

ється достаточно точным по сходимости экспериментальных и расчетных значений. Это позволяет для аппаратов (процессов), которые установлены перед обогащательными операциями обогащения класса -0,5 мм. С учетом данных гранулометрической характеристики, свойств частиц угля и породы, а также значений скоростей их движения в стесненных условиях рассчитываются режимы их работы, при которых обеспечивается не только сгущение но и вывод породного шлама.

Такой подход в проектировании позволяет реализовать индивидуальное обогащение с использованием 10–15 операций. В 3...4 раза сокращаются сроки выполнения проектов технологических схем и в десятки раз их стоимость, а самое важное в технологическом процессе закладываются предпосылки по предотвращению потери угля с отходами. Например, при соответствующей зольности вмещающей породы в исходном угле, зольность отходов ухудшается 2...5%.

© Недолужко В.И., Мочков В.С., Багмут З.В., Анисимов Н.Т., Анисимов В.Н., 2010

*Надійшла до редколегії 18.01.2010 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. А.Д. Полуляхом*

УДК 622.7

**В.Н АНИСИМОВ**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

### **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО ОТНОСИТЕЛЬНО ЕГО РАЗДЕЛЕНИЯ В ОБОГАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Точная математическая формализация процессов, протекающих в аппаратах технологической схемы обогащения возможна при условии учета влияния полного состава известных факторов. Из всего многообразия математических методов для математического моделирования – формализации процессов обогащательной технологии предпочтительно использовать теорию размерностей. Этот метод по сравнению с другими методами формализации позволяет наиболее полно использовать количество параметров процессов, однако оно ограничивается количеством основных расчетных единиц плюс одна. Если некоторые параметры в исходной функциональной зависимости так же формализовать теорией размерностей, то количество неучтенных параметров будет сокращаться.

Существенные затруднения в математической формализации возникают при наличии помех, то есть тех параметров, о действии которых мы ничего не знаем, и определить их не можем. Иногда действие помех определяется косвенно.

В обогащении, к сожалению, адекватная математическая формализация

## **Загальні питання технології збагачення**

развита относительно слабо. Зачастую процессы аппроксимируются математическими выражениями без функциональной модели. Например, эффективность грохочения представляется зависимостью  $E = 1 - \exp(-kt^n)$ , что нельзя признать правильным. В действительности данное выражение продуцирует некоторую линию, а почему она именно такая, от чего зависит ее вид судить невозможно. Выражение включает численный коэффициент  $-k$ , который якобы учитывает действие всех факторов процесса грохочения, но ведь это абсурд, поскольку взаимодействие параметров грохочения выражается определенной функциональной зависимостью, а изменение любого из совокупности параметров грохочения дает иное значение функции.

В основном, в обогащении не репрезентативная адекватность теоретических и практических результатов, процессов, протекающих в аппаратах, компенсируется искусственно параметром, который получил название погрешность разделения. Имеются опытные данные указанного параметра для практически любых процессов, которые используются в расчетах показателей обогащения. Однако, полученные при этом результаты теоретических расчетов не всегда совпадают с полученными в производстве.

Наиболее удачной можно считать разработку по оценке погрешности разделения в тяжелосредних сепараторах и отсадочных машинах, которая базируется на характере разделения узкой фракции (кривая разделения Тромпа), и которая аппроксимирована гауссовским законом распределения. При этом имеются работы, в которых указывается, что погрешность разделения не зависит от фракционного состава угля и зависит только от крупности угля и его обогатимости. Как известно обогатимость наиболее точно отражается количеством промежуточного класса во фракционной характеристике, естественно, что погрешность является функцией фракционного состава.

Интересным является подход решения вопроса расчета показателей обогащения (локализация погрешности разделения) с использованием так называемых сепарационных характеристик исходного продукта и разделительного аппарата. Их отношение представляется в вероятностном выражении, что не вполне корректно, поскольку величина отношения может быть меньше и больше единицы, что является недостаточным в данном методе. Разделение в аппарате происходит при определенной совокупности действующих параметров, которые не всегда контролируются, да и не всегда имеются зависимости их взаимодействия, поэтому разделительные характеристики можно считать плавающими. Не постоянными являются и характеристики исходного сырья.

Существует вполне определенное – конкретное понятие характеристик, которым следует пользоваться.

В данной работе для формализации погрешности разделения использованы имеющиеся наработки из теории обогащения углей и математических методов, то есть рассматривается погрешность для исходного продукта – угля

Основной наиболее представительной для угля является фракционная характеристика (ФХ), полная, представленная в соответствии с действующим ГОСТ или упрощенная. Для решения формализации потенциальной погрешно-

## Загальні питання технології збагачення

сти рассмотрим фракционную характеристику исходного продукта, направляемого в обогатительный аппарат, в принципе может рассматриваться ФХ на любой стадии технологической схемы. Пример ФХ приведен в таблице 1.

Такое представление фракционной характеристики является не достаточно корректным по следующей причине. Если ФХ представлять в виде графической зависимости, то на первую фракцию приходится участок плотности от нуля до 1300 кг/м<sup>3</sup>, то есть длиной 1300 единиц, а на остальные, согласно ГОСТ, по 0,1 единицы плотности.

Таблица 1

| Плотность фракций,<br>$\delta$ , г/см <sup>3</sup> | Класс крупности -13+0,5       |                              |
|--|-------------------------------|------------------------------|
|  | Выход фракции, $\gamma_i$ , % | Зольность фракции, $A_i$ , % |
| < 1,3  | 64,0                          | 4,0                          |
| 1,3–1,4  | 9,0                           | 6,5                          |
| 1,4–1,5  | 4,0                           | 18,5                         |
| 1,5–1,6  | 2,0                           | 28,0                         |
| 1,6–1,8  | 2,0                           | 40,0                         |
| > 1,8  | 19,0                          | 82,0                         |
| Итого  | 100,0                         |                              |

На рисунке 1 показан график зависимости выходов фракций в функции плотности.

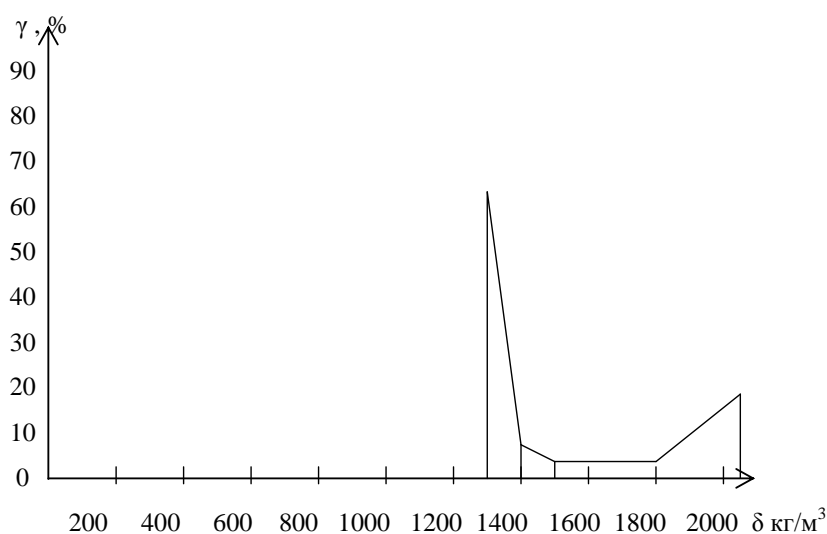


Рис. 1. Графическая интерпретация фракционной характеристики

Поэтому для соблюдения репрезентативности связи данных, представленных в таблице 1, и реальных значений опробуемого материала, в данном случае угля, необходимо привести выходы фракций к соответствующим размерам участков плотностей. Чтобы выполнить данное требование, необходимо внести следующее уточнение. В действительности в угольной массе отсутствуют частицы, плотность которых, например, равна нулю. Из данных практических исследований свойств угля минимальная плотность частиц, которые входят в об-

## **Загальні питання технології збагачення**

щую масу, для углей середньої щільності – каменних углей рівна  $1100 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом перший інтервал необхідно брати рівним  $1300-1100 = 200$  е., то єсть 0,2, інші з даних таблиці. Такого ж уточнення потребує розмір ділянки заключительної фракції (породної) фракційної таблиці. На основі вивчення зольних включень в угольну масу, для углей середньої щільності і відповідного родовища, щільність частинок – (щільність породи) слід приймати в межах  $3000 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, останній інтервал буде  $3000-1800 = 1200$  або 1,2.

Після визначення кінцевих інтервалів визначається відношення виходів фракцій до відповідних довжин інтервалів. Перетворені дані представляються в вигляді таблиці 2.

Таблиця 2

| Інтервал щільності,<br>$\delta, \text{ г/см}^3$ | Клас крупності -13+0,5        |                              |
|---|-------------------------------|------------------------------|
|   | Вихід фракції, $\gamma_i, \%$ | Зольність фракції, $A_i, \%$ |
| 0,2   | 64,0                          | 4,0                          |
| 0,1   | 9,0                           | 6,5                          |
| 0,1   | 4,0                           | 18,5                         |
| 0,1   | 2,0                           | 28,0                         |
| 0,2   | 2,0                           | 40,0                         |
| 1,2   | 19,0                          | 82,0                         |
| Ітого   | 100,0                         |                              |

По даним таблиці 2 на графіку рисунок 2 побудована гистограма залежності виходів фракцій від їх інтервалів.

По характеру розподілення фракцій, як угольної, так і породної можна зробити висновок, що кожна з них по виходу підчиняється відповідному закону розподілення або його можна свести до відповідного закону. В практичному використанні найбільше застосування отримав нормальний закон розподілення.

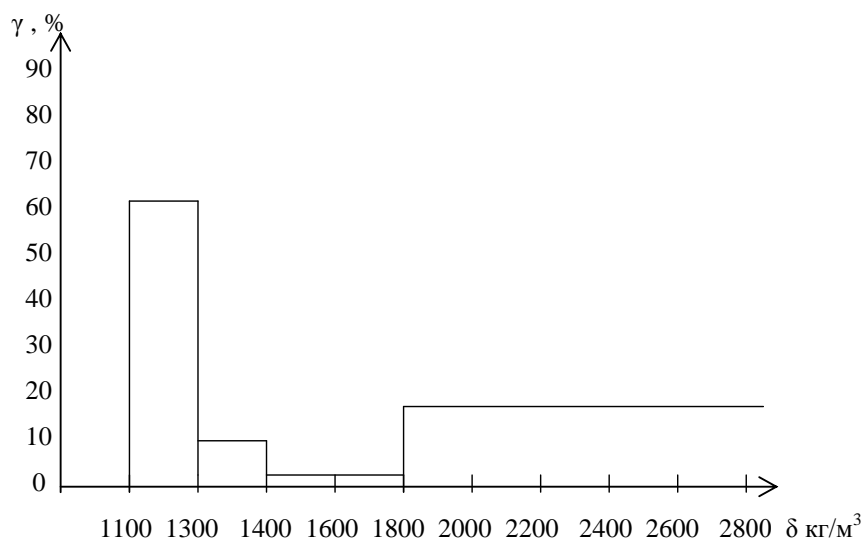


Рис. 2. Умовна гистограма розподілення щільностей вугля і породи

## Загальні питання технології збагачення

В данном случае это распределение выходов фракций относительно их плотности. Приведем данное распределение к нормальному закону распределения. Причем всю совокупность распределения представим в виде двух законов, имеющих структуру нормального. Первый закон для легких – угольных фракций, а второй для тяжелых породных фракций. Положив в основу симметрию нормального закона распределения фракций в теоретической интерпретации, можно преобразовать для угольной и породной составляющих фракционной характеристики соответственно, левую и правую части. В основу преобразования положен закон сохранения качественных и количественных значений фракций.

Фракционная таблица, с учетом принятого обоснования, будет следующей.

*Таблица 3*

| Плотность фракций,<br>$\delta$ , г/см <sup>3</sup> | Класс крупности -13+0,5       |                              |
|--|-------------------------------|------------------------------|
|  | Выход фракции, $\gamma_i$ , % | Зольность фракции, $A_i$ , % |
| 1,1–1,2  | 9,0                           | 4,0                          |
| 1,2–1,3  | 55,0                          | 4,0                          |
| 1,3–1,4  | 9,0                           | 6,5                          |
| 1,4–1,5  | 4,0                           | 18,5                         |
| 1,5–1,6  | 2,0                           | 28,0                         |
| 1,6–1,7  | 1,0                           | 40,0                         |
| 1,7–1,8  | 1,0                           | 40,0                         |
| 1,8–2,0  | 17,0                          | 82,0                         |
| 2,0–2,1  | 1,0                           | 82,0                         |
| 2,1–2,2  | 1,0                           | 82,0                         |
| Итого  | 100,0                         |                              |

По данным таблицы 3 на графике рисунок 3 построена зависимость распределения выхода от плотности

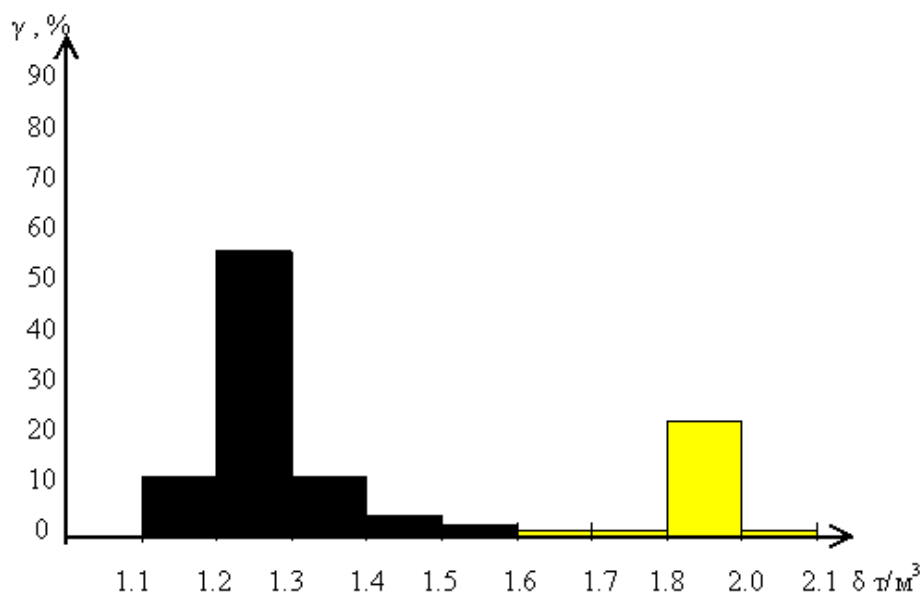


Рис. 3. Развернутая гистограмма распределения плотностей фракционной характеристики

## **Загальні питання технології збагачення**

На основани прийнятих допущених и выполненнх преобразований представляється возможным получить выражение дифференциальной функции нормального закона распределения угольной и породной составляющих фракционной характеристики следующим образом. В данном случае промежуточная фракция не выделена, ее параметры учтены в угольной и породной составляющих.

Выражение для представления угольной или породной составляющих фракций ФХ определенным при известном среднем квадратичном отклонении соответствующего параметра. Таким параметром является плотность. Относительно шкалы плотностей устанавливаем граничные значения для угольной и породной составляющих ФХ, в данном случае.  $(1,1 < \delta < 1,6)$  – угольная составляющая, а  $(1,6 < \delta < 2,1)$  – породная составляющая.

Пользуясь данными таблицы – таблица 3, находим среднее значение распределения плотности для угольной и породной составляющих по формуле:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot \delta_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}$$

А так же среднее квадратичное отклонение для угольных и породных фракций:

$$\sigma_{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i (\delta_i - \bar{\delta})^2}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}}$$

При известном среднем квадратичном отклонении дифференциальная функция нормального закона распределения следующая:

$$P_{\delta} = \frac{1}{\sigma_{\delta} \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{(\delta - \bar{\delta})^2}{2 \cdot \sigma_{\delta}^2}}$$

В данном выражении составляющие, кроме  $\delta$ , постоянные. Таким образом, выражение для распределения фракций по плотности является определенным.

Возможен другой способ получения выражения распределения фракций угольной и породной составляющих фракционной характеристики.

В данном случае, из таблицы фракционной характеристики принимается распределение плотности – варианты и частоты – плотность распределения – выхода фракций. На основании принятого распределения аналитическое выражение нормального распределения плотностей отдельно угольной и породной

составляющих будет следующим:

$$P = \frac{\gamma \cdot h}{\sigma} \cdot \varphi(x_i),$$

где  $h$  – длина интервала, измеряется в единицах измерения параметра, в данном случае, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi(x)$  – составляющая локальной теоремы Лапласа.

В развернутом виде  $\varphi(x)$  данная составляющая:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{(\delta - \bar{\delta})^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

Соответствие каждого конкретного распределения нормальному должно проверяться определенным образом, а именно, можно воспользоваться правилом трех сигм или по значению ассиметрии и эксцессу.

Если характер распределения фракций доказан, то для определения ошибки при технологическом разделении по плотности воспользуемся математической зависимостью для определения попадания угольных и породных фракций в соответствующие границы – интервалы, а именно:

$$P(x_1 \angle X \angle x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

С учетом того, что рассматриваемая величина распределена нормально в интервале  $(x_1, x_2)$ , следовательно  $(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)$ , можно записать:

$$P(x_1 \angle X \angle x_2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$$

Данное выражение преобразуем таким образом, чтобы можно было пользоваться практическими данными. Для этого введем новую переменную  $k = \frac{x-a}{\sigma}$ .

Из данного выражения определим:  $x = \sigma \cdot k + a$

Найдем производную от данного выражения:  $dx = \sigma dk$

Найдем новые пределы интегрирования, таким образом, если  $x = c$ , то  $k = \frac{c-a}{\sigma}$ , а если  $x = d$ , то  $k = \frac{d-a}{\sigma}$ .

С учетом выполненных преобразований, выражение для вычисления веро-

## Загальні питання технології збагачення

ятности попадання случайної величини в заданий інтервал  $(c, d)$  ( $\delta_1, \delta_2$ ):

$$P(c_1 \angle X \angle d) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{\frac{c-a}{\sigma}}^{\frac{d-a}{\sigma}} e^{-\frac{k^2}{2}} (\sigma dk)$$

С учетом определения значений для левой и правой ветвей закона распределения, последнее выражение:

$$P(c_1 \angle X \angle d) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{\frac{c-a}{\sigma}}^0 e^{-\frac{k^2}{2}} dk + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\frac{d-a}{\sigma}} e^{-\frac{k^2}{2}} dk$$

Заменяя в первой составляющей пределы интегрирования, получим зависимость:

$$P(c_1 \angle X \angle d) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\frac{d-a}{\sigma}} e^{-\frac{k^2}{2}} dk - \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\frac{c-a}{\sigma}} e^{-\frac{k^2}{2}} dk$$

При условии того, что составляющие правой части выражения выражаются функцией Лапласа, правомочно записать:

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{\frac{c-a}{\sigma}}^{\frac{d-a}{\sigma}} e^{-\frac{k^2}{2}} dk = \Phi(k)$$

Таким образом, вероятность попадания составляющих – угольных и породных фракций фракционной характеристики можно рассчитать:

$$P(x_1 \angle X \angle x_2) = \Phi\left(\frac{d-a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{c-a}{\sigma}\right)$$

Если в качестве  $a$  в данное выражение подставить математическое ожидание соответствующей части фракционной характеристики,  $d$  и  $c$  граничные значения плотностей соответствующей части фракционной характеристики, то в этом случае представляется возможным определить вероятность попадания определенной совокупности фракций в заданный интервал, а с учетом теоремы противоположных событий, вероятность непопадания. На основании данного условия правомочно приравнять значение вычисленной вероятности, потенциальной погрешности разделения совокупности фракций угля, которое подлежит обогащению. Следует отметить, что погрешности разделения фракций, угольной и породной составляющих всегда различны и случайны.



В последнем выражении  $\Phi(k)$  интегральная функция Лапласа. Данная функция табулирована, ее значения приведены в таблицах справочной литературы.

При условии адекватной формализации процесса обогащения в обогащительном аппарате, развернутой фракционной характеристики угля и потенциальной погрешности участков фракций фракционной характеристики, а также погрешности разделения обогащительного аппарата представляется возможным с достаточной точностью рассчитывать количественные и качественные показатели технологического процесса.

Данная разработка реализована при создании системы управления технологическим процессом с применением отсадки.

© Анисимов В.Н., 2010

*Надійшла до редколегії 23.01.2010 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*

УДК 541.183:622.33 + 622.693

**А.И. ЕГУРНОВ**, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, ЗАО "АНА-ТЕМС"),

**С.Д. БОРУК**, канд. хим. наук

(Украина, Черновцы, Черновецкий национальный университет),

**А.С. МАКАРОВ**, д-р техн. наук

(Украина, Киев, Институт коллоидной химии и химии воды НАН Украины)

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС СТРУКТУРИРОВАНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕТРИРОВАННЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЯХ**

Высококонтентрированные водоугольные суспензии – сложные многокомпонентные системы, содержащие частицы дисперсной фазы разной природы и размера, ионно– и молекулярнорастворимые примеси. Целенаправленное регулирование свойствами таких систем возможно только с учетом влияния на их вязкость, седиментационную устойчивость ряда факторов. По своим характеристикам данные системы могут быть отнесены к грубодисперсным, и вопрос изменения их характеристик можно рассматривать с точки зрения ДЛФО (Дерягина-Ландау-Феервея-Овербека) [1-3]. Такие системы являются термодинамично неустойчивыми, и при благоприятных условиях в них будет проходить образование структуры, элементами которой являются частицы дисперсной фазы или их агрегаты. Этот процесс особенно эффективен в присутствии химических добавок разной природы. Несмотря на длительное и широкое применение химических добавок для изменения свойств суспензий разной природы, вопросы теоретических основ процессов регулирования устойчивостью суспензий в