

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7.001.57:622.7.017:622.33

И.В.Кандинская, В.И.Удовицкий

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КРИВЫХ ОБОГАТИМОСТИ УГЛЕЙ

Оценка эффективности гравитационного разделения углей графическими методами

Предварительная оценка эффективности разделения по плотности и крупности имеет важное значение для практики переработки. Методы оценки теоретически предопределяют наиболее приемлемые процессы его переработки и возможные технологические показатели и, согласно работам [1-3 и др.], подразделяются на три группы:

1) экспериментальные методы, позволяющие непосредственно определять фракционный состав угля;

2) расчетные методы, основанные на использовании устойчивых зависимостей между петрографическим и минеральным составами частиц угля и их изменением в процессе переработки;

3) методы аналогии, заключающиеся в экстраполяции характеристик углей одних месторождений (пластов, участков, разведочных уклонов) на угли других месторождений, сходные по основным параметрам.

Наиболее достоверна предварительная оценка эффективности переработки, полученная при применении экспериментальных методов, позволяющих непосредственно определять фракционный состав углей и строить кривые обогатимости (рис.1).

В 1905 г. Анри был впервые предложен метод [4], пользуясь которым можно получить характеристику любого угля в отношении его эффективности

разделения в гравитационном поле. Метод широко применяется до сих пор, рекомендован нормативными документами [5] для прогнозирования результатов гравитационного разделения углей и заключается в следующем.

Проба угля расслаивается в тяжелых жидкостях, например, $ZnCl_2$ различной плотности (чаще всего применяются плотности 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 и 1.8 г/см³).

Выход полученных фракций откладывается на оси ординат, а их зольность - на оси абсцисс. В результате строят кривые обогатимости угля (рис. 1):

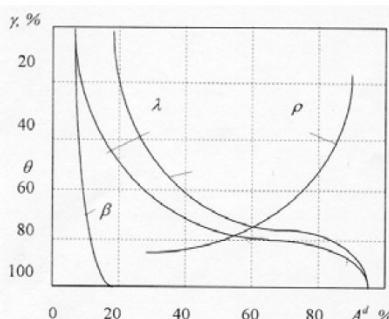


Рис. 1. Кривые обогатимости Анри

* кривая всплывших фракций (β), показывающая зависимость между выходом всплыших фракций и их зольностью. Для ее построения на оси ординат откладывают сверху вниз суммарные выходы всплыших фракций, из полученных точек проводят параллельно оси абсцисс линии выходов фракций. На этих линиях откладывают последовательно суммарную зольность (A^d) всплыших фракций. Получен-

ные точки соединяют плавной кривой;

* кривая потонувших фракций (θ), показывающая зависимость между выходом потонувших фракций и их зольностью. При ее построении на оси ординат (правой) откладывают снизу вверх суммарные выходы потонувших фракций. На линиях выходов фракций откладывают последовательно суммарную зольность (A^d) потонувших фракций. Полученные точки соединяют плавной кривой. Для проверки правильности построения кривой потонувших фракций на ней откладывают контрольные точки . вычисляют зольность (A^d) для условной выбранной контрольной точки по формуле:

$$A^d = \frac{100 \cdot A_u^d - \gamma \cdot A_k^d}{100 - \gamma}$$

где A_u^d - средневзвешенная зольность исходной пробы, %, γ - выход всплывших фракций для выбранной точки, %, A_k^d - зольность всплывших фракций для выбранной точки;

* для построения кривой элементарных фракций (λ), показывающей зависимость между выходом всплыших фракций и зольностью элементарных слоев, на линиях выходов соответствующих фракций откладывают последовательно зольности (A^d) отдельных фракций и из полученных точек проводят в пределах каждой фракции линии, параллельные оси ординат. Через середины этих линий проводят плавную кривую так, чтобы площади

треугольников, отсекаемых кривой в пределах каждой фракции, были равны между собой;

* кривая плотностей (ρ) показывает зависимость между выходом всплывших фракций и их граничной максимальной плотностью. Для ее построения проводят параллельно оси абсцисс линии, на которых откладывают последовательно граничные плотности фракций. Полученные точки соединяют плавной кривой (Более подробно построение кривых обогатимости описано в работе [6]).

Графическое построение этих кривых по данным расслоения угля на фракции различных плотностей в тяжелых жидкостях дает возможность для любой плотности разделения определить теоретический выход и зольность концентрата и породы. Характер кривых зависит от свойств углей, поэтому Анри назвал их характерными. По виду кривой λ можно судить о степени распределения золы в элементарных слоях угля. Разделение минеральных частиц по плотности происходит тем легче, чем ближе верхняя часть кривой λ начинается к точке 0 (на верхней абсциссе) и чем круче спускается вниз, а затем после резкого изгиба идет полого в нижней части диаграммы.

Впоследствии кривые Анри были дополнены Рейнгардтом [4, 7], который доказал следующую теорему: "Если требуется разделить два сорта угля так, чтобы смесь концентратов имела некоторую заданную зольность ($A^d - const$), то максимальный суммарный выход концентрата с этой общей средней зольностью будет получен тогда, когда зольности A^d_1 и A^d_2 , соответствующие демаркационным линиям, равны между собой". Эта теорема дает возможность принять соответствующие плотности разделения для переработки каждого машинного класса угля в отдельности, но

при этом необходимо задаться общей зольностью концентраторов.

Таким образом, и в этом случае (как и при построении кривых обогатимости) вносится элемент субъективности.

По мнению В.И.Павловича, Т.Г.Фоменко и Е.М.Погарцевой [4, 8], теорема Рейнгардта дает возможность установить при планируемой зольности максимальный выход суммарного концентрата в теоретическом балансе продуктов переработки. Следовательно, эффективность гравитационного разделения зависит не от природы угля, т. е. не от распределения минеральных примесей, которые могут быть извлечены из этого угля, и не от совершенства процесса его разделения, а от заданной зольности, которая может быть завышена или занижена для данного угля.

В 1951 г. Гайденрайх [4, 9] предложил в дополнение к кривым Анри ввести вспомогательную величину H

$$H = \frac{\rho_k - \rho_n}{\rho_h - \rho_k} \cdot 100,$$

характеризующую плотность разделения. Величина H выражается в процентах и определяется для каждой средней плотности 1.35 , 1.45 $\text{г}/\text{см}^3$ и т. д. Здесь ρ_h - плотность фракции, для которой определяется значение H ; ρ_n - начальная плотность, равная 1.15 $\text{г}/\text{см}^3$; ρ_k - конечная плотность, равная 2.85 $\text{г}/\text{см}^3$.

Осями координат диаграммы кривых λ , β , θ служат величины H и выход продуктов γ . По кривым определяются те же величины, что и по кривым Анри, с тем отличием, что вместо зольности принята величина H .

Уравнения теоретического баланса в этом случае имеют вид

$$\gamma_k H_k + \gamma_{pp} H_{pp} + \gamma_p H_p = 100H;$$

$$\gamma_k + \gamma_{pp} + \gamma_p = 100.$$

Обогатимость угля по Гайденрайху характеризуется разностью $H_p - H_k$. Чем больше эта разность, тем выше эффективность разделения угля по плотности.

Метод Бэрда впервые изложен в 1928 г. на 2-й Международной угольной конференции в Питтсбурге [4]. Сущность метода заключается в том, что эффективность разделения в гравитационном поле определяет количество материала, которое содержится в известных пределах выше и ниже принятой плотности разделения данного угля на составляющие компоненты. Пределы отклонения от разделительной плотности приняты Бэрдом на основании экспериментальных данных равными ± 0.1 $\text{г}/\text{см}^3$. Например, если разделительная плотность равна 1.5 $\text{г}/\text{см}^3$, то все сводится к определению количества материала, содержащегося в пределах плотности $1.4 - 1.6$ $\text{г}/\text{см}^3$. Если один уголь содержит этой фракции 5 %, а другой 15 %, то первый уголь будет разделяться по плотности легче второго.

К недостаткам метода следует отнести условный интервал отклонения, равный ± 0.1 $\text{г}/\text{см}^3$. Кроме того, метод не учитывает крупность угля, которая при разделении также играет немаловажную роль.

Значение этого индекса не отражает всех факторов, влияющих на оценку эффективности разделения. Подсчеты произведены для всех углей по одной и той же плотности 1.4 $\text{г}/\text{см}^3$, что во многих случаях не всегда корректно, т. к. плотность разделения может изменяться от 1.3 до 2.0 $\text{г}/\text{см}^3$. Это зависит от распределения минеральных примесей, и принятие одной и той же плотности разделения для всех углей, по-видимому, будет неправильным.

Метод оценки должен учитывать разделительную плотность, присущую углю, т. е. такую, которая являлась бы

наиболее выгодной.

Эффективность разделения угля по плотности Г.И. Прейгерзоном [4, 10] оценивается прежде всего по выходу $\pm 5\%$ золы. Этот показатель аналогичен показателю Бэрда.

Кривая Прейгерзона $\pm 5\%$ более удобна, чем кривая Бэрда, но не учитывает, что во фракции $<1.3 \text{ г}/\text{см}^3$ заключается в основном органическая (низко-золинная) масса, а во фракции $>1.8 \text{ г}/\text{см}^3$ - минеральная (породная) масса.

Для нахождения оптимального режима первичной переработки углей Т.Г.Фоменко в 1950 г. разработал графический метод, позволяющий определять для данного угля наивыгоднейший режим его гравитационного разделения [4, 8].

Обогатимость по Фоменко на основе фракционного анализа угля по принятой шкале плотностей расслоения характеризуется кривой элементарных зольностей λ , плотностью угля (кривая ρ) при наивыгоднейшем его гравитационном разделении; теоретическим выходом концентрата при оптимальной плотности разделения угля.

Ф.Майер [4, 9] предложил кривую, выражющую среднее значение эффективности разделения углей по плотности. Кривая получается путем суммирования площади, замкнутой основной кривой Ари - λ .

Точки, необходимые для построения кривой Майера, получаются следующим образом. На оси абсцисс откладывается количество зольных единиц (произведение выхода всплывшей фракции на содержание в ней золы), а на оси ординат - выход фракций.

По кривой Майера можно судить о теоретической эффективности разделения угля по плотности. Чем меньше радиус кривизны кривой Майера, тем легче разделение угля, и, наоборот, с увеличением радиуса кривизны трудность разделения возрастает.

Л.И.Улицкий [4, 11] предложил метод классификации углей по эффективности разделения в гравитационном поле, исходя из следующих положений: содержание промежуточных фракций в угле плотностью $1.4 - 1.8 \text{ г}/\text{см}^3$ является главным признаком, характеризующим угли к разделению в гравитационном поле; зольность фракций плотностью $<1.4 \text{ г}/\text{см}^3$ характеризует качество концентрата, а величина потеря горючей массы в отходах на каждый удаленный из рядового угля процент золы при переработке определяется наличием в ней фракции $<1.4 \text{ г}/\text{см}^3$.

Данный метод относится к графическим, который субъективен и не удобен для практического использования. Кроме того, в качестве исходного положения приняты не свойства углей и их способность к разделению, а заранее заданная постоянная плотность разделения для всех углей.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что до настоящего времени не существует общепринятого графического метода предварительной оценки эффективности разделения угля по плотности и крупности как и единого определения понятия эффективность разделения. Так, по стандарту [12] эффективность разделения по плотности характеризуется способностью угля к распределению на составляющие его фракции определенных плотностей. Т.Г. Фоменко и др. [8] под эффективностью разделения угля понимают его способность разделяться на продукты переработки по заданным показателям качества. Многие исследователи полагают [13, 14], что эффективность должна характеризовать состав угля по количеству и качеству содержащихся в нем полезных продуктов. И.М. Верховский [14], В.Г. Соколов [13] считают полезным использовать для оценки угля как сырья для переработки "степень трудности

переработки" в смысле трудности разделения компонентов угля по плотности.

В.П.Курбатовым [13, 25] для оценки трудности разделения угля в гравитационном поле предлагается использовать характерные разделительные числа кривой Тромпа-Терра [17-19]

$$T = \sum_{i=1}^k \gamma_i n_i$$

где γ_i - содержание элементарных фракций плотностью от 1.3 до $2.2 \text{ г}/\text{см}^3$; k - количество фракций; n_i - разделительные числа. Показатель T автор предлагает в качестве степени трудности разделения угля в гравитационном поле.

В 1918 г. Ханкок, а затем несколько позже - Луйкен [4, 14] предложили для определения абсолютного коэффициента переработки руд следующую формулу

$$E = (\varepsilon - \gamma)/(100 - \alpha_{min}),$$

где α_{min} - количество чистого рудного минерала в исходной руде, %; ε - извлечение полезного компонента в концентрат, %; γ - выход концентрата, %.

В 1954 г. немецкий исследователь О.Зоммер [4] предложил графическое истолкование формулы Ханкока-Луйкена. Этот графический метод оценки процессов разделения широко популяризовался Г.С. Бергером [15] как в отношении его применения при подсчете эффективности классификации и гравитационного разделения, так и обезвоживания.

Г.О.Чечотт [4] также предлагает пользоваться при подсчете эффективности разделения формулой Ханкока.

Если формула Ханкока-Луйкена имеет физический смысл и авторами доказана справедливость принятых ими положений, то произвольное суммирование значение степеней извлечения и выходов, как это сделал Г.А.Осолодков, лишает ее этих преимуществ, и формула в таком виде теряет

ценность [4].

Для установления коэффициента полезного действия разделения угля в гравитационном поле И.Г.Кураков [4, 16] предложил следующий метод. Исходный уголь расслаивают в тяжелых жидкостях и строят теоретические кривые, ограничивающие площади, занимаемые угольной и породной фракциями. После прохождения гравитационного аппарата строят аналогичные кривые. Коэффициент полезного действия определяют из отношения соответствующих площадей.

С теоретической точки зрения метод не вызывает сомнений, однако практическое применение весьма затруднительно. Если построение теоретической кривой по данным расслоения осуществляется достаточно легко, то получение опытной кривой весьма сложно и неточно.

Из формулы Фоменко [16]

$$E = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / 100$$

очевидно, что техническая эффективность гравитационного разделения находится в прямой зависимости от ε_1 и ε_2 (извлечения полезной и неполезной частей угля). Существуют такие значения выходов, при которых это произведение приобретает максимальное значение. Однако при большом выходе некоторых фракций продуктов в области расположения максимального значения E возникают трудности в определении истинного значения E_{max} (метод графический). Эта величина может не совпадать с испытываемым режимом разделения.

В 1937 г. голландский инженер К.Тромп предложил изображать результаты разделения минеральных частиц по плотности в виде кривой распределения [4, 7, 17]. Он установил, что распределение фракций исходного угля между продуктами переработки происходит с определенной статистической закономерностью, совпадающей с нормальным законом распре-

деления.

Отношение количества отдельных фракций в продукте переработки (в процентах от исходного) к количеству однотипной фракции в исходном угле называется разделительным числом для данной фракции.

Кривая Тромпа строится в координатах, на оси абсцисс которых откладывается средняя плотность фракций, а на оси ординат - разделительные числа [7].

Тромп и Терра [17-19] опытным путем установили, что кривая разделения имеет форму кривой нормального распределения.

В отличие от кривой Гаусса, кривая Тромпа не всегда строго симметрична относительно оси ординат. Многочисленными исследованиями установлено, что нормальный закон распределения Гаусса имеет место только при разделении в среде, плотность которой равна требуемой плотности разделения. В остальных случаях, т. е. при разделении в водной и воздушной средах, чтобы кривая имела симметричную форму и свойства нормального распределения, на ось абсцисс должны наноситься значения: при разделении в водной среде - $lg(\rho - 1000)$; в воздушной среде - $lg \rho$.

Кривая характеризуется разделительным числом E . Кроме того, процесс гравитационного разделения в аппаратах с водной средой можно характеризовать показателем погрешности

$$I = E_p / (\rho - 1000),$$

в тяжелосредных аппаратах - вероятным отклонением

$$E_p = (\rho_{75} - \rho_{25}) / 2,$$

где ρ - намечаемая (фактическая) плотность разделения; ρ_{75} , ρ_{25} - плотности, соответствующие разделительным числам 75 и 25 %.

Несовершенство методов прогнозирования содержало применение ЭВМ для расчетов

ожидаемых результатов переработки угля. Тем не менее, одна из первых работ, связанная с оценкой угля как объекта переработки, выполнена в вычислительном центре Пенсильванского университета (США) [21]. В этом центре разработана программа для ЭВМ, позволяющая оценивать результаты гравитационного разделения угля по данным о гранулометрическом составе угля и его распределении по фракциям плотности, т. к. именно они предопределяют выбор основных принципов проектирования фабрики, технологических процессов и оборудования. Исходной информацией для расчета этих данных служат показатели предварительной обработки ситового и фракционного анализов угля.

Выходной информацией являются: суммарные выход и зольность всплывшего и потонувшего продукта при указанных плотностях расслоения. Эти сведения машина выдает для каждого класса крупности.

В более поздних американских работах отмечается, что программы для ЭВМ требовали много времени для сбора исходных данных и предварительной их обработки. Совершенствование программ привело к созданию подпрограммы [13], которая на графопостроителе «Calcomp» выполняла автоматическое вычерчивание кривых по зольности и плотности.

Программа "WVU" [13] более совершенна. Она предназначена для обработки на ЭВМ результатов ситового и фракционного анализов.

Для уменьшения трудоемкости и сокращения времени на отбор и обработку проб О.Радек [13, 22] предложил для аппроксимации кривой, определяющей зависимость между выходом и зольностью всплывших продуктов, использовать уравнение

$$A_\beta^d = C_1 \gamma_\beta^2 + C_2 (A_\beta^d)^2 + C_3 \gamma_\beta A_\beta + C_4 \gamma_\beta$$

где A_β^d , γ_β - зольность и выход

всплывшего продукта; C_1, C_2, C_3, C_4 - параметры уравнения.

Для определения параметров уравнения необходимы данные расслоения угля в трех тяжелых жидкостях, однако для повышения точности расчета автор считал целесообразным использовать данные о выходе и зольности от 5 до 10 фракций, полученные в результате фракционного анализа. Радеком предложен новый метод расчета показателей для характеристики эффективности гравитационного разделения угля по результатам расслоения в одной жидкости плотностью 1,5 г/см³.

С.Смирновым [23] для оценки точности приближения полиномов различной степени к кривой λ разработана специальная программа для ЭВМ. Методом оценки приближения принят способ наименьших квадратов. В результате проведенных исследований автор пришел к выводу, что лучшее совпадение кривой λ и параболы достигается при использовании полинома десятого порядка

$$\gamma_\beta = C_0 + C_1 A_\lambda^d + \dots + C_{10} (A_\lambda^d)^{10}$$

где γ_β - выход всплывшего продукта; A_λ^d - соответствующая этому выходу зольность граничного элементарного слоя.

Метод нельзя признать удачным, т. к. требует большого объема опытных данных: не менее 30 точек для описания кривой λ и не менее 20 точек для описания кривой плотностей. Кроме того, возможные изгибы аппроксимирующей кривой противоречат физической сущности кривой λ (элементарных фракций).

И.Х.Абзиль, В.Кенинг и П.Г.Меерман [24] полагают, что для прогнозирования результатов гравитационного разделения угля диапазон плотности рассматриваемой фракции должен составлять 0,05 г/см³. Авторы предлагают использовать кривые: зольность-плотность и плотность-выход всплывших фракций. Авторы считают, что в пределах заданного диапазона

плотности каждой фракции зависимость между суммарным выходом всплывших фракций и максимальной плотностью их граничного слоя аппроксимируется полиномом третьей степени

$$\gamma_\beta = C_1 + C_2 \rho + C_3 \rho^2 + C_4 \rho^3,$$

где ρ - плотность граничного слоя всплывших фракций.

Авторами работы [13] разработан метод и алгоритм аппроксимации кривой λ .

Аппроксимация кривой ведется по трем участкам по данным фракционного анализа. Первый участок кривой описывается формулой

$$A_I^d = A_{min}^d + \alpha \gamma^n \beta,$$

где A_{min}^d - минимальная зольность компонентов исследуемого угля; α, n - параметры уравнения.

Уравнение кривой λ имеет вид

$$A_{II}^d = b_0 + b_1 (\gamma_\beta + \gamma_I) + b_2 (\gamma_\beta + \gamma_I)^k,$$

где γ_I - выход всплывшего продукта на конце I участка; b_0, b_1, b_2, k - постоянные коэффициенты этого уравнения.

Для описания кривой λ на третьем участке используется уравнение

$$A_{III}^d = C_0 + C_1 (\gamma_\beta + \gamma_2) + C_2 (\gamma_\beta + \gamma_2)^2$$

где γ_2 - выход всплывшего продукта на конце II участка; C_0, C_1, C_2 - постоянные коэффициенты уравнения.

Анализ рассмотренных гра-

фических методов оценки эффективности разделения угля позволяет сделать следующие выводы:

* методы позволяют с различной степенью точности определять плотности разделения (или вообще не касаются этого) только на стадии теоретического баланса продуктов переработки в гравитационных аппаратах в зависимости от характеристики угля;

* не все методы учитывают крупность и плотность, которые являются определяющими характеристиками угля при моделировании технологии гравитационного разделения, подборе оборудования, решении вопросов его использования. Наличие в угле кусков различной крупности и плотности зависит не только от физико-механических свойств угля и вмещающих его пород, но и от влияния таких внешних факторов, как способы добычи и транспортирования угля. Влияние всех перечисленных факторов оценивается изменением ситового и фракционного составов;

* несовершенство графических методов при моделировании и оптимизации технологий переработки каменных углей сдерживает применение ЭВМ для контроля и управления технологическими процессами, прогнозирования ожидаемых результатов разделения угля и определения оптималь-

Таблица 1
Данные для построения кривых обогатимости

Плотность фракций, г/см ³	Выход $\gamma, \%$	Зольность $A^d, \%$	Всплывшие		Потонувшие	
			$\gamma, \%$	$A^d, \%$	$\gamma, \%$	$A^d, \%$
1	2	3	4	5	6	7
<1,3	48,57	4,19	48,57	4,19	100,0	26,0
1,3-1,4	14,12	11,04	62,69	5,73	51,43	46,65
1,4-1,5	7,35	20,18	70,04	7,25	37,31	60,13
1,5-1,6	3,14	30,55	73,17	8,25	23,96	69,92
1,6-1,8	4,11	43,64	77,28	10,13	26,83	74,52
>1,8	22,72	80,11	100,0	26,0	22,72	80,11
Итого	100,0	26,0	-	-	-	-

ных плотностей разделения, при которых достигается максимальное (минимальное) значение принятого критерия оптимальности.

Аналитическое представление кривых обогатимости углей

Кривые обогатимости углей строятся по результатам фракционного анализа (табл.1) согласно методике, изложенной в [5]. Построение кривых обогатимости β , θ , ρ и их аппроксимация не вызывает особых затруднений.

Определение координат точек кривой λ

Известны:

- абсцисса точки 0, соответствующая зольности самой

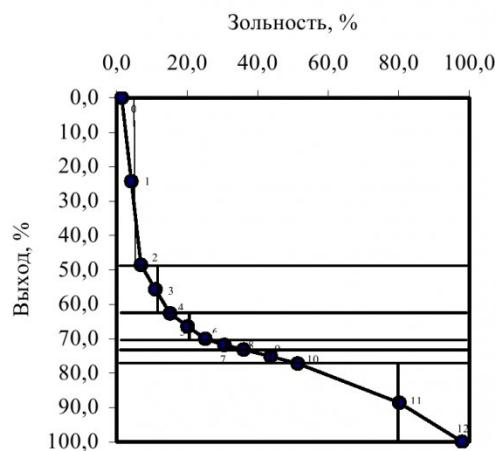


Рис. 2. Кривая элементарных фракций

легкой элементарной фракции и составляющая по данным практики 1,5-2%;

- абсцисса точки 12 соответствующая зольности самой тяжелой элементарной фракции и равная 95-98%;

- абсциссы точек 1, 3, 5, 7, 9 и 11 по результатам фракционного анализа пробы угля (графа 3 табл.1);

- ординаты точек 2, 4, 6, 8, 10 и 12 (графа 4 табл.1).

Определение абсцисс точек 2, 4, 6, 8 и 10:

$$A^d(2) = A^d(1) + (A^d(1) - A^d(0)) = \\ 4,18 + (4,18 - 1,5) = 6,86;$$

$$A^d(4) = A^d(3) + (A^d(3) - A^d(2)) = \\ 11,04 + (11,04 - 6,86) = 15,22.$$

(аналогично для 6, 8 и 10 точек).

Определение ординат точек 1, 3, 5, 7, 9 и 11:

из правил построения кривой λ очевидно, что

$$\gamma(1) = (\gamma(0) + \gamma(2))/2 = \\ (0 + 48,57)/2 = 24,28;$$

$$\gamma(3) = (\gamma(2) + \gamma(4))/2 = \\ (48,57 + 62,69)/2 = 55,63$$

(аналогично для точек 5, 7, 9 и 11).

После выполнения арифметических действий, получаем координаты точек кривой λ , представленные в табл. 2, по которым строят кривую элементарных фракций (рис. 2).

Графическое и аналитическое представление кривых обогатимости, в том числе и кривой элементарных фракций, необходимо для решения ряда задач, например: по заданной зольности A^d определить выход γ фракции; обратная задача – для возможного выхода фракции найти соответствующую ей зольность.

Формулу, выражающую зависимость γ от A^d (или наоборот) аналитически, можно найти с помощью метода наименьших квадратов и интерполяцией.

Метод наименьших квадратов

Для решения поставленной задачи применение данного метода оправдано, поскольку строгая функциональная зави-

симость для экспериментально полученной табл. 1 (графы 2 и 3) наблюдается редко, т.к. зольность A^d и выход γ фракций зависят от многих случайных факторов как при проведении фракционного анализа, так и при обработке его результатов.

В результате вычислительного эксперимента с использованием пакета «Granula» [26] установлено, если в качестве аргумента принимать выход фракции γ (табл. 2), то с большой точностью описывают кривую элементарных фракций приближающие функции:

$$1. A^d = \exp(0,4052 + 2,7570 \cdot \gamma - 0,3042 \cdot \gamma^2 + 0,0133 \cdot \gamma^3 - 0,0003 \cdot \gamma^4 + 3,6294 \cdot \gamma^5 - 2,2776 \cdot \gamma^6 + 5,7862 \cdot \gamma^7), \\ \sigma=0,534;$$

$$2. A^d = 1,4914 + 82,7216 \cdot \gamma - 9,3932 \cdot \gamma^2 + 0,4176 \cdot \gamma^3 - 0,0094 \cdot \gamma^4 + 0,0001 \cdot \gamma^5 - 7,2149 \cdot \gamma^6 + 1,8267 \cdot \gamma^7, \\ \sigma=0,695;$$

$$3. A^d = \exp(0,4056 - 0,0912 \cdot \gamma + 0,0151 \cdot \gamma^2 - 0,0006 \cdot \gamma^3 - 0,0003 \cdot \gamma^4 + 1,118 \cdot \gamma^5 - 9,2509 \cdot \gamma^6 + 2,8497 \cdot \gamma^7), \\ \sigma=1,50;$$

Если аргументом считать зольность фракции, лучшими аппроксимациями являются:

$$6. \gamma = 368,8845 - 1697,5412 \cdot \ln(A^d) + 2598,9003 \cdot \ln^2(A^d) - 1901,0091 \cdot \ln^3(A^d) + 764,9698 \cdot \ln^4(A^d) - 173,3869 \cdot \ln^5(A^d) + 20,7480 \cdot \ln^6(A^d) - 1,0185 \cdot \ln^7(A^d), \sigma=0,473;$$

$$7. \gamma = 120,3134 - 526,1132 \cdot \ln(A^d) + 718,7659 \cdot \ln^2(A^d) - 427,3501 \cdot \ln^3(A^d) + 130,5132 \cdot \ln^4(A^d) - 20,0740 \cdot \ln^5(A^d) + 1,2346 \cdot \ln^6(A^d), \sigma=0,831;$$

$$8. \gamma = 17,0259 - 78,6589 \cdot \ln(A^d) + 105,3268 \cdot \ln^2(A^d) - 40,7035 \cdot \ln^3(A^d) + 6,3958 \cdot \ln^4(A^d) - 0,3330 \cdot \ln^5(A^d), \sigma=1,49.$$

Интерполирование

Таблица 2

γ	0	24,3	48,6	55,6	62,7	66,5	70,0	71,8	73,2	75,2	77,3	88,6	100
A^d	1,5	4,2	6,9	11,0	15,2	20,2	25,1	30,6	36,0	43,6	51,3	80,1	98,0

На первый взгляд, применение интерполяции (требование неукоснительного совпадения в узлах) не совсем корректно, поскольку значения функции получены экспериментально. Однако, при графическом представлении кривых обогатимости графики проводят через полученные точки (табл. 1 и 2).

Таким образом, для описания кривых можно воспользово-

ваться интерполяционным полиномом Лагранжа:

$$A^d(\gamma) = \sum_{i=0}^n A_i^d \prod_{i \neq j} \frac{(\gamma - \gamma_j)}{(\gamma_i - \gamma_j)}.$$

(зольность фракций здесь принимается за функцию).

Применение интерполяции для описания кривых обогатимости углей, на наш взгляд, предпочтительнее, а простота метода очевидна. Кроме того,

приближающие функции (1-6) очень плохо описывают кривую (рис. 2) на участках (0-1) и (10-12), поэтому неслучайно авторы [13] рекомендуют разбивать кривую элементарных фракций на три участка, и каждый из них аппроксимировать отдельной функцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков В.П., Жуков П.П. Методы прогнозирования ситового и фракционного составов углей. -М.: Недра, 1977. -184 с.
2. Земляков Б.А. Прогнозирование характеристик обогатимости углей. -М.: Недра, 1978. -128 с.
3. Кизельштейн Л.Я., Мостовой Т.П., Жак С.В. Оценка обогатимости ископаемых углей на стадии геологоразведочных работ. -М.: Недра, 1987. -120 с.
4. Павлович В.И., Фоменко Т.Г., Погарцева Е.М. Определение показателей обогащения углей. -М.: Недра, 1966. -140 с.
5. ГОСТ 4790-80. Топливо твердое. Метод фракционного анализа. -М.: Изд-во стандартов, 1985. -22 с.
6. Соколов В.Г. Кривые обогатимости углей. - М.: Гос. науч.-техн. изд-во литературы по горному делу, 1962. -90 с.
7. Артиюшин С.П. Проектирование углеобогатительных фабрик .-Изд. 2-е, перераб. и доп.. -М.: Недра, 1974. -200 с.
8. Фоменко Т.Г., Бутовецкий В.С., Погарцева Е.М. Исследование углей на обогатимость. -М.: Недра, 1978. -262 с.
9. Гайденрайх Г. Оценка промышленных результатов обогащения полезных ископаемых. -М.: Госгортехиздат, 1962. -189 с.
10. Прейгерсон Г. И. О классификации углей по обогатимости //Уголь. -1948. -N5. -C.5-10.
11. Улицкий Л.И. Вопросы экономики обогащения углей. -М.: Госгортехиздат, 1960. - 146 с.
12. ГОСТ 10100-84. Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости. -М.: Изд-во стандартов, 1984. -4 с.
13. Коткин А.М., Ямпольский М.Н., Геращенко К.Д. Оценка обогатимости угля и эффективности процесса обогащения. -М.: Недра, 1982. -200 с.
14. Справочник по обогащению углей. Под ред. И.С.Благова, А.М.Коткина, Л.С.Зарубина. -М.: Недра, 1984. -615 с.
15. Бергер Г.С. Графический расчет процессов обогащения угля и других полезных ископаемых. -М.: Углехиздат, 1959. - 149 с.
16. Фоменко Т.Г. Определение оптимальных показателей обогащения. -Магадан, ВНИИ-1, 1957. 212 с.
17. Tromp K. Neue Wege fur die Beurteilung der Aufbereitung von Steinkohlen //Gluckauf. -1937. -№73. - C.125-131.
18. Terra A. Sens de la courbe de partage anamorphosee et de lecart probable dans le controle des lavoirs... //R. I. M.. -1955. -№626. -P.76-79.
19. Terra A. Determination pratique de lecart probable en densite //Revue de l'industrie minérale. -1939. -№446. - P.34-37.
20. Самылин Н.А., Золотко А.А., Починок В.В. Отсадка. -М.: , 1976. -320 с.
21. Humphreys K.K., Leonard L.W., Buttermore J.A. Computer Program Performs Complete Coal Washability Analysis //Coal Age. -1972. -N7. -P.101-108.
22. Radek O. Matematicky model upravitelnosti uhlí //Uhli. -1971. -N7. -P.261-263.
23. Smirnov S. Anwendung der Datenverarbeitung auf die rechnerische Auswertung der Verwachsungskurven von Steinkohle als Mittel zur Vorausberechnung von Sortierergebnissen...//Aacher Blatter. 1968. №5. P.163-205.
24. Абзиль И.Х., Кенинг В., Мерман П.Г. Предварительная характеристика показателей процесса обогатительной фабрики. -Питтсбург, США, 1966. -137-139 с.
25. Курбатов В.П., Барский В.Д., Хворов В.В., Иденбаум В.Н. Определение максимального выхода угольного концентрата при заданной зольности //Кокс и химия. -1978. -№3. -C.4-8.
26. Удовицкий В.И. Моделирование подготовительных и основных процессов переработки каменных углей. -Кемерово, Кузбассиздат, 1998. -500 с