

Л.А. Антипенко

МЕТОД ИСПЫТАНИЙ ПЕННОЙ ФЛОТАЦИЕЙ УГЛЯ

Для проектирования флотационных отделений обогатительных фабрик необходима общая методика определения исходных данных флотуемости угля.

Предложена механическая лабораторная машина с различными по объему флотационными камерами для проведения исследований проб угля, которые являются питанием флотации. Машина обеспечивает непрерывное удаление пены механическим способом, а так же оснащена автоматическим устройством подачи воздуха (ротаметр), регулировкой окружной скоростью, контролем уровня жидкости. Приведены кинетические характеристики флотации для оценки времени флотации в лабораторной машине периодического действия в сравнении с теоретической флотуемостью шламов с реально достижимой. Методы статистического планирования экспериментов основаны на одновременном изменении многих факторов, причем планы экспериментов допускают такую последующую статистическую обработку данных, которая позволяет выделить влияние каждого отдельного фактора и их совокупности на изменение выходных параметров процесса. Статистический метод определения флотуемости позволяет выдать оптимальный режим флотации угольных шламов с высокой точностью.

Ключевые слова: флотуемость угля, обогатительные фабрики, пенная флотация, шламы, реагенты.

Рост угледобычи за счет широкого внедрения комплексной механизации выемки и доставки углей сопровождается увеличением содержания в них мелких классов и, как следствие, расширением применения флотации.

Для проектирования флотационных отделений обогатительных фабрик необходима общая методика определения исходных данных флотуемости угля. Флотационная активность углей зависит от структурно-вещественного состава (химического и петрографического состава, стадии метаморфизма, состава и дисперсности минеральных примесей, степени окисленности, гранулометрического состава). Поэтому, прежде всего, необходимо провести исследования пробы угля, которая является питанием флотации. Далее – выбор реагентов и определение оптимального реагентного режима проведения процесса, определение теоретического предела флотуемости угольного шлама по методу флотационного фракционирования. Снятие кинетических характеристик флотации для оценки времени флотации в лабораторной машине периодического действия и сравнение теоретической флотуемости шламов с реально достижимой.

В результате проведенных исследований должны быть предложены: реагенты, их удельный расход, рекомендуемая схема флотации. Методика предусматривает исследование флотуемости шлама в лабораторных условиях.

В практике обогащения углей шламом называют мелкий уголь, получаемый в результате мокрого обогащения.

Технологической границей, определяющей верхний предел крупности шламов, является граница эффективного обогащения угля отсадкой, в спиральных сепараторах и флотацией. Этот размер, как показывает практика работы

углеобогащительных фабрик, равен 0,3–0,5 мм. Поэтому к угольному шламу следует относить частицы, крупность которых менее 0,5 мм. Содержание класса 0–0,05 мм в добываемых углях достигает 25–35%. Частицы шлама крупнее 0,5 мм хорошо осаждаются и не вызывают трудностей при его обработке.

В соответствии со стандартом ASTM D 5114-90 (2010) для пенной флотации предлагается лабораторная флотационная машина объемом 2–6 л (рис. 1), которая должна обеспечивать непрерывное удаление пены механическим методом и оснащена автоматическим устройством контроля уровня жидкости. Скорость вращения должна составлять 30 об/мин. Уровень пульпы в камере флотационной машины поддерживают на уровне, используя небольшую емкость с переливом, расположенной на требуемом уровне пульпы.

Используется классический метод планирования экспериментов. Недостатком этой машины является отсутствие возможности повторения цикла

обогащения подпенного слоя, отсутствие ротаметров подачи воздуха, из-за чего невозможно проводить кондиционирование пульпы без воздуха.

По результатам опытов невозможно определить оптимальный режим флотации. Результаты флотационного метода не отражают флотационные характеристики угля в условиях обогащительных фабрики.

Нами предлагается механическая лабораторная машина (рис. 2) с различными по объему флотационными камерами.

Лабораторная флотационная машина объемом 1–3 л (рис. 2) должна обеспечивать непрерывное удаление пены механическим способом, а так же быть оснащена автоматическим устройством подачи воздуха (ротаметр), регулировки окружной скоростью, контроля уровня жидкости. В зависимости от применяемой камеры используют соответствующие импеллеры и статоры.

Основными рабочими органами машины являются: камера, шпичкастен, блок импеллера, пеногон, ротаметр.

Блок импеллера и пеногона смонтированы на корпусе, внутри которого расположены двигатель привода импеллера, привод пеногона, элементы электрической части машины. Верхняя часть корпуса закрыта крышкой, под которой рас-

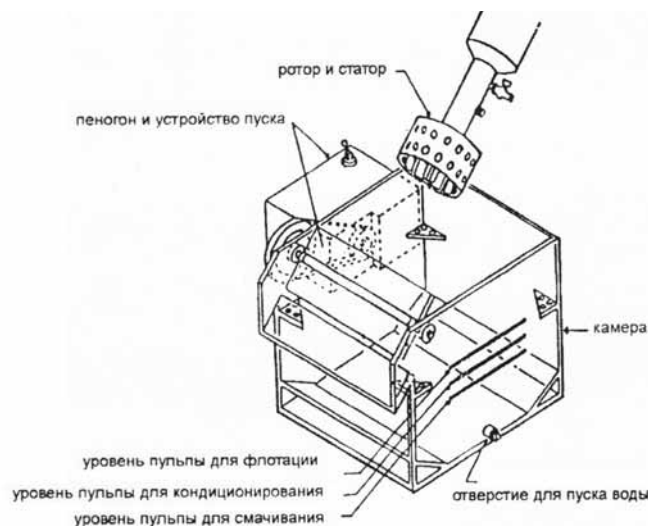


Рис. 1. Типовое исполнение механической лабораторной флотационной машины

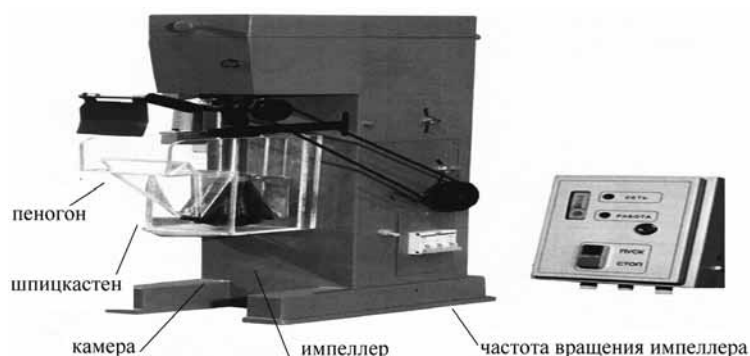


Рис. 2. Лабораторная флотационная машина

полагается привод импеллера. Камера устанавливается на корпус при помощи направляющего устройства и фиксируется поворотным столиком.

Флотационная машина является устройством периодического действия.

Материал, предназначенный для флотации, загружается в виде пульпы. Возможна (допускается) загрузка сухого угля в заполненную водой камеру машины. При вращении импеллера происходит интенсивное перемешивание без подачи воздуха. Затем подаются флотационные реагенты. Задается время кондиционирования пульпы с реагентами, после чего через ротаметр подается в камеру воздух. Регулировка количества подаваемого воздуха осуществляется вентилем ротаметра.

Всплывший пенный продукт удаляется из камеры пеногоном. Наличие в камере шпикастена (переднего кармана) с отверстием, позволяет вернуть в зону импеллера случайно занесенные в пенный продукт частицы, что повышает качество флотации.

В зависимости от свойств и количества перерабатываемого материала подбирают основные регулируемые параметры: частота вращения импеллера и количество подаваемого на флотацию воздуха (см. табл. 1).

Для камер емкостью 3 л применяют импеллер диаметром 70 мм; для камер емкостью 1,5–1,0 л и 0,75–0,5 л применяют соответственно импеллеры диаметром 58 и 45 мм. Обороты в зависимости от диаметра импеллера можно

Таблица 1

| Техническая характеристика | Величина |
|---|-------------------|
| Вместимость камеры, л | 1 |
| Диаметр импеллера, мм | 55 |
| Частота вращения, с ⁻¹ | от 26 до 46 |
| Количество воздуха, засасываемого импеллером при наибольшей частоте вращения, л/с | не менее 0,05 |
| Номинальная установленная мощность сети, В | 380 |
| Габаритные размеры, мм: длина ширина высота | 430 290 650 |
| Масса, кг | 26 |

плавно регулировать в пределах от 180 до 3600 об/мин., что соответствует следующим окружным скоростям: для диаметра 70 мм – 0,66–13,2 м/с, для диаметра 58 мм – 0,55–11,0 м/с, для диаметра 45 мм – 0,42–8,5 м/с.

Окружная скорость не должна превышать более 9 м/с. Подачу воздуха в камеры регулируют двумя ротаметрами. Малый расход воздуха от 0,1 до 1 л/мин регулируют одним ротаметром, а больший расход от 0,66 до 4,1 л/мин другим ротаметром.

В процессе обогащения угольных шламов используются аполярные реагенты (собиратели) и гетерополярные реагенты (пенообразователи).

Реагенты для флотации угольных шламов должны соответствовать техническим условиям или стандартам и иметь гигиенические сертификаты.

Основными показателями реагентов, определяющих их применение для угольной флотации, являются:

- флотационная активность реагента, обусловленная физико-химической характеристикой продукта – вязкость, плотность, молекулярный вес, растворимость в воде и органических растворителях, поверхностное натяжение, агрегатное состояние;
- удобства в эксплуатации – пожароопасность, коррозирующее действие, летучесть (давление паров над жидкостью, цвет и запах, токсичность);
- стабильность состава продукта при изготовлении и длительном хранении в условиях обогатительной фабрики;
- транспортабельность и удобство хранения.

Происхождение, содержание влаги, изменения исходной влаги и поверхностных свойств оказывают существенное влияние на флотационные характеристики угля. Все пробы, подвергаемые испытанию, должны храниться и транспортироваться так, чтобы свести к минимуму возможные изменения поверхностных свойств. Для испытания следует использовать представительные пробы материала.

Испытания выполняют в однолитровой флотомашине, на водопроводной воде, материал – шлам, полученный путем имитации в зависимости от свойств флотируемости, предварительно замачивается на 2, 5, 10, 15 и 30 мин; в течение одного часа для более – труднофлотируемых

Для определения флотируемости шламов проводят опыты дробной флотации. Опыт дробной флотации позволяет выявить возможности по качеству продуктов при флотации, определить расходы реагента собирателя и вспенивателя.

Пульпу, перенесенную в камеру, перемешивают в течение 1 мин. После чего подается первая доза собирателя. Пульпа с собирателем тщательно перемешивается в течение 45 с и затем добавляется пенообразователь. Кондиционирование продолжается еще 15 с и затем включается подача воздуха. Съем продукта производится каждую минуту в отдельные емкости. Реагенты подают в натуральном виде каплями; реагент – собиратель подается по капле каждую минуту, а реагент – вспениватель через 1 мин. После добавки следующей порции реагентов пульпу кондиционируют 10–15 с и снова включают подачу воздуха. Периодическая подача реагента и съем концентрата производится до полного прекращения образования пены. Стенки камеры постоянно омываются водой при помощи груши. Уровень пульпы на всех стадиях, кроме окончательной, поддерживается достаточно высоким для облегчения съема пены, но пульпа ни в коем случае не должна переливаться.

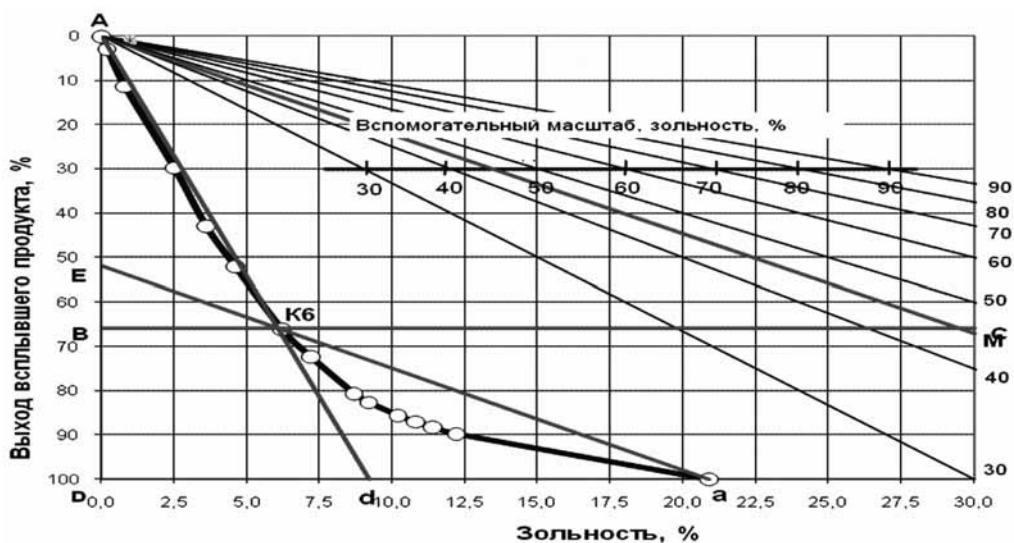


Рис. 3. Кривая флотиремости

Продукты флотации высушивают, взвешивают, считают выход продукта каждой минуты, определяют его зольность и по результатам строится кривая флотиремости (рис. 3).

Теоретический предел флотиремости угольной пробы определяется методом флотационного фракционирования.

Флотационное фракционирование – метод разделения угольного шлама на ряд фракций путем проведения селективной флотации при определенных условиях.

При анализе флотиремости процесс состоит из нескольких последовательных стадий:

- основная флотация – обычный флотационный опыт с использованием дробной подачи реагентов; задача – максимальное извлечение всего флотирующегося материала;
- перечистная флотация 2–3 раза перечистка пенного продукта; задача – отделить все механически увлеченные минеральные примеси в отходы;
- фракционирование – разделение концентрата перечистой операции на отдельные фракции при различном числе оборотов импеллера без подачи воздуха.

Количество флотационных реагентов рассчитывается на основе значений $S_{\text{ср}}$ и $P_{\text{ср}}$, где $S_{\text{ср}}$ – среднее количество собирателя, необходимое для обычного флотационного опыта с данным угольным шламом (в граммах на тонну угля); $P_{\text{ср}}$ – средняя концентрация пенообразователя в мг/л флотационной пульпы. $S_{\text{ср}}$ и $P_{\text{ср}}$ определяют на основе эмпирических данных или предварительных опытов. Условия проведения флотационного фракционирования и полученные результаты оформляются в виде графика кривой предельной флотиремости исследуемого угля (рис. 4).

Определение оптимального режима флотации. Существует два метода планирования эксперимента: классический и статистический. При классическом методе поочередно изменяется каждый фактор до определенного частного максимума при постоянном значении всех прочих факторов.

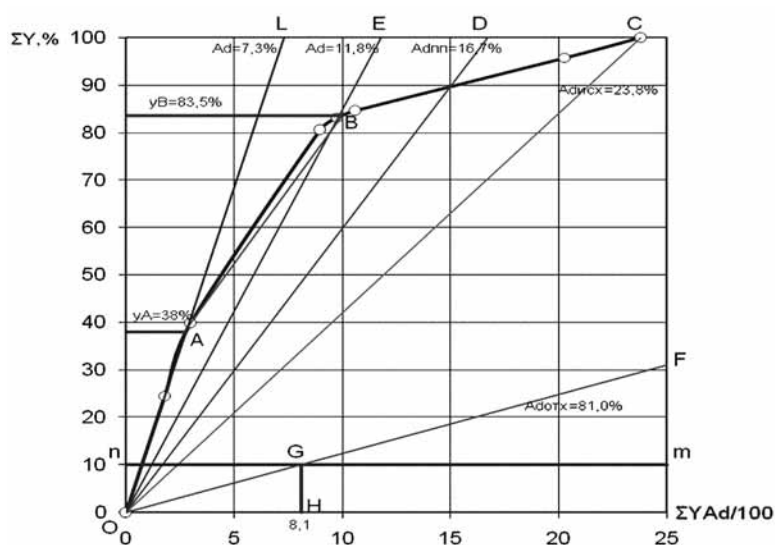


Рис. 4. Кривая предельной флотуемости шламов

Методы статистического планирования эксперимента основаны на одновременном изменении факторов. При этом статистическая обработка позволяет выделить влияние каждого отдельного фактора и их совокупности на изменение показателей процесса.

При исследовании методом крутого восхождения (метод Бокса-Уилсона) возможно применение полного факторного эксперимента, когда реализуются все возможные комбинации уровней переменных факторов.

По классической методике в опытах по уточнению оптимальных расходов реагентов, обладающих собирательными свойствами, сразу подают в один прием при расходах 100, 300, 500, 700, 900, 1100, 1300, 1500 и до 2000 г/т. Если результаты флотации не изменяются или ухудшаются при увеличении расхода реагента, опыты прекращают. В случае необходимости опыты ставят при промежуточных расходах реагента (200, 400, 600 г/т и т.д.). Определяют оптимальный расход собирателя. Определение оптимального расхода реагента вспенивателя производится на оптимальном расходе собирателя. Для этого ставят опыты на различных расходах вспенивателя (25, 50, 75, 100, 150, 200 г/т и т.д.).

Съем концентрата в зависимости от полученных результатов производят в отдельные приемники через 1,2,3,4,5 мин. и соответственно обозначаются: «концентрат I», «концентрат II» и т.д., а также съем всей пены – концентрат «общий» за все время флотации.

При установленном оптимальном расходе реагентов и способе загрузки их постановкой специальных серий опытов уточняют и все остальные условия флотации: время агитации с собирателем, плотность пульпы.

Методы статистического планирования экспериментов основаны на одновременном изменении многих факторов, причем планы экспериментов допускают такую последующую статистическую обработку данных, которая позволяет выделить влияние каждого отдельного фактора и их совокупности на изменение выходных параметров процесса.

Информация в процессе представляется уравнением регрессии.

Статистика позволяет оценить надежность полученных данных, вычислить доверительные интервалы отдельных опытов, экстремальных точек и коэффициентов уравнений.

Выбор преобладающих факторов и оценка их значимости по коэффициентам регрессии линейной модели позволяет спланировать последующие эксперименты для достижения оптимальной области кратчайшим путем.

Например, по методу крутого восхождения для всех проб принимается несколько переменных факторов:

- плотность пульпы, кг/м³ (X_1);
- расход собирателя, кг/т (X_2);
- расход вспенивателя, кг/т (X_3) и время флотации, мин (X_4) и т.д.;
- время кондиционирования пульпы с собирателем, мин;
- количество опытов, определяемое как $n = 2K$, где K – число переменных факторов, для четырех переменных $n = 24 = 16$.

За критерий оптимизации приняты или извлечение горючей массы в концентрат, или зольность концентрата, или зольность отходов.

В табл. 2 приведены значения нулевой точки и интервалов варьирования факторов при определении оптимального режима флотации шлама.

Для определения ошибки воспроизводимости опыты производятся на основном уровне, результаты которых приведены в табл. 3.

Ошибка воспроизводимости определяется по формуле:

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y} - Y_i)^2}{n - 1}},$$

Таблица 2

Интервалы варьирования факторов

| Показатели | Переменные факторы | | | |
|--------------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| | Содержание твердого в пульпе, кг/м ³ , X_1 | Расход собирателя, кг/т, X_2 | Расход вспенивателя, кг/т, X_3 | Время флотации, мин, X_4 |
| Основной уровень ($X_i = 0$) | 100 | 1,500 | 0,300 | 4 |
| Интервал варьирования (ΔX) | 20 | 0,200 | 0,100 | 1 |
| Верхний уровень ($X_i = +1$) | 120 | 1,700 | 0,400 | 5 |
| Нижний уровень ($X_i = -1$) | 80 | 1,300 | 0,200 | 3 |

Таблица 3

Опыты на основном уровне

| № опыта | Переменные факторы | | | | Функции отклика | | | | |
|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|-------------|-------------|----------------|-----------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | A^d_K | $A^d_{отх}$ | $A^d_{исх}$ | $\gamma_K, \%$ | $E_{гор}$ |
| 1 | 100 | 1,500 | 0,300 | 4 | 13,0 | 47,5 | 21,7 | 74,7 | 83,0 |
| 2 | 100 | 1,500 | 0,300 | 4 | 13,4 | 43,8 | 22,1 | 71,3 | 79,3 |
| 3 | 100 | 1,500 | 0,300 | 4 | 13,0 | 49,8 | 22,1 | 74,8 | 83,5 |
| 4 | 100 | 1,500 | 0,300 | 4 | 12,8 | 47,8 | 22,0 | 73,7 | 82,4 |
| Среднее значение | | | | | 13,1 | 47,1 | | 73,6 | 82,0 |

где \bar{Y} – среднее значение извлечения горючей массы в концентрат по основному уровню; Y_i – каждое значение извлечения горючей массы в концентрат; n – количество опытов в основном уровне.

$$\bar{Y} = (83,0 + 79,3 + 83,5 + 82,4)/4 = 82,0$$

$$1) (\bar{Y} - Y_1)^2 = (82 - 83)^2 = 1,0$$

$$2) (\bar{Y} - Y_2)^2 = 7,29$$

$$3) (\bar{Y} - Y_3)^2 = 2,25$$

$$4) (\bar{Y} - Y_4)^2 = 0,16$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{1,0 + 7,29 + 2,25 + 0,16}{4 - 1}} = 1,89$$

$$S_{\text{ВОСПР.}}^2 = \frac{\sum (\bar{Y} - Y_i)^2}{n - 1} - \text{дисперсия воспроизводимости, } S_{\text{ВОСПР.}}^2 = 3,57.$$

Определение ошибки воспроизводимости по параметру оптимизации:

выход концентрата: $\bar{Y} = 73,6\%$;

$$(\bar{Y} - Y_1)^2 = 1,21;$$

$$(\bar{Y} - Y_2)^2 = 5,29;$$

Таблица 4

Матрица планирования и результаты опытов

| № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 | Y_5 |
|---------|-------|-------|--------|-------|---------|---------------------|---------------------|----------------|------------------|
| | | | | | A_k^d | $A_{\text{отх.}}^d$ | $A_{\text{исх.}}^d$ | $\gamma_k, \%$ | $E_{\text{топ}}$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | - | - | - | - | 11,9 | 24,7 | 22,0 | 21,1 | 23,83 |
| 2 | + | - | - | - | 11,4 | 26,2 | 22,4 | 26,0 | 29,69 |
| 3 | - | + | - | - | 9,9 | 28,7 | 22,1 | 35,2 | 40,71 |
| 4 | + | + | - | - | 11,2 | 35,0 | 22,0 | 54,7 | 62,27 |
| 5 | - | - | + | - | 12,0 | 45,1 | 22,9 | 67,2 | 76,70 |
| 6 | + | - | + | - | 13,5 | 51,4 | 21,6 | 78,5 | 86,60 |
| 7 | - | + | + | - | 12,6 | 54,5 | 21,7 | 78,3 | 87,40 |
| 8 | + | + | + | - | 13,5 | 56,4 | 21,8 | 80,6 | 89,15 |
| 9 | - | - | - | + | 10,4 | 27,9 | 21,5 | 36,4 | 41,54 |
| 10 | + | - | - | + | 12,1 | 26,6 | 22,3 | 29,8 | 33,71 |
| 11 | - | + | - | + | 11,4 | 29,0 | 22,0 | 40,0 | 45,43 |
| 12 | + | + | - | + | 11,8 | 37,3 | 22,1 | 59,7 | 67,60 |
| 13 | - | - | + | + | 12,2 | 44,9 | 22,2 | 69,4 | 78,30 |
| 14 | + | - | + | + | 14,1 | 55,3 | 22,2 | 80,4 | 88,80 |
| 15 | - | + | + | + | 12,9 | 48,6 | 22,5 | 73,1 | 82,15 |
| 16 | + | + | + | + | 14,7 | 63,4 | 23,6 | 81,7 | 91,20 |
| | b_1 | b_2 | b_3 | b_4 | | | | | |
| среднее | +4,56 | +6,67 | +20,97 | +2,02 | | | | $b_0 = 64,07$ | |
| среднее | +4,42 | +5,91 | +19,14 | +1,81 | | | | $b_0 = 57,01$ | |

$$(\bar{Y} - Y_3)^2 = 1,99;$$

$$(\bar{Y} - Y_4)^2 = 0,01;$$

$$\sigma_Y = \sqrt{2,65} = 1,63;$$

$$S_{\text{ВОСПР.}}^2 = 2,65$$

В табл. 4 приведена матрица планирования и результаты опытов флотации. Коэффициенты регрессии вычисляются по формуле:

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} Y_{ij},$$

где: b_j – коэффициент регрессии j -ой колонки матрицы; I – номер опыта; n – количество опытов в матрице; Y_i – результат параметра оптимизации в I -ом опыте; X_{ij} – условная безразмерная переменная j -той колонки I -го опыта (элементы матрицы планирования +1 или -1).

Уравнение регрессии имеет вид:

$$Y_5 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4$$

$$Y_5 = 64,07 + 4,56x_1 + 6,67x_2 + 20,97x_3 + 2,02x_4$$

Проверяется значимость коэффициентов регрессии. Коэффициенты значимы, если выполняется условие:

$$b_i \geq \frac{t \cdot \sigma_Y}{\sqrt{N}},$$

где t – коэффициент Стьюдента; σ_Y – ошибка воспроизводимости; N – число опытов в матрице.

При доверительной вероятности 0,95 число степеней свободы $f = n - 1 = 4 - 1 = 3$, где n – число опытов в основном уровне.

При данном числе степеней свободы и доверительной вероятности (см. Приложение 1) определяют коэффициент Стьюдента $t = 3,182$. Таким образом, коэффициенты значимы, если

$$b_i \geq \frac{3,182 \cdot 1,89}{\sqrt{16}} = 1,50,$$

а так как $b_1 = 4,56 \geq 1,50$; $b_2 = 6,67 \geq 1,50$; $b_3 = 20,97 \geq 1,50$; $b_4 = 2,02 \geq 1,50$, то все коэффициенты уравнения значимы.

Проверка адекватности модели по критерию Фишера определяется по формуле:

$$F = \frac{S_{\text{ОСТ.}}^2}{S_{\text{ВОСПР.}}^2}$$

где $S_{\text{ОСТ.}}^2$ – остаточная дисперсия, которая равна

$$S_{\text{ОСТ.}}^2 = \frac{(E_{\text{ГОР1}} - y_1)^2 + (E_{\text{ГОР2}} - y_2)^2 + \dots + (E_{\text{ГОРl}} - y_l)^2}{N - (K + 1)},$$

где N – число опытов в матрице; K – число переменных факторов; $E_{\text{ГОРl}}$ – извлечение горючей массы в концентрат для l -го опыта.

$$S_{\text{ОСТ.}}^2 = 64,60,$$

Расчетное значение критерия Фишера: $F_{\text{расч.}} = \frac{64,60}{3,57} = 18,1$.

Модель адекватна, если $F_{\text{расч.}} \geq F_{\text{табл.}}$.

Критерий Фишера F табличный определяется (см. Приложения 2) по значениям f_1 и f_2 :

$f_2 = N - (f + 1)$, где f – число переменных факторов.

$f_1 = 4$; $f_2 = 16 - (4 + 1) = 11$, $F_{\text{табл.}} = 3,36 \geq F_{\text{расч.}}$.

Следовательно, функция «у» линейна и модель адекватна, возможно движение по градиенту. Возможен поиск оптимального режима. Таким образом уравнение регрессии будет:

$$Y_5 = 64,07 + 4,56x_1 + 6,67x_2 + 20,97x_3 + 2,02x_4$$

Дисперсии: воспроизводимости – 3,57; коэффициентов регрессии – 1,50; адекватности – 64,60; Критерий Фишера расчетный – 18,1.

Уравнение регрессии по параметру оптимизации выход концентрата при флотации сгущенного продукта радиального сгустителя имеет вид:

$$Y_4 = 57,01 + 4,42x_1 + 5,91x_2 + 19,14x_3 + 1,81x_4$$

$$b_i \geq \frac{3,182 \cdot 1,63}{\sqrt{16}} = 1,30$$

Все коэффициенты уравнения регрессии значимы. Проверку адекватности модели определяем так же по критерию Фишера. Остаточная дисперсия по выходу концентрата $S_{\text{ост}}^2 = 67,74$; $F_{\text{расч.}} = 67,74/2,65 = 25,56$; $F_{\text{расч.}} \geq F_{\text{табл.}}$. Модель адекватна, возможно движение по градиенту Y_4 .

Движение по градиенту Y_5 приведено в табл. 4.

За оптимальный расход реагента принимают расход, при котором получены наилучшие технологические результаты (зольность продуктов флотации, выход концентрата). В оптимальных условиях флотации ставят 3–5 опытов.

Таблица 4

Движение по градиенту для Y_5 ($E_{\text{гор.}}$)

| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | $Y_1, A_{\text{к}}^d$ | $Y_2, A_{\text{отк.}}^d$ | $Y_3, A_{\text{исх.}}^d$ | $Y_4, \%$ | $Y_5, E_{\text{гор.}}$ |
|---|-------|-------|--------|-------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|------------------------|
| Коэффициенты регрессии: | | | | | | | | | |
| b_i | +4,56 | +6,67 | +20,97 | +2,02 | | | | | |
| $b_i \cdot \Delta X$ | 91,2 | 1,334 | 2,097 | 2,02 | | | | | |
| Шаг, соответствующий изменению x в 20 раз | 4,6 | 0,067 | 0,105 | 0,1 | | | | | |
| Округление | 5 | 0,067 | 0,105 | – | | | | | |
| Исходный уровень | 100 | 1,500 | 0,300 | 4 | | | | | |
| № опыта: 1 | 105 | 1,567 | 0,405 | 4 | 14,9 | 51,1 | 21,7 | 81,2 | 88,25 |
| 2 | 110 | 1,634 | 0,510 | 4 | 14,9 | 56,6 | 22,1 | 82,6 | 90,23 |
| 3 | 115 | 1,701 | 0,615 | 4 | 15,6 | 59,0 | 21,3 | 86,9 | 93,19 |
| 4 | 120 | 1,768 | 0,720 | 4 | 16,4 | 60,4 | 21,8 | 87,8 | 93,86 |
| 5 | 125 | 1,835 | 0,825 | 4 | 17,0 | 63,6 | 22,9 | 87,3 | 98,51 |

При контроле работы обогатительных фабрик, а также при лабораторных испытаниях необходимо ввести оценку эффективности операций обогащения. Из числа существующих оценок, некоторые из них получили широкое распространение:

1. Точную научную оценку эффективности обогащения дает так называемый индекс селективности, определяемый по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{E_K^r \cdot E_{OTX}^3}{E_{OTX}^r \cdot E_K^3}},$$

где E_K^r – извлечение горючей массы в концентрат; E_{OTX}^r – извлечение горючей массы в отходы; E_K^3 – извлечение золы в концентрат; E_{OTX}^3 – извлечение золы в отходы.

Физический смысл: чем больше горючей массы извлекается и чем меньше отходов остается в концентрате, тем дробь E_K^r / E_{OTX}^r больше. Чем больше золы извлекается в отходах и чем меньше ее остается в концентрате, тем больше дробь E_{OTX}^3 / E_K^3 .

Эффективность процесса обогащения тем выше, чем больше селективность, являющейся среднеарифметической из этих двух величин.

2. Для оценки селективности процесса флотации профессором К.Ф. Белоглазовым предложен коэффициент селективности, определяемый по формуле:

$$S = \frac{\lg \frac{1}{1 - E_1}}{\lg \frac{1}{1 - E_2}}$$

где E_1 и E_2 – извлечение соответствующих минералов в концентрат за некоторое время (мин).

В применении к углю E_1 и E_2 – соответственно извлечение в концентрат горючей массы и золы.

3. Коэффициент селективности Трушлевича $K = \frac{A_{OTX} - A_K}{A_{ИСХ}}$

4. Формула Ханкока-Луйкена:

$$E = \frac{\gamma(A_{П} - A_K)}{(100 - A_{П})A_{П}} \cdot \% \frac{A_{OTX} - A_K}{A_{ИСХ}}$$

где γ – выход концентрата, $A_{П}$ – зольность питания, A_K – зольность концентрата.

5. Коэффициент технологической эффективности определяется по формулам:

$$E = \frac{E_K \cdot E_{OTX}}{100}, \%; \quad E_K = \frac{\gamma(100 - A_K)}{100 - A_{ИСХ}}, \%; \quad E_{OTX} = \frac{\gamma_{OTX}(100 - A_{OTX})}{100 - A_{ИСХ}}, \%$$

Формула Циперовича: $E_{Ц} = \frac{\gamma_K A_{OTX}}{A_K}, \%$

Формула Т.Г. Фоменко: $E = \frac{E_1 E_2}{100}, \%$

где E_1 – извлечение полезной части в концентрат; E_2 – извлечение бесполезной части в отходы.

Формула после подстановки значений E_1 и E_2 имеет вид:

$$E = \frac{\gamma_K(100 - A_K) \cdot (100 - \gamma_K) \cdot A_{\text{ОТХ}}}{100 \cdot (100 - A_{\text{ИСХ}}) \cdot A_{\text{ИСХ}}}, \%$$

б. Энтропийный критерий:

$$E_{\phi} = 1 - \frac{\gamma_K H_K + \gamma_{\text{ОТХ}} H_{\text{ОТХ}}}{H_{\text{ИСХ}}}, \%$$

где H_K – энтропия концентрата; $H_{\text{ОТХ}}$ – энтропия отходов; $H_{\text{ИСХ}}$ – энтропия исходного материала.

Таким образом статистический метод определения флотуемости позволяет выдать оптимальный режим флотации угольных шламов с высокой точностью.

Точность метода определяется Приложениями 1 и 2.

Приложение 1

Критическое значение t – распределения Стьюдента и χ^2 – распределение Пирсона

| № опыта | t – распределение | | χ^2 – распределение | |
|---------|---------------------|------------|--------------------------|------------|
| | $P = 0,05$ | $P = 0,01$ | $P = 0,05$ | $P = 0,01$ |
| 1 | 12,7 | 63,66 | 3,841 | 6,635 |
| 2 | 4,303 | 9,925 | 2,991 | 9,210 |
| 3 | 3,182 | 5,841 | 7,815 | 11,34 |
| 4 | 2,776 | 4,604 | 9,488 | 13,28 |
| 5 | 2,571 | 4,032 | 11,07 | 15,09 |
| 6 | 2,447 | 3,707 | 12,59 | 16,81 |
| 7 | 2,365 | 3,499 | 14,07 | 18,48 |
| 8 | 2,306 | 3,355 | 15,51 | 20,09 |
| 9 | 2,262 | 3,250 | 16,92 | 21,67 |
| 10 | 2,228 | 3,169 | 18,31 | 23,31 |
| 11 | 2,201 | 3,106 | 19,68 | 24,72 |
| 12 | 2,179 | 3,055 | 21,03 | 26,22 |
| 13 | 2,160 | 3,012 | 22,36 | 27,89 |
| 14 | 2,145 | 2,977 | 23,38 | 29,14 |
| 15 | 2,131 | 2,947 | 25,00 | 30,58 |
| 16 | 2,120 | 2,921 | 26,30 | 32,00 |
| 17 | 2,110 | 2,898 | 27,59 | 33,41 |
| 18 | 2,101 | 2,878 | 28,87 | 34,81 |
| 19 | 2,093 | 2,861 | 30,14 | 36,19 |
| 20 | 2,086 | 2,845 | 31,41 | 37,57 |
| 21 | 2,080 | 2,831 | 32,67 | 38,93 |
| 22 | 2,074 | 2,819 | 33,92 | 40,29 |
| 23 | 2,069 | 2,807 | 35,17 | 41,64 |
| 24 | 2,064 | 2,797 | 36,42 | 42,98 |
| 25 | 2,060 | 2,787 | 37,65 | 44,31 |
| 30 | 2,042 | 2,750 | 43,77 | 50,89 |

Приложение 2

**Значение критерия Фишера F при уровне значимости $P = 0,05$
 (f_1 – число степеней свободы для большей дисперсии, f_2 – величина выборки)**

| f2 | f1 | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 30 | 00 |
| 1 | 161 | 200 | 216 | 225 | 230 | 234 | 237 | 239 | 241 | 242 | 244 | 246 | 248 | 250 | 254 |
| 2 | 18,81 | 19,00 | 19,16 | 19,25 | 19,30 | 19,33 | 19,35 | 19,37 | 19,38 | 19,40 | 19,41 | 19,43 | 19,45 | 19,46 | 19,50 |
| 3 | 10,13 | 9,55 | 9,28 | 9,12 | 9,01 | 8,94 | 8,89 | 8,85 | 8,81 | 8,70 | 8,74 | 8,70 | 8,66 | 8,62 | 8,53 |
| 4 | 7,71 | 6,94 | 6,59 | 6,39 | 6,26 | 6,16 | 6,09 | 6,04 | 6,00 | 5,94 | 5,91 | 5,86 | 5,80 | 5,75 | 5,63 |
| 5 | 6,61 | 5,79 | 5,41 | 5,19 | 5,05 | 4,95 | 4,88 | 4,82 | 4,77 | 4,74 | 4,68 | 4,62 | 4,56 | 4,50 | 4,36 |
| 6 | 5,99 | 5,14 | 4,76 | 4,53 | 4,39 | 4,28 | 4,21 | 4,15 | 4,1 | 4,06 | 4,00 | 3,94 | 4,87 | 3,81 | 3,67 |
| 7 | 5,59 | 4,74 | 4,35 | 4,12 | 3,97 | 3,87 | 3,79 | 3,73 | 3,68 | 3,64 | 3,57 | 3,51 | 3,44 | 3,38 | 3,23 |
| 8 | 5,32 | 4,46 | 4,07 | 3,84 | 3,69 | 3,58 | 3,50 | 3,44 | 3,39 | 3,35 | 3,28 | 3,22 | 3,15 | 3,08 | 2,93 |
| 9 | 5,12 | 4,26 | 3,86 | 3,63 | 3,48 | 3,37 | 3,29 | 3,23 | 3,18 | 3,14 | 3,07 | 3,01 | 2,94 | 2,86 | 2,71 |
| 10 | 4,96 | 4,10 | 3,71 | 3,48 | 3,33 | 3,22 | 3,14 | 3,07 | 3,02 | 2,98 | 2,91 | 2,85 | 2,77 | 2,70 | 2,54 |
| 11 | 4,84 | 3,98 | 3,59 | 3,36 | 3,20 | 3,09 | 3,01 | 2,95 | 2,90 | 2,85 | 2,79 | 2,72 | 2,65 | 2,57 | 2,40 |
| 12 | 4,75 | 3,89 | 3,49 | 3,26 | 3,11 | 3,00 | 2,91 | 2,85 | 2,80 | 2,75 | 2,69 | 2,62 | 2,54 | 2,47 | 2,30 |
| 13 | 4,67 | 3,80 | 3,41 | 3,18 | 3,02 | 2,92 | 2,83 | 2,77 | 2,71 | 2,67 | 2,60 | 2,53 | 2,46 | 2,38 | 2,22 |
| 14 | 4,60 | 3,74 | 3,34 | 3,11 | 2,96 | 2,85 | 2,76 | 2,70 | 2,65 | 2,60 | 2,53 | 2,46 | 2,39 | 2,31 | 2,13 |
| 15 | 4,54 | 3,68 | 3,29 | 3,06 | 2,90 | 2,79 | 2,71 | 2,64 | 2,59 | 2,54 | 2,46 | 2,40 | 2,33 | 2,25 | 2,07 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипенко Л.А. Определение оптимального режима флотации методами планирования экспериментов / Обогащение и использование угля. Научные труды, выпуск VI. – Прокопьевск: Кузнииуглеобогашение, 1971. – С. 56–62.
2. Барский Л.А., Рубинштейн Ю.Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1970 – 312 с.
3. Сборник методик по проведению исследований при подготовке исходных данных для технологического проектирования углебогатительных фабрик. – М., 1985. **ИИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Антипенко Лина Александровна – доктор технических наук, профессор, ООО «Сибнииуглеобогашение».

UDC 622.765.063.4

COAL FOAM FLOTATION TEST METHOD

Antipenko L.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, LLC «Sibniugleobogashenie», Russia.

For the design of flotation compartments concentrators required General method of determining the source data of fluoroapatite coal. Proposed mechanical laboratory machine with different amount of flotation cell for studies of coal samples, which is powered flotation. The machine provides continuous removal of the foam by mechanical means, and is equipped with automatic device for air supply (rotameter), the adjustment of the peripheral speed, control of liquid level. Given the kinetic characteristics of flotation to flotation in a laboratory machine of periodic action in comparison with the theoretical floatability slimes with achievable. Methods of statistical planning of experiments based on the simultaneous change of many factors, and the plans of experiments allow such subsequent statistical processing of data, which allows to separate the influence of each factor and their combination on the change of output parameters of the process. A statistical method of determining platirhinos allows you to produce an optimal mode flotation of coal slurries with high accuracy.

Key words: floatability of coal processing plant, froth flotation, sludge, chemicals.

REFERENCES

1. Antipenko L.A. *Obogashchenie i ispol'zovanie uglya. Nauchnye trudy, vypusk VI* (Coal dressing and use. Transactions, issue VI), Prokop'evsk, Kuzniugleobogashchenie, 1971, pp. 56–62.
2. Barskii L.A., Rubinshtein Yu.B. *Kiberneticheskie metody v obogashchenii poleznykh iskopaemykh* (Cybernetic methods in mineral dressing), Moscow, Nedra, 1970, 312 p.
3. *Sbornik metodik po provedeniyu issledovaniy pri podgotovke iskhodnykh dannykh dlya tekhnologicheskogo proektirovaniya ugleobogatitel'nykh fabrik* (Collected procedures on prosecution of research on preparation of input data for production engineering of coal preparation plants), Moscow, 1985.



Ученые, профессора, студенты и издатели, мы представляем единую культурную систему.