

## Загальні питання технології збагачення

**А.С. КОФАНОВ**, канд. техн. наук  
(Україна, Луганськ "Гипромашуглеобогащение")

### ИНСТИТУТУ "ГИПРОМАШУГЛЕОБОГАЩЕНИЕ" – 45 ЛЕТ

История института "Гипромашуглеобогащение" начинается с 1961 г., когда в стране остро встала проблема создания отечественного углеобогащительного оборудования, не уступающего по технико-экономическим показателям импортной технике. В течение семи лет задача была решена, и все углеобогащительные предприятия Союза стали оснащаться новыми машинами. Их высокий технический уровень был сразу оценен потребителем. Необходимость в импорте отпала.

Особый раздел деятельности института относится к расширению области применения углеобогащительных машин. Отсутствие высокоэффективного обогащительного оборудования в ведущих отраслях промышленности страны дало идею создания универсальной техники для обогащения других материалов, и сейчас она используется от предприятий горно-металлургического комплекса до пищевой и сельскохозяйственной промышленности. В номенклатуре Гипромашуглеобогащения есть машины и комплексы для переработки различными методами углей и угольных шламов, антрацитов, сланцев, горно-химического сырья, руд черных, цветных и редких металлов, янтароносного песка, драгоценных и полудрагоценных минералов, алмазосодержащих руд, золота, многокомпонентного лома и отходов цветных металлов, отработанных автомобильных шин, строительных материалов и др.

Сорокапятилетний путь Гипромашуглеобогащения не всегда был ровным. Постперестроечный период принес для коллектива тяжелые испытания, но они были преодолены благодаря усилиям и правильно выбранной тактике руководства и ведущих специалистов института. В результате были сохранены кадровый потенциал, производственные мощности и специализация.

Деятельность института, его основные успехи и достижения связаны в первую очередь с угольной промышленностью, с оснащением и переоснащением углеобогащительных фабрик и установок.

По документации института обогащительное оборудование изготавливается на 24 предприятиях Украины и стран СНГ и эксплуатируется практически на всех обогащительных фабриках бывшего Союза.

В последние годы, несмотря на отсутствие централизованного финансирования проектно-конструкторских работ, институт, опираясь на накопленный десятилетиями научно-производственный опыт, меняет акценты в своей работе и переходит от разработки отдельных машин к созданию комплексов. Так, за счет собственных оборотных средств и частично средств заказчиков выполнен ряд важнейших для государства работ, которые стали новым этапом в технике и технологии обогащения.

Разработаны, изготовлены на экспериментальной базе института и

## Загальні питання технології збагачення

внедрены в Украине и Российской Федерации комплексы для обогащения антрацитовых штыбов кл. 0–6 мм в тяжелосредних гидроциклонах, которые ранее не обогащались, и комплекс для обогащения угольных шламов кл. 0,1–3 мм в спиральных сепараторах. По различным оценкам, в илонакопителях находится около 116 млн. тонн шламов с зольностью 45–50%, которые можно обогащать в этих сепараторах. Создание таких комплексов позволило Украине отказаться от закупок импортной дорогостоящей обогатительной техники и решить важную экологическую проблему – получение низкозольного топлива с содержанием золы менее 28% для использования на тепловых электростанциях.

Благодаря созданию комплекса для предварительного обогащения сухим способом породных отвалов и рядовых углей с применением уникального пневмовибрационного сепаратора типа ПВМ можно извлечь миллионы тонн горючей массы с минимальными затратами. А по оценкам, в отвалах шахт и обогатительных фабрик Украины находится около двух миллиардов тонн горючей массы с содержанием угля до 20%. Таким образом, общее количество угля, который может быть извлечен из горной массы породных отвалов и шламонакопителей, составляет около 450 млн. тонн, что в несколько раз превышает годовую добычу угля в Украине – 80 млн. тонн.

Разработан, изготовлен и поставлен заказчиком из Казахстана отсадочный комплекс для обогащения феррошлаков производительностью 50 т/ч. В 2006 году будет поставлен такой комплекс производительностью 100 т/ч. Применение комплексов позволит получить из оборотных шлаков товарный концентрат (феррохром), товарный щебень и промпродукт, пригодный для металлургического передела.

Комплекс для обогащения алмазов разработан, изготовлен и внедрен в 2002 году в Гвинее.

Из достижений последних лет нужно отметить создание типоразмерного ряда высокочастотных грохотов типа ГВЧ для различных операций с площадью просеивающей поверхности от 3 до 15 м<sup>2</sup>, которые до 2000 года закупались за рубежом, грохоты для отсева углей повышенной влажности с эллиптической траекторией колебаний типа ГЭТ, отсадочные машины с подвижным решетом для обогащения марганцевой руды и других материалов, высокоэффективные обезвоживающие и осадительные центрифуги. Эти машины отличаются удачным инженерным решением и хорошими технологическими показателями.

Гипромашуглеобогащение активно участвует в техническом переоснащении многих металлургических предприятий Украины, в частности Алчевского, Мариупольского им. Ильича, Днепропетровского им. Ф.Э. Дзержинского, Енакиевского и др.

Институт успешно сотрудничает с Российскими предприятиями. В качестве примера можно сказать, что новым высокоэффективным оборудованием полностью переоснащены углеобоганительные фабрики Ростовской области. А всего до 25% объема выпускаемой продукции поставляется на экспорт.

## Загальні питання технології збагачення

Институт по заказам разрабатывает и изготавливает обогатительное оборудование любого типоразмера с поставкой и сдачей "под ключ", с гарантийными обязательствами и сервисным обслуживанием.

Новое оборудование защищено патентами на изобретения. В последние годы подано 22 заявки на изобретение и получено 12 патентов на изобретения.

Начиная с 2000 года институт работает стабильно и прибыльно, ежегодно наращивает объемы выполняемых работ. Так, с 2000 по 2005 годы они увеличились в 3,7 раза при постоянной численности работающих 215–220 человек и средней рентабельности работ 27%. Объемы поставок на экспорт увеличились в 3 раза.

Зарплата трудящимся выплачивается ежемесячно, за этот промежуток времени она выросла в 4 раза.

За последние годы институт омолодил кадровый состав, чтобы не потерять преемственности поколений. Принято 26 молодых специалистов, трое из них уже учатся в заочной аспирантуре.

Молодые специалисты института принимают участие в конкурсах, которые проводит Луганская облгосадминистрация и Луганский областной Совет. За работу "Внедрение центрифуги ЦфШнГ-1,00-ВМ (ФГШ-1000)" получен Диплом лауреата и денежная премия.

Гипромашуглеобогащение постоянно участвует в специализированных выставках, форумах, конгрессах, научно-практических конференциях. Награжден дипломами выставок и конкурсов, благодарственными письмами, сертификатами.

По результатам работы в 2000–2005 годах за значительный вклад в развитие экономики Украины об институте опубликованы материалы в "Золотій книзі української еліти", "Київському літопису ХХІ століття", "Діловому іміджу України. 500 впливових особистостей, Україна рік 2004. Шляхи розбудови", "100 кращих товарах України", международном общественно-политическом журнале "Европа-Центр". Институт также отмечен Торгово-промышленной палатой Украины медалью "Золотой Меркурий", дипломами "Кращі товари Луганщини", грамотами государственной налоговой администрации в Луганской области, Пенсионного фонда и многими другими.

Конструкторские отделы хорошо оснащены компьютерной и другой оргтехникой, имеется лицензионная программа "Компас" для выполнения конструкторских и технологических работ, в лабораториях есть необходимые стенды для проведения поисковых и научно-исследовательских работ. Станочный парк экспериментальной базы обновляется и пополняется.

Учитывая реальные проблемы, стоящие перед отраслью, институт постоянно работает над научным заделом. С 2004 года за счет собственных оборотных средств он начал проводить 15 поисковых научно-исследовательских работ, чтобы через 3–5 лет выйти на создание принципиально новой обогатительной техники.

Высокоэффективное и отвечающее современным требованиям

оборудование, разработанное Гипромашуглеобогащением, позволило институту завоевать ведущую позицию в области обогатительной техники, создать новые рабочие места на заводах-изготовителях и исключить зависимость угольной промышленности от технической и экономической политики зарубежных фирм.

© Кофанов А.С., 2006

*Надійшла до редколегії 12.04.2006 р.  
Рекомендовано до публікації*

УДК 622.7

**А.Д. ПОЛУЛЯХ**, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, "Укрнииуглеобогащение"),

**В.Ф. ПОЖИДАЕВ**, д-р техн. наук

(Украина, Луганск, Восточноукраинский национальный университет),

**В.Б. ТОМИЛИН**

(Украина, пос. Фащевка, ЦОФ "Комендантская")

### **К ОБОСНОВАНИЮ ПРИМЕНЕНИЯ УРАВНЕНИЯ КОЛМОГорова-Фоккера-Планка к выводу кривой извлечения**

Для оценки полученных результатов разделения, а также определения целесообразных пределов разделения существуют методы Т.Г. Фоменко, Куракова, Тромпа-Терра и др. [1–3]. Наибольшее распространение получило определение ожидаемых результатов разделения по параметру  $E_{pm}$ .

Сходство кривых разделения с интегральной кривой нормального распределения фракций различной крупности исходного угля в продуктах разделения может быть описано уравнением интегральной кривой нормального распределения.

Некоторые исследователи кривых разделения Тромпа [4–7] указывают на их отличие от интегральных кривых нормального распределения.

Кривые разделения представляют извлечение данного класса крупности в продукты разделения, т.е. выражают величину ошибки, как долю данного диапазона крупности, а не от общего количества посторонних классов крупности. Ордината же интегральной кривой Гаусса выражает величину вероятности извлечения по отношению ко всей совокупности ошибок.

Таким образом, сходство является только формальным и не отражает физическую сущность процесса разделения. опыты показывают, что совпадение имеет место лишь в центральной части кривых.

## Загальні питання технології збагачення

Интегральная кривая Гаусса является симметричной, кривые разделения в большинстве случаев несимметричны. В связи с этим, нередко различия между значениями ожидаемых показателей продуктов обогащения, определенных в соответствии с уравнением интегральной кривой Гаусса, и фактическими данными экспериментального исследования являются существенными.

Однако, учитывая то, что в большинстве случаев эффективность обогатительных машин оценивается по методу Тромпа-Терра [1–3], для сопоставления результатов исследований с данными, полученными другими авторами, в данной работе точность разделения оценивалась по параметру  $E_{pm}$ .

Кривая извлечения частиц в отходы позволяет найти состав продуктов обогащения, если задан состав исходного угля.

Тромп нашел отношение между содержанием отдельной фракции в концентрате и породе и содержанием этой фракции в исходном материале в процентах и доказал [2, 7], что это отношение  $E$  зависит только от режима процесса разделения, но не от распределения фракций в исходном угле. Тромп назвал это отношение "числом распределения". Ниже применяется термин "число разделения", предложенный Ульмо на Международном конгрессе по обогащению угля в 1950 г. в Париже. Величина  $E_1$  извлечения указывает, какое количество фракции от исходного (%) определенного удельного веса попадает в концентрат;  $E_2$  указывает, какое количество фракции того же удельного веса (%) попадает в породу. Таким образом, значения  $E_1$  и  $E_2$  показывают, в каком соотношении фракции угля определенного удельного веса распределяются в концентрате и породе. В сумме числа разделения составляют 100%:  $E_1 + E_2 = 100\%$ . Если  $E_1 = 100\%$ , то общее количество фракций определенного удельного веса, содержащихся в рядовом материале, равно количеству этих фракций в концентрате. Если же  $E_1 = 50\%$ , то это значит, что половина фракций определенного удельного веса попадает в концентрат, а другая – в породу. При  $E_1 = 0\%$  фракции определенного веса полностью переходят в породу [1, 7].

Фр. В. Майер утверждает, что из кривой  $T$ , представленной в виде кривой распределений фракций по Гётте, следует, что только верхняя ветвь подобна частотной кривой [8]. Сходство, которое имеет кривая  $T$  с интегральной кривой погрешности Гаусса (кривой  $S$ ), побудило Терра, Ульмо и Белюгу [5, 6] использовать эти известные математические закономерности для практического приложения кривой  $T$ .

Точное определение чисел разделения по кривой Тромпа затруднительно, так как особенно в областях больших удельных весов часто имеют место аномалии. Очень часто при определении величин извлечения граничные

области вообще не охватываются.

Терра для характеристики кривой  $T$  принял ее половинное рассеяние. Рассеянием обозначают разность между нижней и верхней четвертями ряда чисел. Рассеяние охватывает половину всех величин, расположенных в середине ряда. В статистике половина величины рассеяния называется также "вероятным отклонением" и действительна как характеристика формы кривой вероятности (кривой ошибок Гаусса).

Вероятное отклонение по кривой  $T$  определяется как полуразность удельных весов (абсцисс), которым соответствуют значения чисел

$$E_T = \frac{\delta_{25} - \delta_{75}}{2}$$

распределения 25 и 75 в процентах, равные

Технологический или физический процесс лишь тогда может быть объясним, когда возможно предварительно определить характер его протекания и результаты. Большое значение работ Тромпа и Терра заключается в том, что с помощью разработанного ими метода для каждого отдельного случая можно предварительно определить результат с точностью, достаточной для производства. Предполагаемый выход обогащенного угля может быть определен путем умножения величины содержания фракции в рядовом угле на величину извлечения, принятую для фракций соответствующих удельных весов, и тогда получается сумма всех выходов.

При одинаковых условиях обогащения (при одинаковой крупности и при одной и той же плотности разделения) кривая разделения всегда имеет одни и те же формы и положение в системе координат независимо от фракционного состава (т. е. от качества) исходного сырья, поступающего на эту машину.

На основании этого Тромп сделал вывод, что разделительные числа каждой фракции, определяющие ординаты, а, следовательно, и форму кривой, есть величины постоянные для данной обогатительной машины. В действительности это утверждение нельзя считать достаточно строгим. Однако в первом приближении кривая разделения может служить показателем точности работы обогатительной машины. Изучая зависимость между разделительными числами различных фракций и соответствующими значениями плотности фракций, Тромп и Терра установили опытным путем, что кривая имеет форму и подобна по свойствам кривым распределения ошибок, рассматриваемым в теории вероятностей, и, следовательно, распределение фракций различных плотностей исходного угля в продуктах обогащения подобно распределению вероятностей по нормальному закону.

Проводя аналогию между кривой  $T_n$  и математической кривой распределения, следует отметить вслед за Митрофановым, Барским и Самыгиным [5, 6, 8]:

1. Посторонние или ошибочные фракции в продуктах обогащения

## Загальні питання технології збагачення

аналогічно випадковим помилкам вимірювання, вираженим абсциссой інтегральної кривої. Щільність розділення  $\delta_{cp}$  – середнє значення випадкової величини.

2. Абсциси точок на кривій, розташовані зліва від щільності розділення, виражають щільності елементарних фракцій, менше  $\delta_p$ , помилково потрапивших в породу, а абсциси, з іншої сторони, – щільності фракцій, більші  $\delta_p$ , помилково втрачених породою і потрапивших в концентрат. Ординати кривої виражають ймовірність отримання помилок в межах даної елементарної фракції в процентах від вмісту цієї фракції в вихідному вуглі.

3. Чим ближче щільність сторонніх фракцій до щільності розділення, т.е. чим менше помилка, тим частіше вони потрапляють в продукт. Це відповідає першому положенню нормального закону Гауса: чим менше помилка, тим більше її ймовірність.

4. Якщо крива розділення симетрична по відношенню до ординати щільності розділення, то кожній сторонній фракції  $\delta_p - \Delta$  відповідає фракція  $\delta_p + \Delta$ , ординати яких рівно віддалені від ординати, що відповідає  $\delta_p$ . Це відповідає другому положенню закону Гауса: додативні і від'ємні помилки рівно ймовірні.

5. Крива розділення показує межі щільностей фракцій, увлечених помилково в продукти обогачення.

Багачисленними дослідженнями встановлено, що нормальний закон розподілення має місце тоді, коли обогачення (розділення) здійснюється в обогачувальному апараті, щільність середою якого рівна виможуваної щільності розділення, т.е. в апаратах з важкою середою. При обогаченні в водній або повітряній середі розділення залежить від відносних значень щільностей зерен в воді або повітрі, а не від абсолютних значень щільностей в повітрі, т.е. не від  $\delta$ , а від  $\delta - \delta_o$ , де  $\delta$  – щільність зерна,  $\delta_o$  – щільність середою.

Таким чином, крива розділення симетрична інтегральної кривої і характеризує властивості нормального розподілення: для машин з важкою середою – при нанесенні на абсциссі значень  $\delta$ ; для машин з водною середою – значень  $lg(\delta - 1)$ ; для машин з повітряною середою – значень  $lg \delta$ .

Р.Ф. Афанасьєва [6] встановила, що при обогаченні отсадкою розподілення підчиняється логарифмічно-нормальному закону розподілення ймовірностей Гауса.

## Загальні питання технології збагачення

Таким образом, вероятное отклонение  $E_p$  характеризует не процесс обогащения вообще, а обогатительную машину, в которой осуществляется этот процесс. В связи с этим среднее вероятное отклонение может служить характерным показателем для контроля и оценки эффективности работы обогатительных машин, так как оно для данного типа машины при прочих равных условиях не зависит от обогатимости исходного продукта.

Для большинства обогатительных машин величина  $E_p$  зависит от плотности разделения. Для одной и той же машины  $E_p$  будет большим при более высокой плотности разделения.

Обоснование, рассмотренных Афанасьевой и др. результатов, можно выполнить строго [9–11], а не интуитивным путем с помощью рассмотрения решения уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка с правильно выбранным граничным условием. Это уравнение естественным образом описывает процесс случайного блуждания в процессах разделения. Аргументировано можно показать применение именно этого подхода можно сделать двумя способами: с помощью рассмотрения сил, побуждающих частицу к случайным перемещениям и с помощью чисто математического доказательства. Приведем оба способа.

Подробное рассмотрение сил, действующих на частицу в среде, состоящую из таких же частиц, рассмотрено Тихоновым О.Н. [14].

1. Суммарная сила тяготения, действующая на все частицы (и материала, и среды), заключенные в объеме  $V$  группы:

$$g \iiint_V dV \left[ m \int \rho \gamma d\rho + (1-m) \rho_{cp} \right] = F_g$$

где  $gdVm\rho\gamma(\rho)d\rho$  – сила, действующая на узкую фракцию материала в объеме  $dV$  ( $mdV\gamma d\rho$  – объем узкой фракции в  $dV$ );  $gdV(1-m)\rho_{cp}$  – сила, действующая на среду в объеме  $dV$ . Величина силы тяготения, приходящаяся на частицу, зависит от ее физического признака  $\rho$ .

2. Архимедова сила. Эта сила, приходящаяся на объем  $V$ , равна весу материала внутри объема  $V$ :

$$-g \iiint_V dV \left[ m \int \rho \gamma d\rho + (1-m) \rho_{cp} \right] = F_A$$

Примем, что в среднем сила распределяется пропорционально объему

## Загальні питання технології збагачення

частиц. Тогда можно считать, что на единицу объема  $V$ , независимо от того, чем она заполнена, действует архимедова сила

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{F_A}{V} = \frac{-g \iiint_V dV [m \int \rho \gamma(\rho) d\rho + (1-m) \rho_{cp}]}{V} =$$

$$= -g \left[ m \int_{\rho_{MIN}}^{\rho_{MAX}} \rho \gamma(\rho) d\rho + (1-m) \rho_{cp} \right].$$

3. Градиентная упругая (или диффузионная) сила.

$$k_M \frac{1}{\gamma(\rho)} \text{grad} \gamma(\rho)$$

На единицу объема частиц узкой фракции . На

отдельную частицу объема  $V_q$   $-V_q k_M \frac{1}{\gamma(\rho)} \text{grad} \gamma(\rho)$  .

4. Сила трения (сопротивление движению)

$$m_q \frac{V}{\tau} = a_M V$$

Средняя сила трения, действующая на частицу из-за ударов: , где  $\tau$  – среднее время пробега частицы между столкновениями,  $V$  – направленная скорость частицы (предполагается, что она полностью теряется

при столкновении).  $\tau = \frac{\lambda}{\bar{v}} = \frac{1}{\bar{v} n \sigma}$ , где  $\lambda$  – длина свободного пробега;  $n$  – полное число частиц в единице объема;  $\sigma$  – сечение частицы ( $\pi D^2$ ,  $D$  – ее диаметр).

5. Трение о среду.  $-a_M (V - V_\Sigma) - a_{cp} (V - V_\Sigma)$ ,

где  $V_\Sigma = \int_{\rho_{MIN}}^{\rho_{MAX}} v \gamma d\rho$ ,  $a_M$  и  $a_{cp}$  – коэффициенты пропорциональности.

Процесс перемещения частиц может быть рассмотрен как случайное блуждание при диффузии и броуновском движении. Это вытекает из второго закона Ньютона  $\sum F = 0$  .

В схеме случайных блужданий отдельные шаги крайне малы, но очень быстро следуют друг за другом. В пределе такой процесс будет казаться непрерывным движением, что объясняется наложением многих малых воздействий на частицу. При переходе к пределу получаемые формулы сохраняют смысл и согласуются с физически осмысленными формулами теории диффузии. Это можно доказать чисто математическим путем. Рассмотрим

## Загальні питання технології збагачення

неограниченное случайное блуждание, начинающееся в нуле.

Пусть  $\pi_{x,n}$  – вероятность того, что  $n$ -ый шаг приведет частицу в точку  $x$ . Если  $r$  из  $n$  шагов направлены вправо, то  $n - r$  шагов направлены влево, и суммарное перемещение равно  $r - (n - r) = 2r - n$  единиц. Поскольку это перемещение должно равняться  $x$ , имеем  $2r - n = x$ . Это возможно, только, если  $n$  и  $x$  имеют одинаковую четность (последнее означает, что после четного числа шагов абсцисса  $x$  является четным числом). Из  $n$  шагов  $r$  могут быть выбраны

$C_n^r$  способами, и поэтому  $\pi_{x,n} = C_n^{\frac{n+x}{2}} p^{\frac{n+x}{2}} q^{\frac{n-x}{2}}$ . Биномиальный коэффициент

считается равным нулю, когда  $\frac{n+x}{2}$  не есть целое число из интервала  $[0, n]$

или  $\pi_{x,n+1} = p\pi_{x-1,n} + q\pi_{x+1,n}$ ,  $\pi_{0,0} = 1$ ,  $\pi_{x,0} = 0$ .

Выберем единицу длины так, чтобы каждый шаг имел длину  $\Delta x$ , и предположим, что промежуток времени между двумя последовательными

шагами равен  $\Delta t$ . За время  $t$  частица совершит  $\frac{t}{\Delta t}$  скачков, и смещение  $x$

эквивалентно теперь  $\frac{x}{\Delta x}$  единицам. При этом имеют смысл лишь значения, кратные  $\Delta x$  и  $\Delta t$ , но в пределе, когда  $\Delta x \rightarrow 0$ ,  $\Delta t \rightarrow 0$  становятся возможными все смещения и все интервалы времени.

Чтобы найти правильное соотношение, заметим, что суммарное

перемещение частицы за время  $t$  есть сумма примерно  $\frac{t}{\Delta t}$  взаимно независимых случайных величин, имеющих каждая среднее значение  $(p - q)\Delta x$

и дисперсию  $(1 - (p - q)^2)(\Delta x)^2 = 4pq(\Delta x)^2$ . Поэтому среднее значение и

дисперсии всего перемещения за время  $t$  приблизительно равны  $\frac{t(p - q)\Delta x}{\Delta t}$  и  $\frac{4pqt(\Delta x)^2}{\Delta t}$

соответственно. Чтобы получить разумные результаты, нужно устремить  $\Delta t$  и  $\Delta x$  к нулю так, чтобы среднее значение и дисперсия суммарного перемещения частицы оставались конечными при всех  $t$ . Конечность дисперсии

## Загальні питання технології збагачення

требує обмеженості величини  $\frac{(\Delta x)^2}{\Delta t}$ ; із кінченості математического очікування слідує, що  $p - q$  должно буть величиною порядку  $\Delta x$ . Поэтому

$$\frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} = 2D$$

положим  $\Delta t$ , где  $D$  – коэффициент диффузии;  $c$  – скорость течения.

Суммарное перемещение частицы за время  $t = n\Delta x$  определяется результатами  $n$  испытаний Бернулли, и поэтому предельный вид  $\pi_{x,n}$  определяется нормальным распределением. При фиксированном  $\Delta x$  суммарное перемещение равно сумме конечного числа независимых случайных величин и имеет математическое ожидание  $t(p - q)\Delta x / \Delta t = 2ct$  и дисперсию  $4pqt(\Delta x)^2 / \Delta t = 2Dt$ . Поэтому вероятность того, что в момент  $t$  перемещение частицы заключено между  $x_0$  и  $x_1$ , стремится к

$$(2\pi)^{-1/2} \int_{y_0}^{y_1} e^{-\lambda^2/2} d\lambda$$

$$y_1 = \frac{(x_1 - 2ct)}{(2Dt)^{1/2}}$$

где  $y_0 = \frac{(x_0 - 2ct)}{(2Dt)^{1/2}}$ . Что касается уравнения (2.1), то мы перейдем к обычным функциональным обозначениям и запишем это уравнение в виде  $\pi(x, t + \Delta t) = p\pi(x - \Delta x, t) + q\pi(x + \Delta x, t)$ . Разлагая функции от  $t + \Delta t$  и  $x + \Delta x$  в ряды Тейлора и сохраняя в этих разложениях члены не выше второго порядка, формально получаем

$$\Delta t \frac{\partial \pi(x, t)}{\partial t} = (q - p)\Delta x \frac{\partial \pi(x, t)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 \pi(x, t)}{\partial x^2} + \dots$$

В пределе получим

$$\frac{\partial \pi(x, t)}{\partial t} = -2c \frac{\partial \pi(x, t)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 \pi(x, t)}{\partial x^2}$$

Это хорошо известное уравнение Колмогорова-Фоккера-Планка для диффузии при наличии течения.

## Загальні питання технології збагачення

Учет всех рассмотренных сил также приводит к интегро-дифференциальному уравнению типа Фоккера-Планка. Кроме Тихонова О.Н. эти уравнения численно решались Рубинштейном Ю.Б. и Филипповым Ю.А. [15, 16]. Без применения аналитических результатов эти расчеты выполнялись практически "вручную" и не могли быть рекомендованы для практического применения.

Следуя идеям, заложенным в кривых извлечения Тромпа и исходя из решения уравнения Фоккера-Планка в качестве кривой извлечения [11, 13]

$$E = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right)$$

можно предложить:

Однако, поскольку идеальное извлечение ( $E = 1$ ) невозможно встретить на практике, логично ввести некий поправочный коэффициент  $E_{max}$ , представляющий собой максимальное извлечение экспериментальных данных. Тогда

$$E = E_{max} \left( 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right) \right)$$

Для получения зависимости между параметрами продифференцируем

полученное выражение:  $\frac{dE}{dx} = -\varphi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right) \frac{E_{max}}{sx} = -\frac{1}{sx} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{1}{s} \ln \frac{x}{m}\right)^2}{2}}$ . Значение

параметра  $m$  соответствует значению  $x$ , при котором  $E = 0,5$ . В точке  $x = m$

$-\frac{dE}{dx} \Big|_{x=m} = \frac{1}{sm} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = k$ , где  $k$  – модуль тангенса угла наклона кривой. Отсюда  $s = \frac{1}{km\sqrt{2\pi}}$ .

Для подбора начальных значений для параметров  $m$ ,  $k$ ,  $s$  можно предложить следующую схему: пусть  $x_1$  и  $x_2$  таковы, что  $E_1 = E(x_1)$  ближайшее

к  $E = 0,5$  справа, а  $E_2 = E(x_2)$  ближайшее к  $E = 0,5$  слева, тогда  $m = \frac{x_1 + x_2}{2}$ ,

$$k = \left| \frac{E_2 - E_1}{x_2 - x_1} \right|, \quad s = \frac{1}{km\sqrt{2\pi}}$$

Следует подчеркнуть, что использование полученных результатов особенно эффективно в случае несимметричных относительно центральной части кривых разделения. Такие кривые – это особенность работы

## Загальні питання технології збагачення

гидроциклонов. Их применение к данным промышленных испытаний позволяет сделать следующие выводы.

Решение основного уравнения массопереноса – Колмогорова-Фоккера-Планка приведено к аналитическому выражению для основного в обогащение понятия – кривой извлечения. Раскрыт физический смысл входящих в нее параметров. Получены способы расчета этой кривой как для разделения по крупности, так и для результатов разделения в гравитационных аппаратах. Характерно, что точность сравнения с экспериментом не зависит от симметричности кривой разделения, как это требуется по Тромпу.

Для всех вычислений проверялась гипотеза об адекватности теоретических результатов в сравнении с экспериментальными. Достоверность [14] получена на уровне 95%.

### Список литературы

1. **Фоменко Т.Г., Бутовецкий В.С., Погарцева Е.М.** Исследование углей на обогатимость. – М.: Недра, 1978. – 263 с.
2. **Коткин А.М., Геращенко К.Д.** Определение показателей выхода и качества товарных продуктов обогащения // Сб. Обогащение и брикетирование угля. – М., 1972. – № 6. – С. 76–79.
3. **Павлович В.И., Фоменко Т.Г., Погарцева Е.М.** Определение показателей обогащения углей. – М.: Недра, 1966. – 374 с.
4. **Тихонов О.Н.** Решение задач по автоматизации процессов обогащения и металлургии. – Л.: Недра, 1969. – 256 с.
5. **Барский М.Д.** Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. – М.: Недра, 1978. – 168 с.
6. **Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколин Ю.В.** Гравитационная классификация зернистых материалов. – М.: Недра, 1978. – 316 с.
7. **Гайденрайх Г.** Оценка промышленных результатов обогащения полезных ископаемых. – М.: ГНТИ по горн. делу, 1962. – 190 с.
8. **Самыгин В.Д., Митрофанов С.И., Барский М.Д.** Исследование полезных ископаемых на обогатимость. – М.: Недра, 1974. – 435 с.
9. **Толубинский Е.В.** Интегральный метод решения общей задачи; переноса тепла и вещества ДАН СССР, 160, Л<sup>о</sup> 6, 1965; Интегральный метод решения общей задачи диффузионного переноса тепла и вещества. Данный сборник, стр.13.
10. **Пожидаев В.Ф.** Статическое описание распределений смеси зерен // Горный журнал. – Свердловск: Издательство Вузов. 1974. – № 8. – С. 150–153.
11. **Гарус В.К., Грачев О.В., Пожидаев В.Ф., Полулях А.Д.** Формализация результатов разделительных процессов в углеобогащении. – Луганск: вид. ООО "НВФСТЕК". – 2003. – 176 с.
12. **Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А.** Математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 296 с.
13. **Пожидаев В.Ф., Пилов П.И., Полулях А.Д., Шандар С.В.** Аналитическое описание распределения зольности угля по фракциям // Наук.-техн. зб.: Збагачення корисних копалин.

## Загальні питання технології збагачення

– Дніпропетровськ: НГА, 2000. – № 8(49). – С. 12–18.

14. **Тутубалин В.Н.** Теория вероятностей. Краткий курс и научно-методические замечания. – Издательство московского университета, 1972. – 228 с.

© Полулях А.Д., Пожидаев В.Ф., Томилин В.Б., 2006

*Надійшла до редколегії 25.04.2006 р.*

*Рекомендовано до публікації*

УДК 622.794

**О.А. КРУТЬ**, канд. техн. наук

(Україна, Донецьк, НВО "Хаймек"),

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук,

**П.В. СЕРГЄЄВ**, канд. техн. наук

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

### АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ТВЕРДОЇ ФАЗИ ВОДОВУГІЛЬНОЇ СУСПЕНЗІЇ З ПОЗИЦІЙ ТЕОРІЇ ДЛФО

В умовах дефіциту паливних ресурсів і зміни цінової політики щодо нафти та газу в Україні все актуальнішим стає збільшення частки вугілля у паливно-енергетичному балансі. Однією з перспективних технологій є використання в якості палива висококонцентрованих водовугільних суспензій (ВВВС). Вона, по-перше, дозволяє одержувати стійке транспортабельне паливо, яке може спалюватись в топках котлів без попереднього зневоднення. По-друге, ця технологія відрізняється суттєво більшою екологічною чистотою [1, 2].

Разом з тим сама висококонцентрована водовугільна суспензія являє собою складний об'єкт, який характеризується багатьма фізико-хімічними факторами, що визначають її агрегативну і седиментаційну стійкість та реологічні властивості.

Високу стабільність і текучість суспензій обумовлюють їх тиксотропні властивості. Зокрема, в умовах турбулентних потоків обернена тиксотропта відновлюваність забезпечується, згідно теорії ДЛФО, коагуляцією дисперсної твердої фази суспензії у положенні так званої "другої потенційної ями" на кривих "сумарна енергія взаємодії ( $E_c$ ) – відстань між частинками ( $h$ )" [3–5].

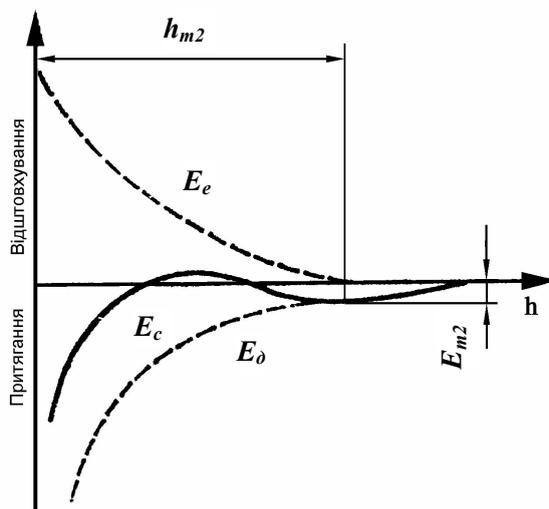
Теоретичні основи тиксотропних рідинних систем базуються на основних положеннях колоїдної хімії, розроблених в роботах [3, 4, 6, 7]. Теорія водовугільних суспензій наразі знаходиться на стадії накопичення емпіричного матеріалу і опрацювання робочих гіпотез.

Метою цієї роботи є оцінка базисних властивостей ВВВС і тенденцій їх зміни з позицій сучасної теорії стійкості ліофобних колоїдів (теорії ДЛФО).

## Загальні питання технології збагачення

Основними факторами, які визначають поведінку вугільної частинки у коагульованій структурі є: крупність частинки, гідрофільно-гідрофобний баланс поверхні частинок, загальний та електрокінетичний потенціал цієї поверхні.

Характеристики коагульованої тиксотропної водовугільної системи в цілому визначаються "глибиною"  $E_{m2}$  та координатою  $h_{m2}$  другої енергетичної ями (рис. 1) [4].



**Рис.1 Криві потенційної енергії взаємодії двох частинок в залежності від відстані**

Рис.1. Криві потенційної енергії взаємодії двох частинок в залежності від відстані між ними

Сумарна енергія  $E_c$  взаємодії двох сферичних частинок у рідині, згідно теорії ДЛФО, має дві складові – йонно-електростатичну  $E_e$  та молекулярну дисперсійну (Ван-дер-Ваальсову)  $E_d$ :

$$E_c = 2\pi \cdot \varepsilon_a \cdot r \cdot \varphi_\delta^2 \cdot \text{Ln}[1 + \exp(-\chi \cdot h)] - \frac{A \cdot r}{12h}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність води ( $\varepsilon_a = 7,26 \cdot 10^{-10}$  Ф/м);  $r$  – радіус сферичних вугільних часток, м;  $\varphi_\delta$  – потенціал дифузної частини подвійного електричного шару (ПЕШ) на поверхні вугільних частинок, В;  $\chi$  – зворотний дебаєвський радіус,  $\chi = 1/\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина дифузного шару ПЕШ (для більшості випадків  $\chi = 1 \cdot 10^8$  м<sup>-1</sup>);  $h$  – відстань між вугільними частинками, м;  $A$  – константа Гамакера, Дж.

Існування другої енергетичної ями кривої  $E_c(h)$  обумовлюється тим, що

## Загальні питання технології збагачення

крива  $E_d(h)$  убуває за степенним законом, а  $E_e(h)$  – за експоненціальним, тобто остання убуває швидше ніж  $E_d(h)$  (див. рис. 1).

Розглянемо вплив зазначених вище факторів на характер кривої  $E_c(h)$ . Для цього задамося вихідними параметрами рівняння (1).

Область варіювання крупності ( $d$ ) вугільних частинок прийнята 10–100 мкм, що відповідає основному раціональному діапазону крупності твердої фази ВВВС [1,2] і відповідає крупності грубодисперсних об'єктів колоїдної хімії [5]. Область зміни загального потенціалу поверхні вугільних частинок за [8, 9] прийнято 20–100 мВ. Константа Гамакера ( $A$ ) для гетерогенної вугільної поверхні, у зв'язку з різним гідрофільно-гідрофобним балансом, змінюється в межах  $(0,5-3,5) \cdot 10^{-19}$  Дж [4].

На рис. 2 подані криві  $E_c(h)$  Для різних крупностей вугільних частинок, одержані за допомогою програми MathCAD при потенціалі  $\varphi = 100$  мВ і константі Гамакера  $A = 3,5 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Як видно, зі збільшенням крупності вугільних зерен збільшується енергетичний бар'єр відштовхування і одночасно зростає глибина "другої потенціальної ями". Перше відмічене явище – збільшення енергетичного бар'єру відштовхування – обумовлює зростання агрегативної стійкості, так як цей бар'єр перешкоджає потраплянню і незворотній коагуляції частинок в "першій потенціальній ямі".

Друге явище – збільшення глибини "другої потенціальної ями" – сприяє зростанню стабільності тиксотропної структури. Чим більша "глибина" цієї потенціальної ями, тим більша енергія взаємодії між частинками в обернених коагуляційних структурах і тим більша стійкість ВВВС.

На рис. 3 подані криві  $E_c(h)$  при зміні сумарного потенціалу поверхні вугільних частинок в межах 20–100 мВ при крупності зерен вугілля  $d_3 = 100$  мкм і константі Гамакера  $A = 3,5 \cdot 10^{-19}$  Дж.

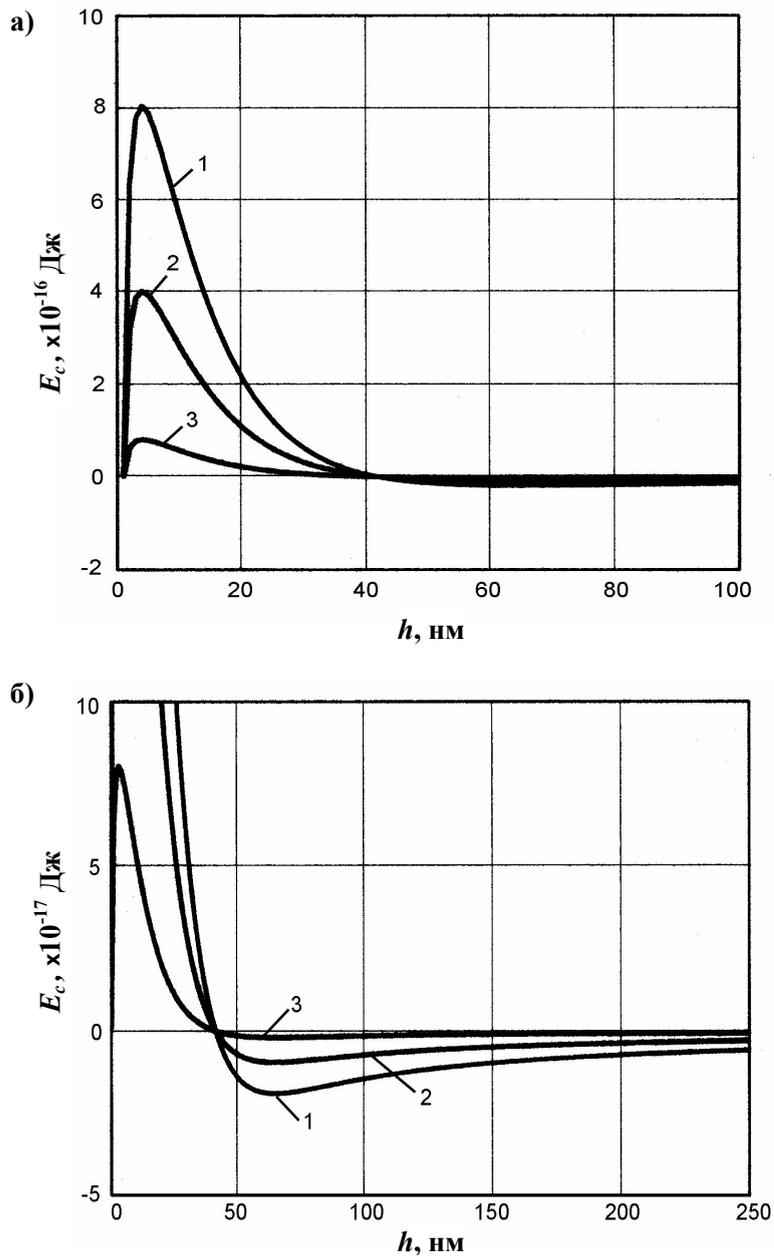
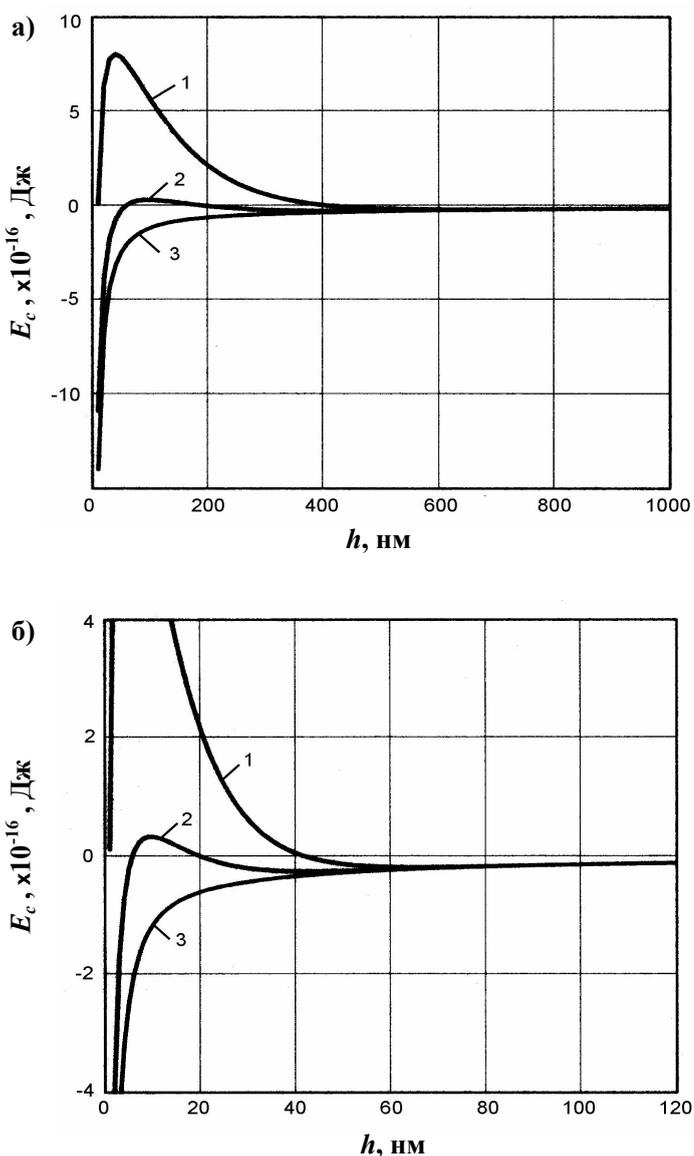


Рис. 2. Аналітичні залежності  $E_c(h)$  при  
 крупності вугільних частинок:  
 1 – 100 мкм; 2 – 50 мкм; 3 – 10 мкм;  
 а – загально-оглядовий масштаб кривих;  
 б – деталізований відносно осі  $E_c$

## Загальні питання технології збагачення

Аналіз одержаних кривих показує, що збільшення потенціалу вугільної поверхні приводить до появи і збільшення енергетичного бар'єру відштовхування. Цей бар'єр з'являється при  $\varphi \approx 50$  мВ. При  $\varphi < 50$  мВ водовугільна суспенція агрегативно нестійка. Її зерна під дією дисперсійних Ван-дер-Ваальсових взаємодій незворотно коагулюють між собою і суспенція розшаровується. При  $\varphi > 50$  мВ спостерігається два характерних ефекти. По-перше, суттєво зростає висота енергетичного бар'єру відштовхування, що відповідно збільшує агрегативну стійкість ВВВС. По-друге, координата другої енергетичної ями  $h_{m2}$  зміщується вправо. Це призводить до збільшення відстані між вугільними частинками, які фіксуються у другій потенційній ямі тиксотропної структури. Наслідком цього є збільшення для вугілля з відносно великим поверхневим потенціалом частки води в складі ВВВС (і відповідно зменшення концентрації в ній твердої фази).



а – загально-оглядовий масштаб кривих;  
б – деталізований відносно осі  $E_c$ .

Рис.3. Аналітичні залежності  $E_c(h)$  при зміні потенціалу поверхні вугільних частинок в межах 20–100 мВ:  
1 – 100 мВ; 2 – 50 мВ; 3 – 20 мВ;  
а – загально-оглядовий масштаб кривих;  
б – деталізований відносно осі  $E_c$ .

Розглянемо тепер вплив на енергетичний стан частинок ВВВС фактору гетерогенності вугільної поверхні. Ця гетерогенність (гідрофільно-гідрофобний баланс поверхні) в теорії ДЛФО оцінюється константою Гамакера (див. рівняння (1)).

## Загальні питання технології збагачення

Як відомо [4] чим сильніше взаємодіє вугільна фаза з водою, тим менше константа Гамакера  $A$ . А це означає, що сили притягання між частинками зменшуються. Тобто зростання значення константи  $A$ , відповідає збільшенню гідрофобних властивостей вугільної поверхні.

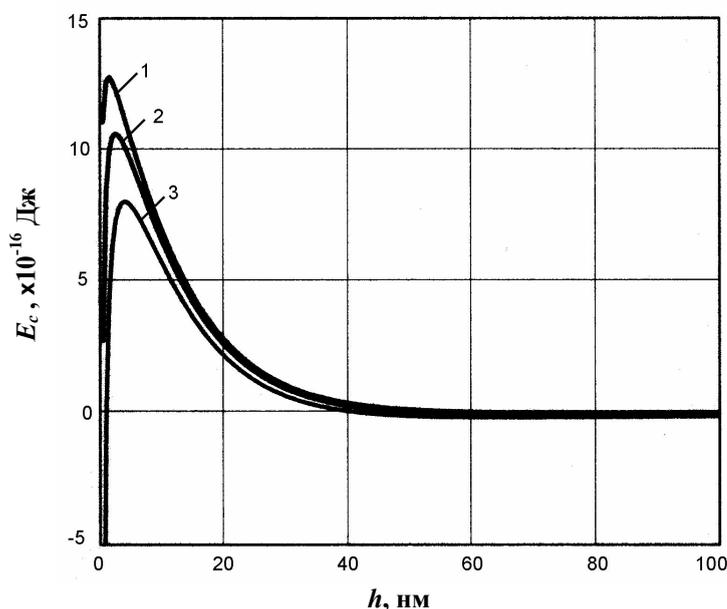


Рис.4. Аналітичні залежності  $E_c(h)$  при зміні гідрофільно-гідрофобного балансу поверхні вугільних частинок, константа Гамакера:  
1 –  $A = 0,5 \cdot 10^{-19}$  Дж; 2 –  $A = 1,5 \cdot 10^{-19}$  Дж; 3 –  $A = 3,5 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Одержані нами аналітичні криві  $E_c(h)|_{A = \text{var}}$ , а також  $d_3 = 100$  мкм,  $\varphi = 100$  мВ підтверджують цю тезу і показують, що збільшення гідрофобних властивостей вугільних частинок приводить до деякого зменшення висоти енергетичного бар'єру відштовхування і, відповідно, зменшення агрегативної стійкості ВВВС (рис. 4).

### Висновки

Застосування теорії ДЛФО для аналізу енергетичного стану твердої фази висококонцентрованих водовугільних суспензій дозволяє пояснити природу явищ, які мають місце при зміні крупності і поверхневого потенціалу вугільних частинок, гідрофільно-гідрофобного балансу їх поверхні.

1. Як показує виконаний аналіз одержаних нами енергетичних кривих  $E_c(h)$ , при відносно малих поверхневих потенціалах вугільних частинок

## Загальні питання технології збагачення

( $\varphi < 50$  мВ) водовугільна суспензія агрегативно нестійка.

2. Збільшення крупності вугільних частинок грубодисперсних колоїдних систем, а також їх потенціалу в області  $\varphi > 50$  мВ приводить до збільшення агрегативної стійкості водовугільних суспензій.

3. Для вугілля з поверхневим потенціалом  $\varphi > 50$  мВ спостерігається збільшення відстані між вугільними частинками при їх фіксації у "другій потенціальній ямі" енергетичних кривих  $E_c(h)$ , що обумовлює збільшення частки води в складі ВВВС.

4. Зростання гідрофобності вугільної поверхні приводить до деякого зменшення агрегативної стійкості ВВВС.

Виконаний аналіз стосується ВВВС, які знаходяться в статичних умовах – або в нерухомому стані, або в ламінарному русі. В наступній роботі ми розглянемо поведінку ВВВС в динамічних умовах.

Крім того, перспективним напрямком досліджень є аналіз способів і засобів регулювання поверхневих властивостей вугільних зерен з метою досягнення потрібних технологічних властивостей висококонцентрованої водовугільної суспензії.

### Список літератури

1. Делягин Г.Н. Водугольные суспензии – новый вид энергетического топлива // Строительство трубопроводов. – 1989. – № 8. – С.9–12.
2. Круть О.А. Водовугільне паливо. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
3. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. – 256 с.
4. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные и дисперсные системы. – М.: Химия, 1988. – 464 с.
5. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
6. Ефремов И.Ф. Периодические коллоидные структуры. – Л.: Химия, 1971. – 192 с.
7. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. – М.: Наука, 1986. – 206 с.
8. Саранчук В.И., Айруни А.Т., Ковалев К.Е. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. – К.: Наукова думка, 1988. – 192 с.
9. Зубкова Ю.Н. Исследование электрокинетических свойств ископаемых углей // Химия твердого топлива. – 1973. – № 4. – С. 16–19.

© Круть О.А., Білецький В.С., Сергеев П.В., 2006

*Надійшла до редколегії 24.04.2006 р.  
Рекомендовано до публікації к.т.н. Ю.Л. Папушиним*

УДК 622.776

**И.К. МЛАДЕЦКИЙ**, д-р техн. наук,

**П.И. ПИЛОВ**, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Технологическая линия обогащения полезного ископаемого представляет собой инерционный объект и есть фильтр высоких частот показателей качества, которые существуют во входном потоке руды. Это отрицательно сказывается на абсолютных значениях показателей качества концентрата, т.е. уменьшает их значение, что повышает расход ресурсов на достижение требуемых значений.

Исследования обогатительных технологий проводились в условиях, близких к статическому состоянию. Системы управления создавались для отдельных аппаратов или отдельных блоков. С помощью корреляционных функций можно было только определить периоды времени достоверного опробования [1]. Таким образом, технология обогащения полезных ископаемых как единый динамический объект исследованию не подвергалась.

В настоящее время появились научные разработки, которые позволяют на основании параметров отдельных аппаратов получать характеристики технологической линии в целом [2]. Рассмотрим технологию обогащения железных руд. Она строится по принципу последовательного расположения блоков измельчения и разделения. Допустим таких блоков три, и они идентичны. Отдельный блок, схема которого изображена на рисунке, включает подготовку сырья с помощью замкнутого цикла измельчения с классификатором и блок магнитных сепараторов.

Для разделительных процессов наиболее удобной математической характеристикой оказалась сепарационная  $P(\alpha)$ , которая отражает вероятность перехода узких фракций исходного продукта в обогащенный [4] и экспериментально определяется как отношение содержания фиксированной фракции на выходе аппарата к его входу. Для описания измельчения авторами предложена характеристика  $A(\alpha)$ , которая отражает также отношение содержаний узких фракций на входе и выходе измельчения. Такое описание удобно при анализе цепочечных схем, к которым можно отнести и схему обогатительного процесса. Таким образом, располагая характеристиками классификации  $P_2(\alpha)$  и сепарации  $P_3(\alpha)$ , и измельчительной  $A(\alpha)$ , уже можно определить показатели обогащенного продукта, если известны показатели руды. Здесь еще необходимо согласование измельчения и сепарации с помощью модели раскрытия  $R(\alpha, d)$ . В результате характеристика блока будет выглядеть так:

## Загальні питання технології збагачення

$$P_B(d, \alpha) = \frac{A_1(d)P_2(d)}{1 - A_1(d)(1 - P_2(d))} R(d, \alpha) P_3(\alpha) \quad (1)$$

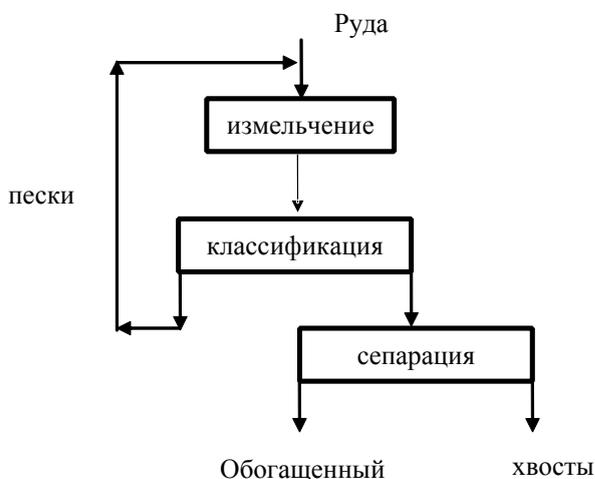


Схема технологического блока обогащения руды

Эта формула отражает статическое преобразование руды заданного гранулометрического состава  $d$  и с заданным содержанием ценного компонента  $\alpha$ .

Наиболее простой динамической функцией объекта является передаточная функция [3]  $W(p)$ , которая отражает отношение выходного и входного показателей в переходном процессе, т.е. аналогично сепарационным характеристикам в статике. На этом основании и в соответствии с законами преобразования показателей руды в показатели концентрата, вместо статических функций в выражение (1) можно подставить динамические и получить передаточную функцию технологического блока

$$W_B(p) = \frac{W_1(p)W_2(p)W_3(p)}{1 - W_1(p)W_2^1(p)} K_1 K_2 K_3 K_4 \quad (2)$$

где  $W_2^1$  – передаточная функция по каналу вход классификатора – пески;  $K_1 \dots K_4$  – статические коэффициенты передачи (выход продукта или  $\beta/\alpha_{II}$ , или раскрытие, или отношение  $d_{вых}/d_{вх}$ ).

Поскольку в данном случае нас интересуют только динамические параметры, то произведение всех коэффициентов примем равным единице.

## Загальні питання технології збагачення

Объекты обогатительной технологии обычно одноемкостные, и поэтому могут быть представлены апериодическими звеньями первого порядка

$W(p) = \frac{1}{Tp+1}$ , а постоянные времени  $T$  зависят от производительности  $Q$  и объема аппарата  $V$ , т.е.  $T = V/Q$ .

В результате выражение (2) после тождественных преобразований принимает вид:

$$W(p) = \frac{(T_1p+1)(T_2p+1)}{((T_1p+1)(T_2p+1)-1)(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)} \quad (3)$$

Индексы в выражении (3) соответствуют таким аппаратам: 1 – мельница, 2 – классификатор, 3 – сепаратор.

Дальнейшие действия с этой функцией всесторонне рассмотрены в теории управления и заключаются в исследовании вида переходной функции и частотной характеристики.

Предположим интерес представляет влияние изменчивости качественных показателей входного потока руды на абсолютное значение качества концентрата. С этой целью необходимо выполнить перемножение в числителе и знаменателе и привести подобные члены. Получим дробно рациональную функцию

$$W(p) = \frac{b_1p^2 + b_2p + 1}{a_1p^5 + a_2p^4 + a_3p^3 + a_4p^2 + a_5p + 1}$$

В эту функцию вместо комплексного аргумента  $p$  подставляем мнимый оператор  $j\omega$  ( $\omega$  – частота) и получаем частотную характеристику объекта выполнив возведение в степень и приводя подобные члены, получим комплексные числа в числителе и знаменателе. Далее, умножая числитель и знаменатель на комплексное число, сопряженное знаменателю получим новое комплексное число вида:

$$W(j\omega) = \frac{A(\omega)}{C(\omega)} + j \frac{B(\omega)}{C(\omega)} = A^{(1)}(\omega) + jB^{(1)}(\omega)$$

в котором составляющие будут представлять алгебраические дроби. В конце концов получаем величину  $A_1(\omega) = \sqrt{A^{(1)2}(\omega) + B^{(1)2}(\omega)}$ , которая есть амплитудная частотная характеристика объекта, отражающая, в случае рассмотрения технологии обогащения полезного ископаемого, изменение

## Загальні питання технології збагачення

качественных показателей концентрата от изменчивости показателей входного потока руды.

Обычно с увеличением  $\omega$  величина  $A_1(\omega)$  уменьшается и при  $\omega \rightarrow \infty$ ,  $A_1(\omega) \rightarrow 0$ . Таким образом, если показатель качества руда на входе технологии изменяется с некоторой частотой  $\omega$ , то это уменьшает возможное значение качества концентрата. Когда технологический блок производительностью 100 т/ч состоит измельницы  $3 \times 3,5$ , м двухспирального классификатора и сепаратора ПБМ, то частота  $3 \text{ ч}^{-1}$  начинает существенно влиять на содержание ценного компонента в обогащенном продукте.

### Список литературы

1. **Марюта А.Н.** Автоматическая оптимизация обогатительных процессов на магнитообогатительных фабриках. – М.: Недра, 1976. – 376 с.
2. **Кармазин В.В., Младецкий И.К., Пилов П.И.** Технологические расчеты показателей обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та. – 2005. – 225 с.
3. **Иванов А.А.** Теория автоматического управления и регулирования. – М.: Недра, 1970. – 476 с.
4. **Пилов П.И.** Особенности мокрой магнитной сепарации флокулирующих материалов. // Горн. информ.-аналит. бюл. – 1995. – Вып.6. – С. 62–63.

© Младецкий И.К., Пилов П.И., 2006

*Надійшла до редколегії 21.04.2006 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Франчу ком*

УДК 622.7

### **О.В. ИЩЕНКО**

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

## **ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ДИАПАЗОНОВ КРУПНОСТИ МАШИННЫХ КЛАССОВ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ УГЛЯ**

Анализ угольной промышленности Украины за последние годы показывает увеличение зольности рядового угля до 35–45%, а в некоторых случаях и более. Так же еще одной из проблем является распространение павлоградских углей по ОФ Украины, с наличием в них глинистых вмещающих пород, которые размокают, ухудшая показатели всех технологических процессов. Особенно это влияет на обогащение, классификацию и обезвоживание мелких классов угля.

Проведенные опыты по определению скоростей падения угольных частиц показали, что с увеличением количества илов скорость падения угольных частиц уменьшается. Что подтверждает не только общеизвестные принципы, но

## Загальні питання технології збагачення

и влияет на разделение. Нами проделан расчет по уже известным формулам: Фоменко, Стокса, Алена, Лященко, Риттингера. Анализируя результаты, можно сделать выводы, что наиболее близкие значения к опытным данным получились при расчете по методу Фоменко и Лященко, что видно из графиков (рис 1,2).

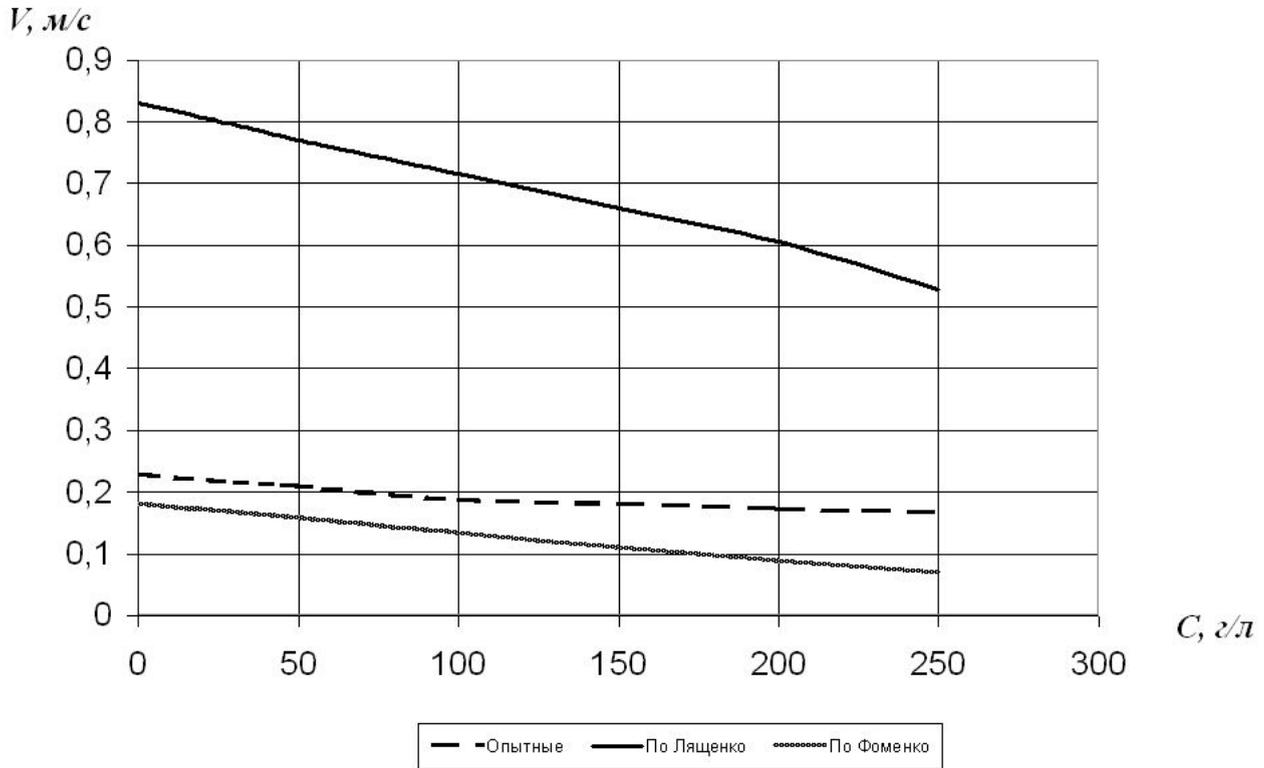


Рис. 1. Зависимости скорости падения угольных частиц от количества твердого в воде

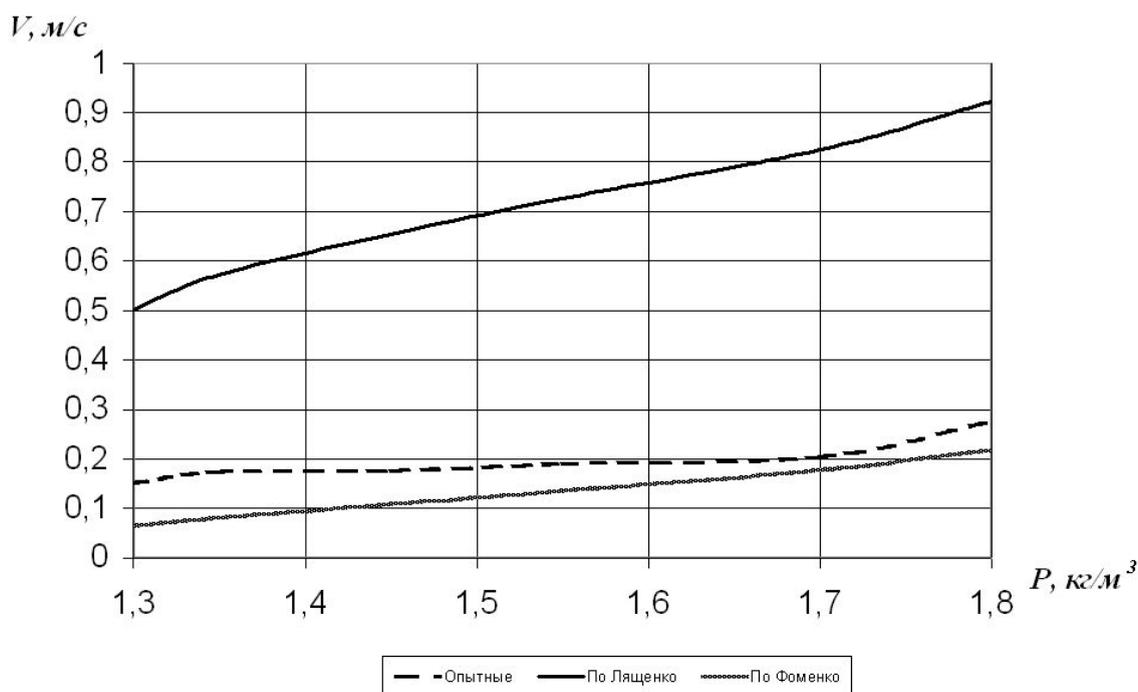


Рис. 2. Залежності швидкості падіння вугільних частинок від щільності

Из приведенного видно, что предпочтительнее, для расчетов скоростей падения зерен, использовать формулу Фоменко, так как разница между опытными и расчетными значениями с использованием формулы Фоменко наименьшая (табл. 1).

Формула Фоменко:

$$V_0 = kg \frac{(\delta - \Delta)d\lambda}{\mu} ; \text{ м/с}$$

где  $\lambda$  – толщина пограничного слоя;  $k$  – поправочный коэффициент;  $g$  – скорость свободного падения,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\mu$  – вязкость жидкости,  $\text{Н} \cdot \text{сек/м}^2$ ;  $\Delta$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $d$  – диаметр зерна, м;  $\delta$  – плотность зерна,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\lambda$  и  $k$  – зависят от диаметра и скорости падения зерна кварца.

Так как разница между опытными и расчетными значениями с использованием формулы Фоменко наименьшая (табл. 1).

Таблица 1

Плотность зерна	Количество твердого в воде, г/л						
	0	30	50	100	150	200	250
1,3	0,070	0,066	0,067	0,082	0,095	0,107	0,119
1,3–1,4	0,071	0,078	0,083	0,084	0,098	0,11	0,123
1,4–1,5	0,042	0,051	0,057	0,058	0,073	0,087	0,103

## Загальні питання технології збагачення

1,5–1,6	0,032	0,035	0,035	0,043	0,062	0,077	0,095
1,6–1,8	0,005	0,008	0,008	0,009	0,032	0,05	0,071
+1,8	0,063	0,05	0,055	0,042	0,055	0,063	0,072
Среднее	0,0472	0,048	0,0508	0,053	0,0692	0,082	0,097

Поэтому для получения более близких, к опытным, результатов нужно ввести в формулу Фоменко поправочный коэффициент  $l$ , который будет учитывать влияние содержания илов на скорость падения частиц. И тогда скорректированная формула Фоменко примет вид:

$$V_0 = kg \frac{(\delta - \Delta)d\lambda}{\mu} + l \quad ; \text{ м/с}$$

где  $l$  – поправочный коэффициент учитывающий влияние содержания илов.

Наличие илов меняет скорости движения частиц в суспензиях и влияет так же и на диапазон границ машинных классов.

Создавая шкалу классификации, с более узкими машинными классами, в первую очередь необходимо определить нижнюю границу крупности гравитационного обогащения. Определить ее можно исходя из разделительной способности флотации.

Руководствуясь данными гранулометрического состава отходов флотации коксовых фабрик Украины, можно прийти к выводу, что наиболее эффективно флотация работает на машинном классе с верхней границей крупности 0,25-0,5мм. Классы большей крупности флотируются с меньшей эффективностью и имеют в отходах значительные потери горючей массы.

Таким образом целесообразно принять верхний предел флотационного обогащения равным:  $d = (0,25 + 0,5)/2 = 0,375$  мм. Этот предел будет также являться нижним пределом крупности угля при гравитационном методе обогащения.

Практически же, любой машинный класс имеет верхнюю и нижнюю границы крупности, которые обосновываются скоростями падения согласно закону равнопадаемости.

Алгоритм определения диапазонов крупности машинных классов углявключает в себя:

- 1.Определение скорости падения породного зерна.

- 2.Руководствуясь законом равнопадаемости, что равнопадающими называются такие минеральные зерна, которые при разной плотности обладают одинаковой конечной скоростью падения в одной и той же среде, приравниваем скорости падения породного зерна и угольного.

- 3.Находим диаметр угольного зерна. Этот диаметр и будет являться верхней границей данного диапазона крупности машинного класса.

- 4.Принимаем полученный диаметр зерна как диаметр породной частицы и

## Загальні питання технології збагачення

проводим расчет заново, таким образом, определяется следующий диапазон крупности машинного класса.

В табл. 2 приведены полученные расчетным путем по формулам: Стокса, Алена, Лященко, Риттингера, Фоменко, Автора диапазоны машинных классов для ЦОФ "Чумаковская" шахты "Красноармейская-Западная №1, уголь марки "К".

Таблица 2

Методы								
Фоменко			Стокса			Алена		
№	Класс, мм	γ, %	№	Класс, мм	γ, %	№	Класс, мм	γ, %
1	-0,375	14,3	1	-0,375	14,3	1	-0,375	14,3
2	0,375-0,577	3,2	2	0,375-0,658	3,5	2	0,375-0,794	4,9
3	0,577-0,888	6,0	3	0,658-1,157	9,7	3	0,794-1,682	13,8
4	0,888-1,368	7,5	4	1,157-2,032	11,5	4	1,682-3,564	20,0
5	1,368-2,107	11,0	5	2,032-3,569	15,2	5	3,564-7,553	13,2
6	2,107-3,246	11,2	6	3,569-6,269	10,6	6	7,553-16,008	10,4
7	3,246-5,001	9,1	7	6,269-11,012	7,0	7	16,008-33,928	13,6
8	5,001-7,705	5,5	8	11,012-19,343	11,2	8	33,928-71,91	8,3
9	7,705-11,871	5,9	9	19,343-33,978	8,0	9	71,91-152,413	1,5
10	11,871-18,29	9,5	10	33,978-59,686	6,4		Итого	100
11	18,29-28,18	6,3	11	59,686-104,84	2,6			
12	28,18-43,418	4,7		Итого	100			
13	43,418-66,895	4,8						
14	66,895-103,06	1,0						
	Итого	100						

*Продолжение табл. 2*

Лященко			Автора			Риттингера		
№	Класс, мм	γ, %	№	Класс, мм	γ, %	№	Класс, мм	γ, %
1	-0,375	14,3	1	-0,375	14,3	1	-0,375	14,3
2	0,375-1,5	13,0	2	0,375-1,428	22,7	2	0,375-1,157	7,2
3	1,5-8,3	37,7	3	1,428-3,30	20,5	3	1,157-3,57	29,1
4	8,3-67	29,8	4	3,30-6,60	10,5	4	3,57-11,015	18,9
5	67-186	5,2	5	6,60-12,59	7,5	5	11,015-33,988	19,6
	Итого	100	6	12,59-22,35	13,0	6	33,988-104,87	10,9
			7	22,35-38,00	7,0		Итого	100
			8	38,00-62,83	3,5			
			9	+62,83	1,0			
				Итого	100			

Выход диапазонов машинных классов определяется по кривой рисунка,

## Загальні питання технології збагачення

построенной на основании данных гранулометрического состава ЦОФ "Чумаковская" шахты "Красноармейская-Западная №1, уголь марки "К". (табл. 3).

Таблица 3

Класс, мм	$\gamma$ , %	$\gamma$ по "–", %
50-100	5,31	100,0
25-50	7,34	94,69
13-25	11,39	87,35
10-13	5,35	75,96
6-10	6,42	70,61
3-6	17,45	64,19
1-3	23,20	46,74
0,5-1	11,88	23,54
0-0,5	11,66	11,66
Итого	100,0	

Объединим некоторые машинные классы, тем самым уменьшив их количество и подсчитаем выхода (табл. 4). Руководствуясь ГОСТом, определяющим стандартный размер сит, для не шламового продукта (т.е. +4 мм) и используя шпальтовые сита, для шламового продукта (т. е. –4 мм). А также исходя из практических данных Укрнииуглеобогащения, о том что выход машинных классов при котором появляется экономическая целесообразность его отдельного обогащения составляет: не менее 15 % для не шламового продукта и не менее 5% для шламового продукта.

Таблица 4

Методы											
Фоменко				Стокса				Алена			
№	d отв. сита	Класс, мм	$\gamma$ , %	№	d отв. сита	Класс, мм	$\gamma$ , %	№	d отв. сита	Класс, мм	$\gamma$ , %
1.	10	+11,87	26,3	1.	10	+11,01	28,2	1.	15	+16,0	23,4
2.	3,3	3,25-11,87	20,5	2.	3,6	3,57-11,01	17,6	2.	3,6	3,56-16,0	23,6
3.	2,1	2,11-3,25	11,2	3.	2,0	2,03-3,57	15,2	3.	1,7	1,68-3,56	20,0
4.	1,4	1,37-2,11	11,0	4.	1,2	1,16-2,03	11,5	4.	0,4	0,4-1,68	18,7
5.	0,9	0,89-1,37	7,5	5.	0,4	0,4-1,16	13,2	5.		-0,4	14,3
6.	0,4	0,4-0,89	9,2	6.		-0,4	14,3			Итого	100
7.		-0,4	14,3			Итого	100				
Итого			100								

*Продолжение табл. 4*

Методы											
Лященко				Автора				Риттингера			
№	d отв. сита	Класс, мм	$\gamma$ , %	№	d отв. сита	Класс, мм	$\gamma$ , %	№	d отв. сита	Класс, мм	$\gamma$ , %
1.	8	+8,3	35,0	1.	13	+12,6	24,5	1.	10	+11,0	30,5
2.	1,5	1,5-8,3	37,7	2.	3,3	3,3-12,6	18,0	2.	3,6	3,57-11,0	18,9
3.	0,4	0,4-1,5	13,0	3.	1,4	1,43-3,3	20,5	3.	1,2	1,16-3,57	29,1
4.		-0,4	14,3	4.	0,4	0,4-1,43	22,7	4.	0,4	0,4-1,16	7,2

## Загальні питання технології збагачення

	Итого	100	5.		-0,4	14,3	5.		-0,4	14,3
					Итого	100			Итого	100

Из табл. 4 видно, что по 3-м методам расчета получается пять машинных классов.

Таким образом, исходя из современного уровня техники и технологии углеобогащения и выполненных исследований, рекомендовано осуществлять обогащение рядового угля пятью машинными классами, а именно: +13; 3,3–13; 1,4–3,3; 0,4–1,4; –0,4. В этом случае граница между крупным и мелким машинным классом не только совпадает со стандартным основным рядом отверстий сит и нижней границей сортового энергетического топлива, но и реально существующей в настоящее время практикой подготовки крупного машинного класса.

© Ищенко О.В., 2006

*Надійшла до редколегії 25.04.2006 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*