

УДК 622.771.6

## Гравитационное обогащение ультратонкого угольного шлама

Приведены теоретическое обоснование и практическое подтверждение возможности обогащения ультратонкого каменного угля крупностью менее 0,1 мм гравитационными методами. Эффективность центробежной сепарации улучшается предварительным обесшламливанием угольного шлама и последующей его классификацией на узкие машинные классы, что согласно принципу однофункциональности уменьшает влияние крупности на разделение частиц по плотности. Рентабельность технологии определяется обогащением шлама не только по зольности, но и по пиритной сере.

Разделение ультратонкого каменного угля крупностью менее 0,1 мм происходит на пределе технологических возможностей существующих методов обогащения из-за низкой контрастности разделительных признаков, прежде всего крупности и плотности частиц.

Уголь крупностью менее 0,1 мм обогащается обычно флотационным или гравитационным методом при условии предварительного обесшламливания материала в противоточных гидрокласификаторах и (или) гидроциклонах. Флотация проявляет высокую селективность разделения при обработке хорошо раскрытых зерен, а при наличии в исходном шламе значительного количества промпродуктовых фракций эффективность процесса резко снижается. Технологической альтернативой флотации являются гравитационные технологии с применением низко- и высокоинтенсивных центробежных полей. В первом случае

уместно использовать орбитальные шлюзы Мозли и винтовые сепараторы, а во втором – центробежные отсадочные машины Келси и концентраторы Нелсон. Теоретическое и практическое обоснование такой концепции – предмет настоящей работы.

**Теоретическое обоснование центробежного обогащения угольного шлама.** Возможность улучшения процесса разделения угольных и неугольных частиц вытекает из классических формул Стокса и Ньютона – Риттингера. По Стоксу [1] скорость осаждения частицы описывается выражением

$$v_0 = \frac{gd^2(\delta_T - \delta_{cp})}{18\mu},$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;  
 $d$  – диаметр частицы, м;  
 $\delta_T$  и  $\delta_{cp}$  – плотности частицы и среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\mu$  – динамическая вязкость среды,  $(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$ .

Данное выражение наиболее адекватно описывает ламинарное осаждение ультратонких частиц крупностью менее 0,1 мм.

Для условий центробежного поля гравитационное ускорение заменим на центробежное  $rw^2$ , а уравнение движения сферической минеральной частицы при радиусе вращения  $r$  по Стоксу запишем в виде

$$\frac{\pi}{6}d^3(\delta_T - \delta_{cp})rw^2 - 3\pi\mu d \frac{dr}{dt} = \frac{\pi}{6}d^3\delta_T \frac{d^2r}{dt^2}.$$



**А. С. КИРНАРСКИЙ,**  
 доктор техн. наук  
 («Инжиниринг Доберсек ГмбХ»,  
 Германия)

Пренебрегая инерционной составляющей в правой части данного уравнения, получаем

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d^2(\delta_{\tau} - \delta_{cp})rw^2}{18\mu} = \frac{d^2(\delta_{\tau} - \delta_{cp})g}{18\mu} \frac{rw^2}{g} = v_0 \frac{rw^2}{g}.$$

Таким образом, текущее значение скорости в центробежном поле – это скорость осаждения в гравитационном поле с ускорением  $g$ , умноженная на фактор разделения  $rw^2/g$ , который и определяет интенсивность центробежного поля.

Увеличивая частоту вращения, усиливаем напряженность или интенсивность центробежного поля, по аналогии с тем, как это происходит в электрическом поле. Уменьшая радиус вращения и, как следствие, увеличивая кривизну траектории разделения, повышаем градиент поля за счет усиления его неоднородности, т. е.  $\text{grad } H > 0$ . Кроме того, на силу гравитационного воздействия влияет также крупность, плотность и форма частиц. При этом плотность частиц постоянна, крупность и форма изменяется в широких пределах.

В условиях центробежного поля высокой интенсивности (ЦПВИ) с ускорением 20 – 200  $g$  характерно увеличение скорости осаждения частиц на два – три порядка, что позволяет эффективно разделить ультратонкие минеральные разности по плотности.

Аналитические исследования [2] подтверждают резкое возрастание скорости осаждения частиц угля, сланца и пирита плотностью соответственно 1,3; 2,5 и 4,8  $\text{т/м}^3$  при использовании ЦПВИ с ускорением 200  $g$  по сравнению с обычным полем. Применение такого поля позволяет усилить разность скоростей конкурирующих минералов, что свидетельствует об улучшении условий гравитационной сепарации.

**Практика центробежного обогащения угольного шлама.** При обработке минеральных суспензий в центробежном поле следует различать вращательное движение потока самой суспензии и вращение рабочего органа сепаратора. В первом случае поток приобретает вращательное движение посредством конструкции разделительного аппарата, а необходимая интенсивность центробежного поля обеспечивается напором на входе в аппарат. Пример такого разделительного устройства – гидроциклон, работающий в паре с насосом. Во втором случае вращение сообщается потоку с помощью ротора, частота вращения которого предопределяет интенсивность центробежного поля. Рассмотрим подробнее возможности реализации центробежного поля высокой интенсивности для обогащения ультратонкого угольного шлама. Прежде всего обратимся к ап-

паратам со слабым центробежным полем – типа орбитальных шлюзов Мозли.

Орбитальный шлюз Мозли представляет собой концентрационный стол, свернутый в цилиндр, который устанавливают наклонно, при вращении ему сообщаются колебания. Он работает с незначительным добавлением промывочной воды. Интенсивность поля незначительная (25  $g$ ). Золоудаление при обогащении угля пласта Питтсбург № 8 крупностью 0,0 – 0,25 мм составило 72,9 %, а степень сокращения содержания пиритной серы достигала 64,4 % [6]. Отличительная особенность этих сепараторов – низкая производительность – 0,1– 0,3  $\text{т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Более сильные центробежные поля достигаются в отсадочных машинах Келси. Испытания центробежной отсадочной машины Келси [3] на угольном шламе соответствуют технологическим показателям, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Класс крупности, мм	Плотность разделения, $\text{кг/м}^3$	Средневероятное отклонение $E_{pm}$ , $\text{кг/м}^3$
0,25 – 0,50	2060	120
0,106 – 0,25	2060	120
0,063 – 0,106	1920	210
0,038 – 0,063	1970	280

Настоящие данные получены в центробежном поле, интенсивность которого составляла 200  $g$ . Содержание твердого в питании таких аппаратов колеблется от 7 до 12 %, частота пульсаций поддерживается в пределах 15 – 25 Гц. Для успешного разделения материала по плотности в таких отсадочных машинах требуется его предварительное обесшламование и классификация по крупности на узкие машинные классы, что отвечает принципу однофункциональности [4], согласно которому максимальная эффективность сепарации достигается по одному разделительному признаку. Обесшламывать предпочтительнее в автоматизированных гидроциклонных установках типа «ContiClass®».

Центробежные поля большей интенсивности создаются в концентраторах Нелсон и Фалькон. Общее для таких аппаратов – использование вращающейся вокруг своей оси с постоянной скоростью чаши цилиндрической или конической формы с канавками в боковых стенках, предназначенных для накопления удельно-тяжелых частиц обогащаемого материала. Процесс обогащения происходит в водной среде, при этом содержание твердого в питании 10 – 15 %. Кроме того, в сепараторах с псевдооживленным слоем (например, в концентраторах Нелсон) подается

дополнительная, так называемая оживающая вода, в зону разделения через перфорации в канавках чаши. Расход этой воды в 2 – 3 раза больше расхода исходной пульпы, что является недостатком данного прибора, так как вызывает обводненность технологического передела. Наиболее результативно концентратор Нелсон показал себя при обогащении угольного шлама крупностью 0,037 – 0,60 мм. Нижний предел крупности для такого оборудования составляет 0,037 мм. При обогащении угля этот предел может быть повышен до 0,063 мм, так как материал тоньше указанной крупности имеет зольность, которая позволяет сбросить его в отходы без дополнительной обработки. Так, седиментационный анализ в аппарате АДАП шламовых отходов ЦОФ «Кураховская» (слив гидроциклонов диаметром 350 мм) обнаружил следующую зольность классов (табл. 2).

Таблица 2

Класс крупности, мм	Первая серия опытов		Вторая серия опытов	
	Выход, %	Зольность, %	Выход, %	Зольность, %
Более 0,065	6,76	99,70	13,50	88,41
0,04 – 0,065	1,79	51,12	0,79	88,50
0,02 – 0,04	10,16	69,67	6,68	67,52
0,01 – 0,02	18,35	55,90	16,02	54,17
0,00 – 0,01	62,94	69,84	63,01	69,84

Из представленной характеристики крупности угольного шлама видно, что основная масса частиц (63 %) представлена высокодисперсным илистым материалом, зольность которого достигает 70 %. Промпродуктовая часть зольностью 55,48 % в составе отходов по первой серии опытов на уровне 20,14 %, а по второй серии такой фракции зольностью 54,17 % содержится всего 16,02 %. Следовательно, в данном случае подвергать обогащению ультратонкий уголь крупностью менее 0,063 мм только по зольности малоперспективно ввиду низкой рентабельности такой переработки. Тем не менее при назначении нижней границы разделения ультратонкого угля в каждом конкретном случае следует принимать во внимание фактический гранулометрический состав угольного шлама и данные опытного обогащения, а при расчете экономической эффективности целесообразно руководствоваться не только зольностью продуктов разделения, но и сокращением содержания в них пиритной серы. Действительно, при такой дисперсности частиц возрастает раскрытие пиритных включений в составе угля и с учетом плотности пирита ( $4,8 - 5 \text{ т/м}^3$ ) предо-

ставляется возможность их выделения гравитационными методами. Так, по данным [5], удаление пиритной серы в концентраторе Фалькон достигает 98,1 %.

Обогащению подвергался высокосернистый уголь крупностью 0,037 – 0,21 мм, исходная зольность которого составляла 21,7 %, а содержание пиритной серы – 3,04 %. Интересно отметить, что для каждой крупности зерен существует оптимальная интенсивность центробежного поля. Так, для зернистого угольного шлама крупностью 0,21 – 0,60 мм фактор разделения не должен превышать 60 g, достигая оптимума на уровне 50 g. Для тонкозернистого материала крупностью 0,037 – 0,21 мм уместно применять центробежные поля более высокой интенсивности – порядка 125 g [5]. Кроме того, эффективная сепарация требует предварительного обесшламливания по крупности 0,037 мм. Таким образом, успешное разделение материала по плотности в концентраторах Нелсон или Фалькон, как и в случае отсадочных машин, требует предварительное его обесшламливание и классификацию по крупности на узкие машинные классы, что отвечает принципу однофункциональности [4].

Технологическая эффективность разделения угольного шлама, которая оценивается показателем средневероятного отклонения  $E_{pm}$ , для центробежного обогащения в аппаратах Нелсон составляет 100 – 200 кг/м<sup>3</sup> при крупности материала 0,1 – 0,3 мм.

При обработке крупнозернистого шлама крупностью более 0,3 мм можно эффективно применять винтовые сепараторы ( $E_{pm} = 120 \dots 200 \text{ кг/м}^3$ ), концентрационные столы ( $E_{pm} = 150 \dots 200 \text{ кг/м}^3$ ), водные циклоны ( $E_{pm} = 200 \dots 250 \text{ кг/м}^3$ ).

При определении рентабельности применения центробежного обогащения ультратонкого угля следует учитывать ориентировочные капитальные затраты, а также принимать во внимание не только обогащение угольного шлама по зольности, но и по пиритной сере, что особенно актуально для украинских каменных углей, отличающихся высоким содержанием серы. Производительность и капитальные затраты центробежной технологии [6] приведены в табл. 3.

Таблица 3

Тип сепаратора	Удельная производительность, т/(м <sup>2</sup> ·ч)	Приведенные капитальные затраты, тыс. долл.
Фалькон	4,9 – 14,6	200 ( $Q > 50 \text{ т/ч}$ )
ОМ Келси	14,6 – 19,5	150 ( $Q = 5 \dots 15 \text{ т/ч}$ )
Нелсон	1,0 – 3,9	150 ( $Q = 20 \text{ т/ч}$ )
Мозли	0,1 – 0,3	200 ( $Q = 5 \dots 15 \text{ т/ч}$ )

Более рентабельной по сравнению с центробежными концентраторами может быть мокрая винтовая сепарация (МВС), механизм действия которой основан на поперечной циркуляции в слабом центробежном поле. При обогащении ультратонкого угольного шлама крупностью менее 0,1 мм содержание твердого в исходном продукте МВС должно быть 140 – 160 г/л. Для повышения времени обработки материала предпочтительнее использовать сепараторы в шести- или семивитковом исполнении. Диаметр аппарата не должен превышать 1000 мм.

**Выводы.** Разделение ультратонкого угля крупностью менее 0,1 мм возможно в центробежных полях высокой интенсивности (20 – 300 g), позволяющих повысить контрастность в скоростях падения концентрирующих минералов на несколько порядков.

Технология центробежного обогащения включает предварительное обесшламливание исходного угля, его классификацию на узкие классы с последующей обработкой каждого из них при определенной интенсивности центробежного поля. Ультратонкий угольный шлам целесообразно обогащать посредством мокрой винтовой сепарации на разбавленных суспензиях с использованием многовитковых винтовых сепараторов. Нижний предел

крупности эффективного обогащения ультратонкого угля в центробежных полях высокой интенсивности составляет 0,037 мм.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Stokes, Sir G. G.* Mathematical and Physical // Cambridge University Press, 1891. – Paper III. – 320 pp.
2. *McCabe, W. L., Smith, J. C.* Unit Operations of Chemical Engineering. – New York. – McGraw-Hill Book Company, 1976. – 1028 pp.
3. *Riley, D. M., Firth, B. A., Lockart, N. C.* Enhanced Gravity Separation // Proceedings, High Efficiency Coal Preparation: An International Symposium, SME. – Littleton, Colorado, 1995. – P.79–87.
4. *Кирнарский А. С.* Принцип однофункциональности разделительных процессов при обогащении угля / А. С. Кирнарский // Уголь Украины. – 2009. – № 8. – С. 26–30.
5. *Honaker, R. Q., Paul, B. C., Wang, D., Huang, M.* The Application of Centrifugal Washing for Fine Coal Cleaning. Preprint, SME Meeting, Albuquerque, New Mexico, 14–17.02.1994. – 1994. – № 94–259.
6. *G. H. Luttrell, R. Q. Honaker, D. I. Phillips.* Enhanced Gravity Separators: New Alternatives for Fine Coal Cleaning // Proceedings of the 12-th International Coal Preparation Congress, May 23–27, 1994. – Cracow, Poland, 1994.

### ВНИМАНИЕ! СВЕДЕНИЯ ДЛЯ АВТОРОВ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ»

#### Требования к рукописям

Рукопись статьи представляется в редакцию в двух экземплярах объемом до 10 – 15 с. Страницы должны быть пронумерованы, а рукопись подписана авторами.

На первой странице указываются фамилия, имя и отчество автора, ученая степень, название статьи.

Аннотация (не более 5–8 строк) представляется на украинском, русском и английском языках.

Рекомендуемый план статьи: 1. Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами (5–10 строк). 2. Последние достижения и публикации, на которые опирается автор, выделение нерешенных частей общей проблемы. 3. Формулирование цели статьи, постановка задачи (объем 5–10 строк). 4. Изложение собственно материала исследования. 5. Выводы.

Формулы, символы и знаки должны быть размечены, количество формул минимальное с расшифровкой всех параметров, без промежуточных выкладок.

Иллюстрации подаются отдельно от текста. Они должны быть четкими, не перегружены деталями, с подписями. Растровые изображения должны иметь разрешение 300 dpi.

Электронный вариант статьи выполняется в редакторе Word for Windows 6.0 и выше, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал – 1,5. Размер полей: левое – 30, правое – 15, верхнее – 20, нижнее 20 мм; формат А4.