителем и потребителем.

Производство конечного концентрата с заданной, например, зольностью может реализоваться при разных уставках плотности разделения в обоих сепараторах, чтобы соединение обоих потоков угля, покидающих сепараторы, давало продукт с требуемой зольностью. Как показал дальнейший анализ, вышеуказанная технологическая система имеет характеристику экстремального объекта, т. е. при сохранении заданной зольности в конечном продукте существует возможность выбора оптимальной плотности разделения в обоих сепараторах, дающих максимально возможное в данной ситуации количество продукции.

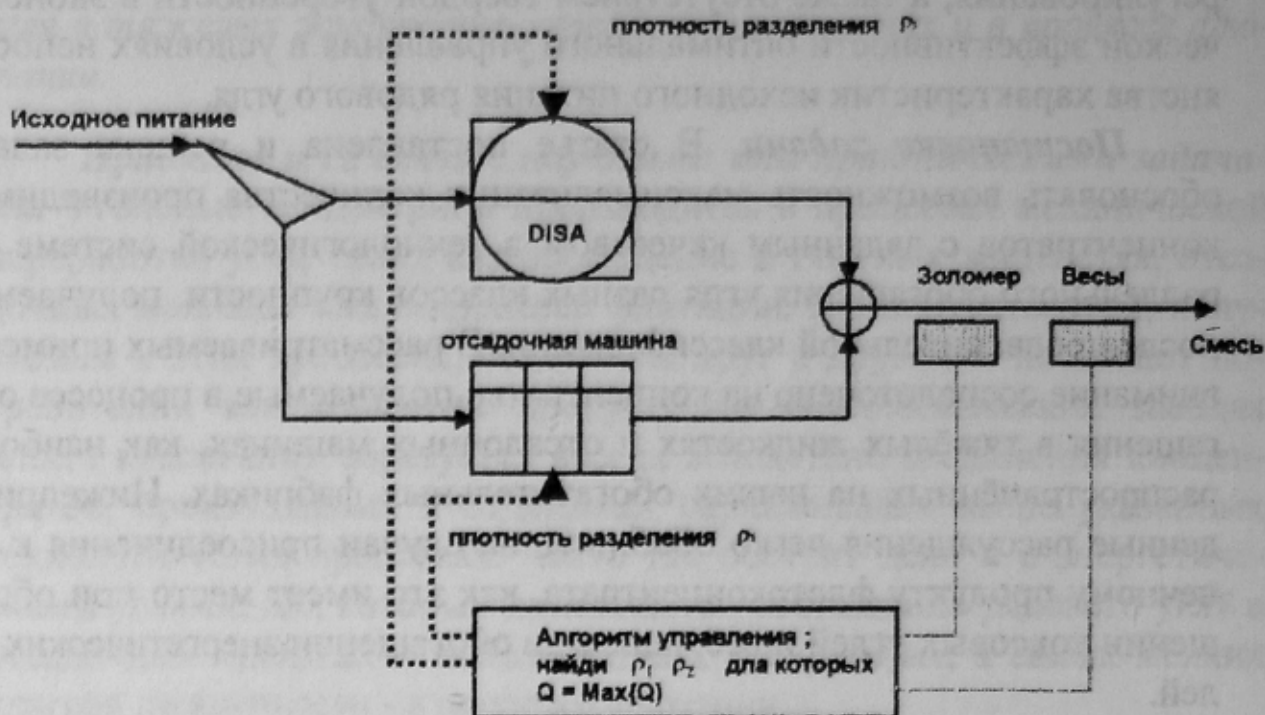


Рисунок 1 – Блок-схема технологической системы производства концентрата угля в параллельных процессах обогащения: в тяжелых жидкостях и в отсадочной машине

Нижеуказанные характеристики технологической системы относятся к конкретной технологической схеме выбранной обогатительной фабрики, в которой обогащается рядовой уголь с характеристикой обогатимости (для класса плотности в исходном питании), представленной на рис. 2. Кривые обогатимости для обоих сепараторов DISA и отсадочной машины, определённые для их типовых кривых, показаны на рис. 3 и 4.

Вышеуказанные зависимости описаны следующими уравнениями:

$$Q_1(p_1) = \int_0^{p_1} w_1(p_1) \cdot f_1(p_1) dp_1; \quad (1)$$

$$A_1(p_1) = 1 / Q_1(p_1) \int_0^{p_1} w_1(p_1) \cdot f_1(p_1) \cdot a_1(p_1) dp_1; \quad (2)$$

$$Q_2(p_2) = \int_0^{p_2} w_2(p_2) \cdot f_2(p_2) dp_2; \quad (3)$$

$$A_2(p_2) = 1 / Q_2(p_2) \int_0^{p_2} w_2(p_2) \cdot f_2(p_2) \cdot a_2(p_2) dp_2; \quad (4)$$

$$A = \frac{A_1 \cdot Q_1 + A_2 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}; Q = Q_1 + Q_2; \quad (5)$$

где $w_{1,2}(p_{1,2})$ - характеристики обогатимости рядового угля,
 $f_{1,2}(p_{1,2})$ – кривые разделения сепараторов,
 $a(p_{1,2})$ – зависимость зольности фракции исходного питания от плотности этой фракции,
 $p_{1,2}$ – плотность разделения [г/см³],
 $A_{a,2}$ – зольность концентратов, %,
 $Q_{1,2}$ – количество концентратов [т/ч].

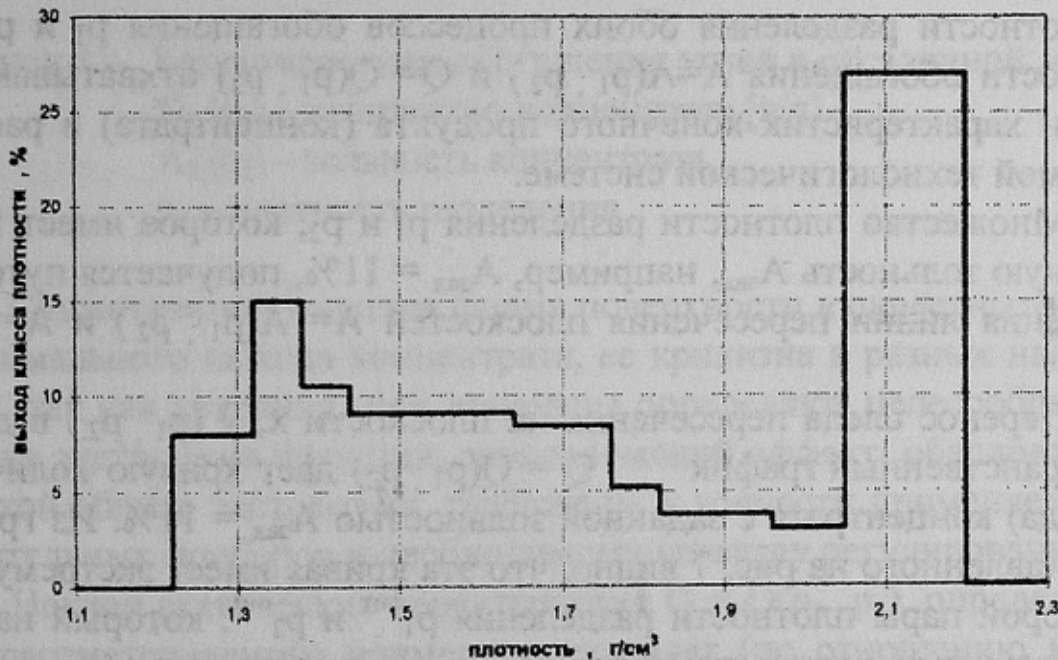


Рисунок 2 – Примерная характеристика обогатимости исходного питания

$w(p)$ - доля фракции плотностью p ,
 p - плотность фракции в исходном питании

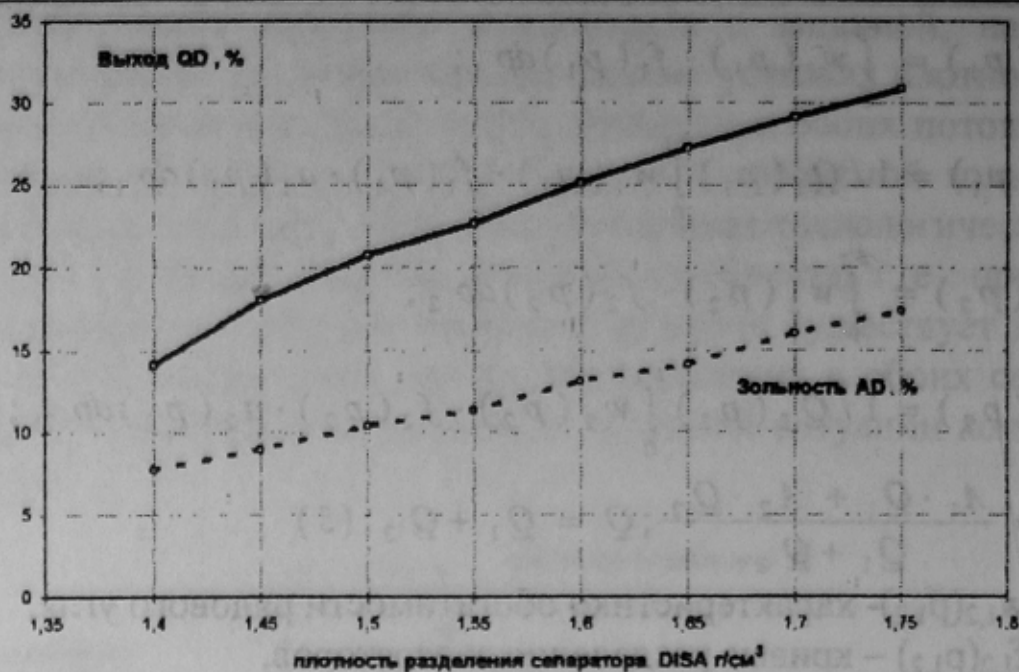


Рисунок 3 – Характеристики обогатимости угля в тяжелых суспензиях
 $Q_1(p_1)$ - количество концентрата [т/ч],
 $A_1(p_1)$ - зольность концентрата,
 p_1 - плотность разделения

На рис. 5 и 6 представлена зависимости A в конечном продукте Q от плотности разделения обоих процессов обогащения p_1 и p_2 . Поверхности обогащения $A=A(p_1, p_2)$ и $Q=Q(p_1, p_2)$ отхватывают все случаи характеристик конечного продукта (концентрата) в рассматриваемой технологической системе.

Множество плотности разделения p_1 и p_2 , которое имеет всегда заданную зольность $A_{\text{зад}}$, например, $A_{\text{зад}} = 11\%$, получается путем определения линии пересечения плоскостей $A=A(p_1, p_2)$ и $A=A_{\text{зад}} = 11\%$.

Перенос следа пересечения на плоскости $x, y(p_1, p_2)$ в другой пространственный график $Q=Q(p_1, p_2)$ дает кривую количества (выхода) концентрата с заданной зольностью $A_{\text{зад}} = 11\%$. Из графика представленного на рис. 7 видно, что эта кривая имеет экстремум для некоторой пары плотности разделения $p_1^{\text{опт}}$ и $p_2^{\text{опт}}$, который назовем оптимальными плотностями разделения, максимизирующими выход концентрата с заданной зольностью.

Технологическая система, рассматриваемая как объект регулирования, является объектом с экстремальной характеристикой. Положение максимума количества продукта Q_{max} зависит от характеристики рядового угля и от характеристики сепаратора с описанной кривой

разделения. Анализ формы функции $Q = Q(p_1, p_2)$ показывает, что эта функция имеет один глобальный экстремум, что в значительной степени облегчает составление алгоритмов для поиска этого экстремума.

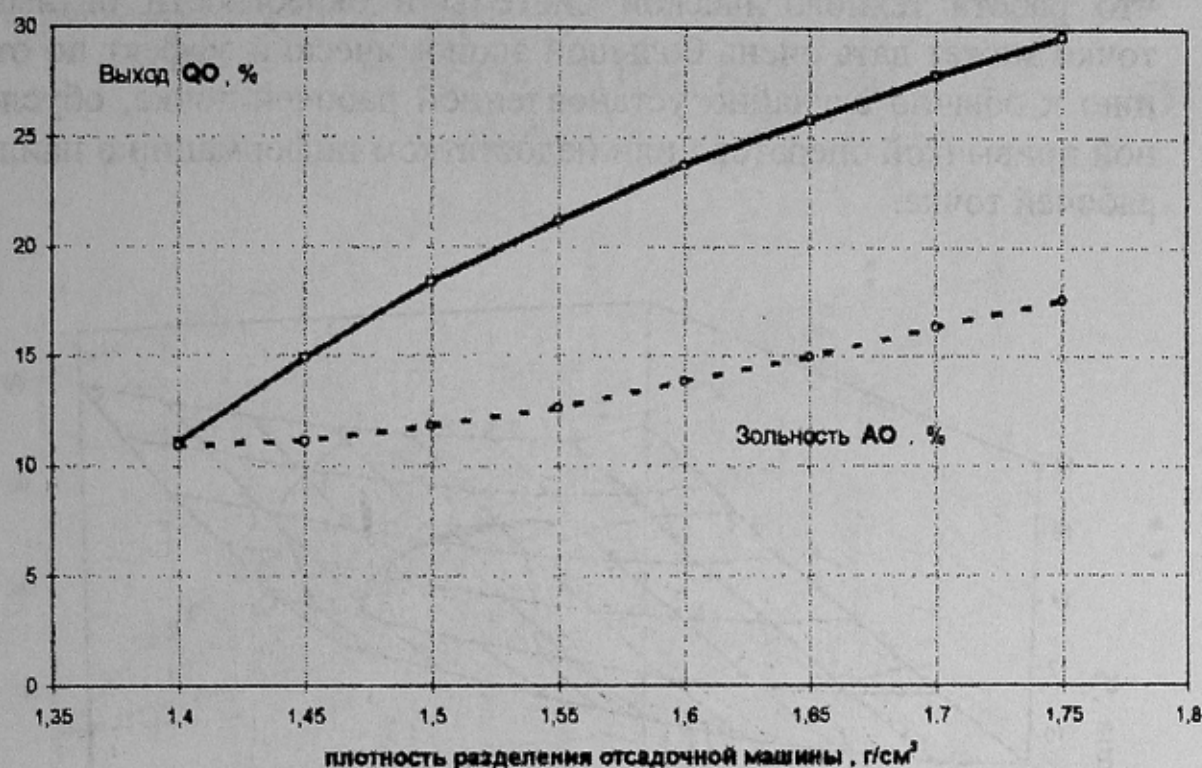


Рисунок 4 – Характеристики обогащения углей в отсадочной машине
 $Q_2(p_2)$ – количество концентрата [т/ч]
 $A_2(p_2)$ – зольность концентрата,
 p_2 – плотность разделения

Существенной является форма поверхности в окрестности точки максимального выхода концентрата, ее кривизна в разных направлениях, так как значения этой кривизны определяют целесообразность поиска экстремума функции, экономический эффект, обусловленный работой вблизи экстремума, требования к точности применяемых измерительных приборов и необходимому качеству регулирования.

Наклон статических характеристик $Q = Q(p_1, p_2)$, определенный для рассматриваемого примера, составляет (по отношению к 100% выходу конечного продукта): $\Delta Q/\Delta p_1 = 152 \text{ \%}/\text{г/см}^2$ и $\Delta Q/\Delta p_2 = 150 \text{ \%}/\text{г/см}^3$. Разница выхода концентрата в точке максимума и, например, выхода концентрата для равных плотностей разделения $p_1 = p_2 = 1,50 \text{ г/см}^3$ (дающих также заданную зольность $A=11\%$) составляет $\Delta Q = 1,1\%$ (3,66 % по отношению к 100 % концентрату), а для реальной

рабочей точки $\rho_1 = 1,46 \text{ г/см}^3$ и $\rho_2 = 1,51 \text{ г/см}^3$ эта разница составляет $\Delta Q = 2,15 \%$ (7,16 % роста количества исходного питания по отношению к 100% концентрату). Из этих приближенных вычислений видно, что работа технологической системы в окрестности оптимальной точки может дать очень большой экономический эффект по отношению к обычно случайно установленной рабочей точке, обусловленной привычкой оператора или недостатком информации о наилучшей рабочей точке.

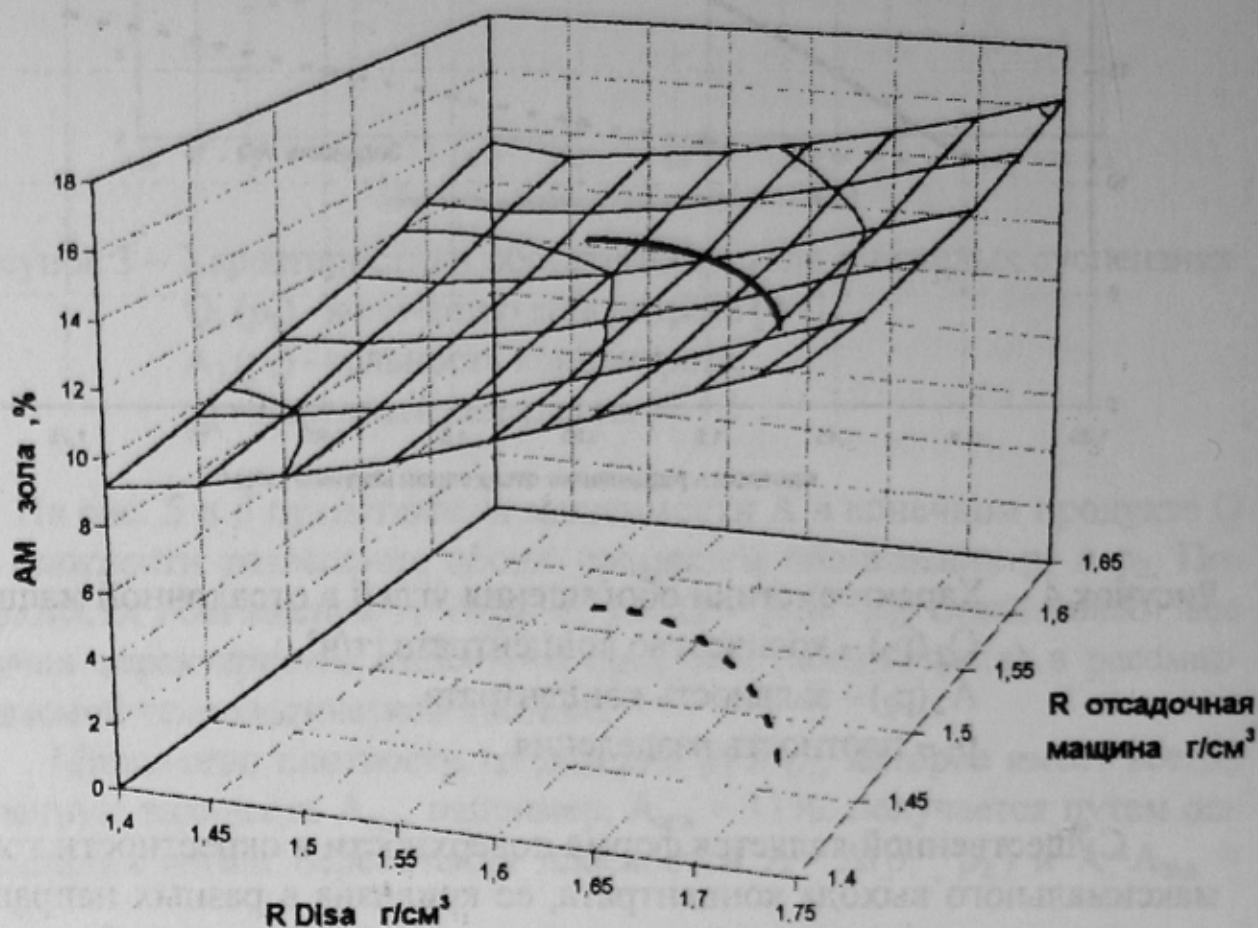


Рисунок 5 – Статистическая характеристика процесса производства конечного концентрата

$A(\rho_1, \rho_2)$ - зольность конечного продукта

Вопросы поиска оптимальной рабочей точки для вышеуказанной технологической системы параллельно работающим двух или больше сепараторов рассматривались в работах [2, 3, 6]. Общий метод выбора оптимальных плотностей разделения параллельно работающих машин (максимальный выход совместного продукта с заданной зольностью) представлен в работе [1].

Максимизируют функцию многих переменных (для “n” параллельных машин):

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n; \tag{6}$$

для ограничивающего условия:

$$A = A_{rad} = \frac{A_1 \cdot Q_1 + A_2 \cdot Q_2 + \dots + A_n \cdot Q_n}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}; \tag{7}$$

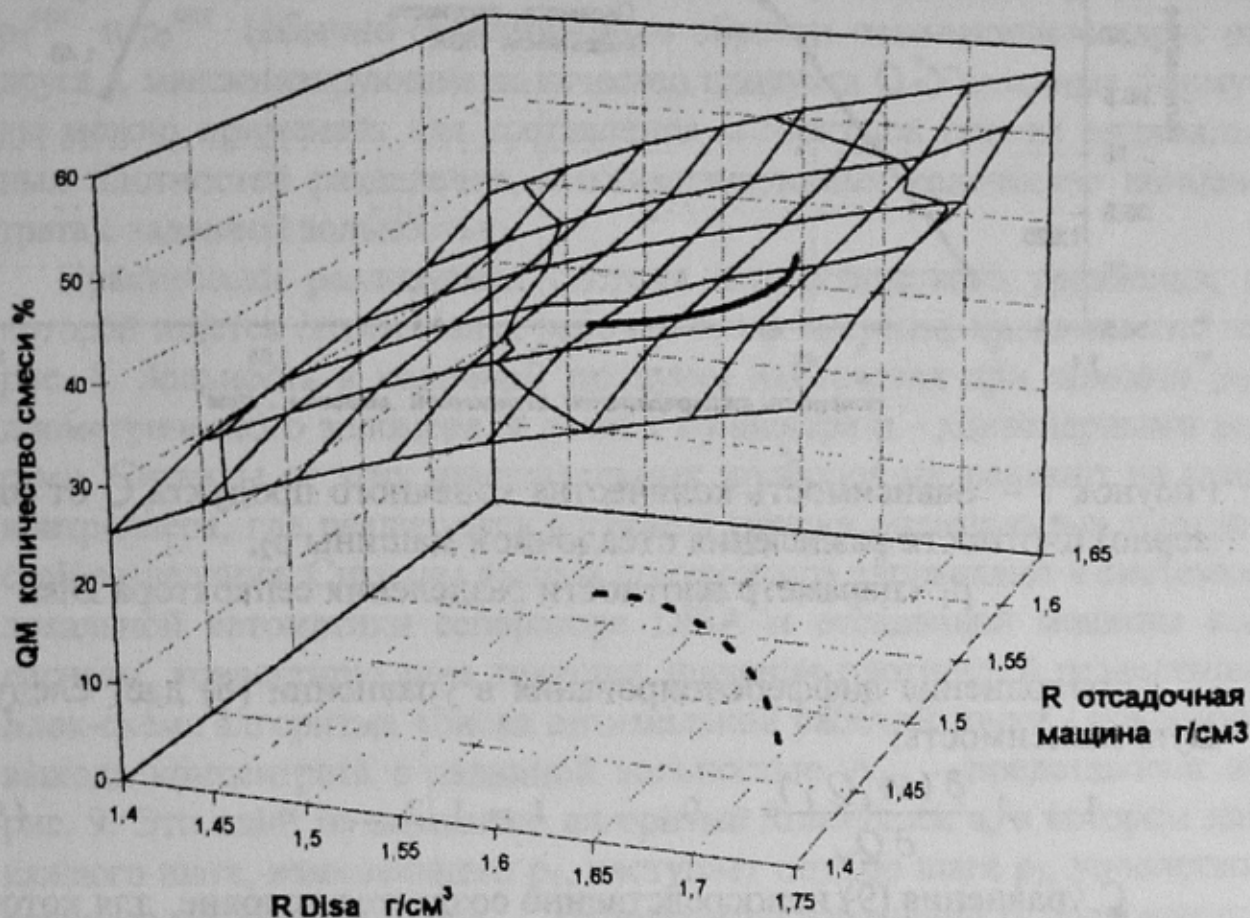


Рисунок 6 – Статическая характеристика процесса производства конечного концентрата

$Q(p_1, p_2)$ — количество конечного продукта [т/ч]

Условие существования максимума функции (6) в методе неопределенных множителей Langrange’a, примененной в этом случае, сводится к приравниванию к нулю производной функции Φ , образованной от суммы функций (6) и функции (7), умноженной на так называемый множитель Langrange’a λ :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = \frac{\partial}{\partial Q_i} \left\{ \sum_{i=1}^{i=n} Q_i + \lambda \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot Q_i \right\} = 0; \tag{8}$$

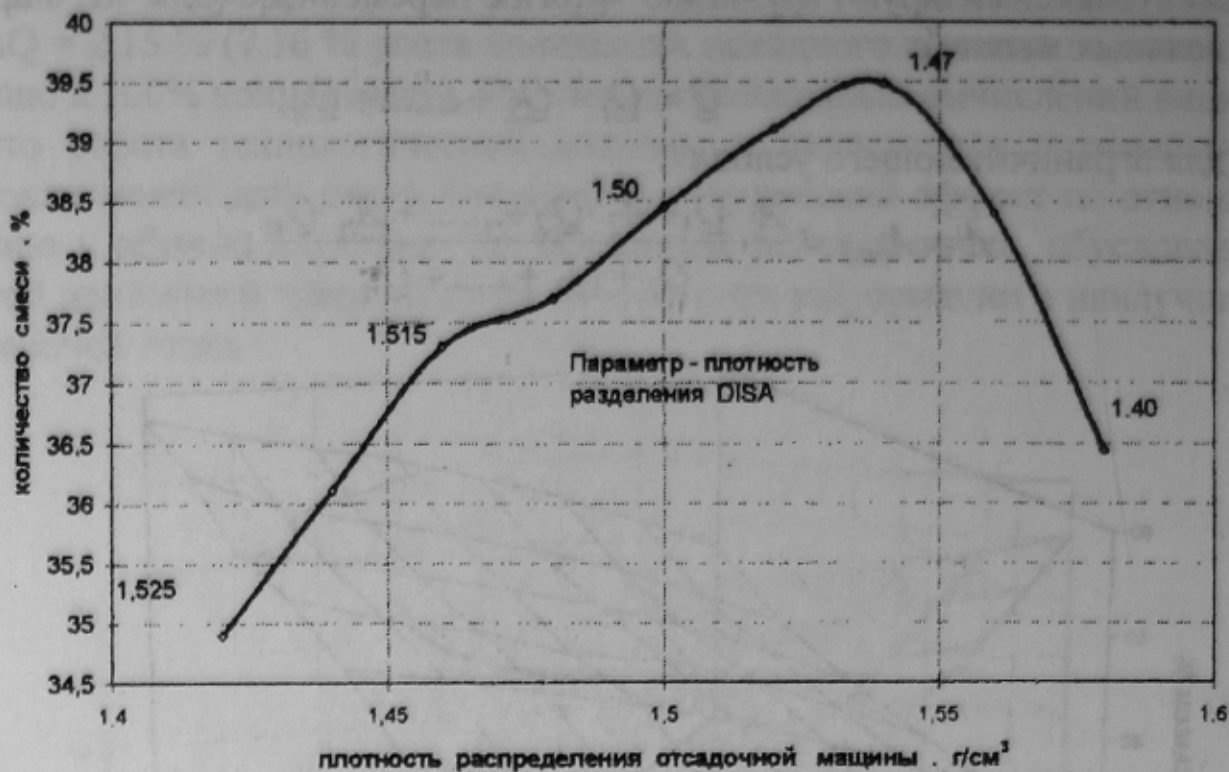


Рисунок 7 – Залежність кількості кінцевого продукту Q от (при мерно) щільності розподілу отсадочної машини p_2 ,
 p_1 - параметр щільності розподілу сепаратора Disa

Виконання диференціювання в рівненні (8) дає наступну залежність:

$$1 + \lambda \frac{\partial (A_i Q_i)}{\partial Q_i} = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

С рівнення (9) непрямоствено створюється умова, для яког о отримується максимальна кількість продукту з заданою зольністю $A = A_{зад}$:

$$\frac{\partial (A_1 Q_1)}{\partial Q_1} = \frac{\partial (A_2 Q_2)}{\partial Q_2} = \dots = \frac{\partial (A_n Q_n)}{\partial Q_n}; \quad (10)$$

Умова (10) означає, що максимальна кількість кінцевого продукту Q з заданою зольністю $A = A_{зад}$ отримується для щільностей розподілу, обраних при умові, щоб обогачення відбувалося при тих же нахилах характеристик $A_1 Q_1 = f(Q_1)$, $A_2 Q_2 = f(Q_2)$, ... $A_n Q_n = f(Q_n)$.

Умова (10) зводиться, як легко довести для ідеальних сепараторів з прямокутною кривою розподілу, до умови обогачення вугілля в паралельно працюючих сепараторах при тих же «золах розподілу» «а» щільносно – золових фракцій:

$$a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_n; \quad (11)$$

Для идентичных зависимостей зольности в плотностной фракции от их плотности $a_1 = f(p_1)$ условие (11) сводится к обогащению углей для тех же плотностей разделения:

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_n \quad (12)$$

Для реальных сепараторов следует применять условие (10), при котором получают оптимальные значения плотности разделения $p_1^{\text{опт}}$ и $p_2^{\text{опт}}$ (обычно существенным образом отличающиеся друг от друга), максимизирующие количество продукта Q . Указанные формулы можно применять для составления алгоритмов поиска оптимальных плотностей разделения, максимизирующих количество концентрата с заданной зольностью.

Практически реализуемая система автоматического уравнения, в которой ищется оптимальная рабочая точка системы, представлено на рис. 8. Зольность в конечном продукте измеряется при помощи радиометрического золомера, а расход концентрата - конвейерными весами. Сигналы от этих измерительных приборов направляют на вход контроллера, где реализуется алгоритм поиска оптимальных плотностей разделения. Сигналы выхода контроллера направляют к системам локальной автоматики сепаратора DISA и отсадочной машины как сигналы, корректирующие текущие значения плотностей разделения. Блок-схема алгоритма поиска оптимальной рабочей точки - максимум выхода концентрата с заданной зольностью $A_{\text{зад}}$ - представлена на рис. 9. Это один из вариантов алгоритма Rosenbrock'а, в котором для каждого шага, изменяющего p_1 , наступает подбор шага p_2 , удовлетворяющего уравнению $A = A_{\text{зад}}$. Направление изменений p_1 совершается автоматически, а прекращение поиска соответствующей пары $p_1^{\text{опт}}$ и $p_2^{\text{опт}}$ наступает при выполнении условия $|\Delta Q| < \epsilon$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Производство концентратов энергетического или коксового углей реализуется часто в параллельной системе обогатительных машин, работающих в тяжелых жидкостях, отсадочных машин и флотации. В такой системе существует оптимальная рабочая точка (глобальный экстремум) для которой получается оптимальное количество конечного концентрата с заданной зольностью. Рост количества концентрата, получаемого в точке экстремума, по отношению к реальным способам ведения технологической системы может составлять 3 - 8 % выхода концентрата. Следовательно, существует возможность существенного повышения

количества продукции с заданным качеством (ценой), обосновывающая практическую реализацию рассматриваемой системы управления.

Модель объекта

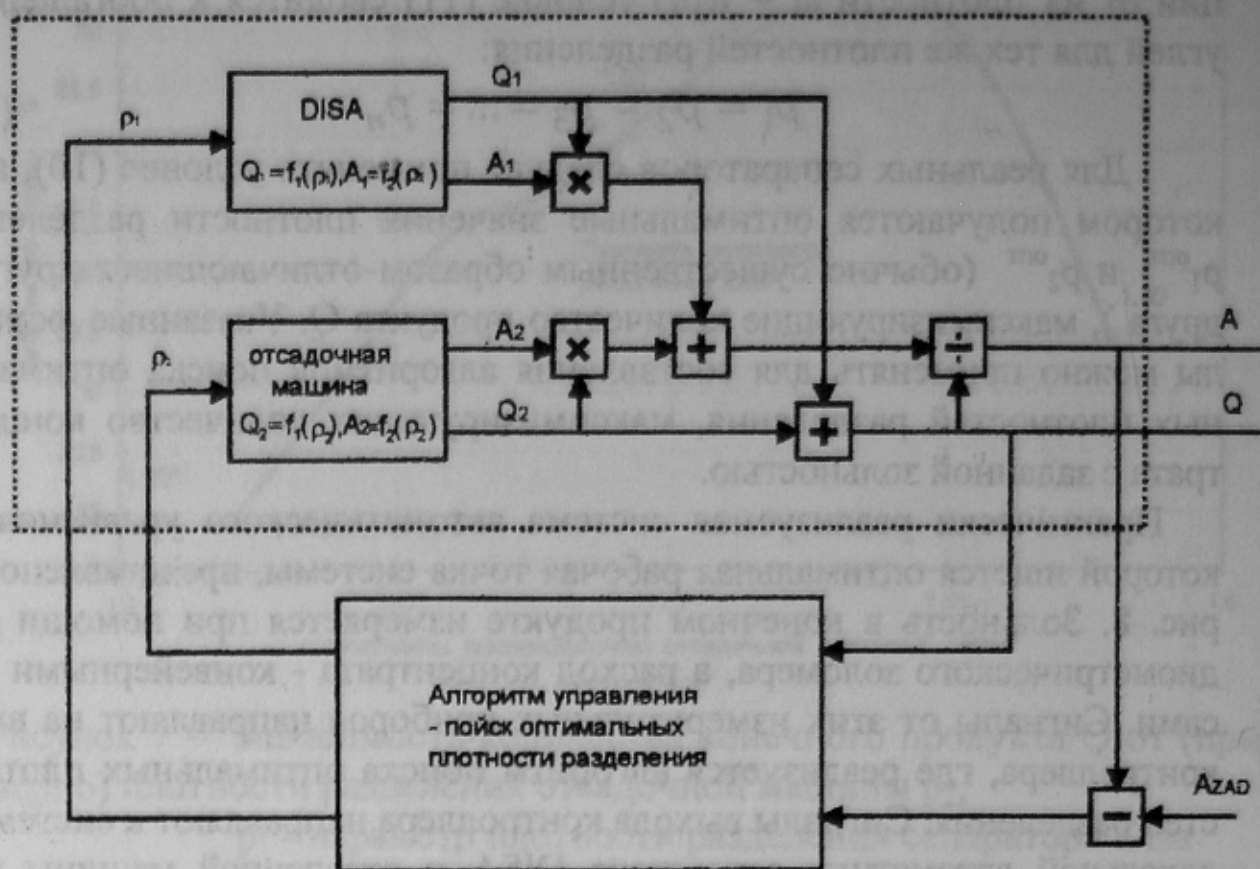


Рисунок 8 – Блок-схема системы управления с поиском оптимальной рабочей точки максимального количества конечного продукта с заданной зольностью

Системы управления, максимизирующие количество концентрата с заданным качеством, используют алгоритмы поиска оптимальной рабочей точки через изменения шагов плотности в параллельных процессах обогащения угля в тяжёлых жидкостях, отсадочных машинах и в процессе флотации.

В отсадочных машинах и в процессе флотации можно говорить лишь об опосредованном влиянии на изменения плотности разделения через, например, изменение установления положения поплавка, соединенного с системой выгрузки нижнего продукта из отсадочной машины, или количества флотореагентов и уровня пены (пульпы в процессе флотации). Это не изменяет концепции управления в рассматриваемой системе.

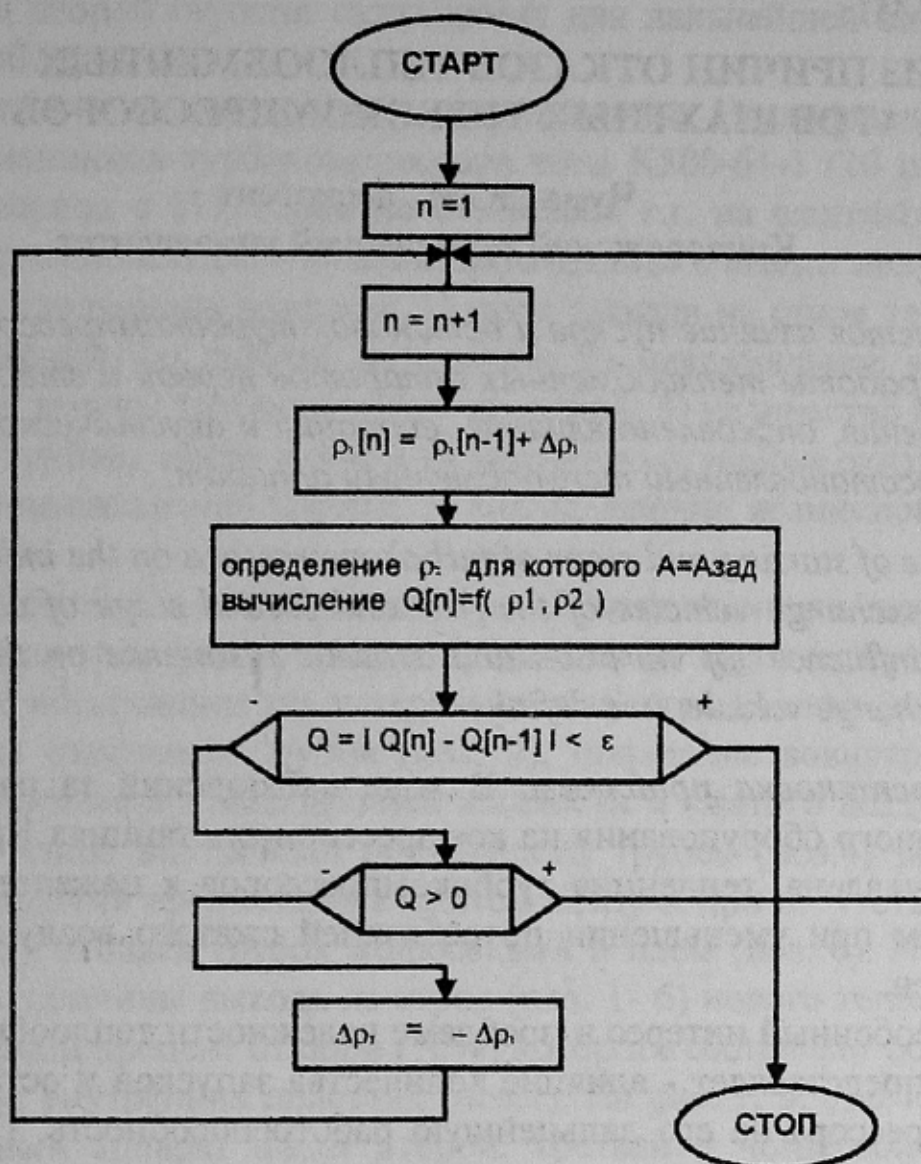


Рисунок 9 – Алгоритм поиска оптимальной рабочей точки системы управления.

Список источников.

1. Циерпиш С.: Максимализация производства в системах обогащения и образования угольных смесей. Архив горного дела, том 25, тетрадь 1, 1980.
2. Циерпиш С. : Оптимализация процессов переработки угля с применением компьютерного моделирования. Научные тетради Силезского политехнического института, тетрадь 231, Гливице, 1996.
3. Циерпиш С. , Пелот Й. : Анализ процессов переработки угля с применением компьютерного моделирования. M1AG нр 12 (317), декабрь 1996 (стр. 24 – 31)
4. Циерпиш С. : Помехи в системах управления производством угольных смесей. M1AG нр 3 (320), март 1997 (стр. 28 - 33).
5. Циерпиш С. Пелот Й.: Метод определения оптимальных значения параметров разделения в обогатительных процессах. M1AG нр 6 (323), июнь 1997.