

В.И. Новак, В.А. Козлов

**ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ
ОБОГАЩЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ**

Приведен краткий обзор современных способов обогащения угольных шламов. Рассмотрены проблемы флотации тонкодисперсного угля и альтернативные методы его обогащения.

Ключевые слова: угольный шлам, флотация угля, спиральный сепаратор, гидросайзер, селективное осаждение угля

В мировой практике на сегодняшний день единственным эффективным способом обогащения тонких шламов крупностью до «нуля» остается пенная флотация, основывающаяся на разнице физико-химических свойств поверхности частиц угля и породы. Другие способы обогащения шламов до «нуля» (пенная сепарация, масляная агломерация и т.д.) не получили практического распространения.

Для улучшения флотационных свойств угольных частиц применяют поверхностно-активные вещества (флотореагенты): собиратели и пенообразователи. Собиратели адсорбируются на поверхности угольных частиц и повышают их гидрофобность, т.е. улучшают сродство угольных частиц с воздушными пузырьками. Пенообразователи повышают устойчивость пены, тем самым предотвращая ее разрушение и выпадение угольных частиц из пенного слоя обратно в пульпу.

В большинстве случаев в качестве собирателя при флотации углей в странах СНГ используются аполярные реагенты: керосин, дизельное топливо, легкий газойль и др. В качестве пенообразователей — гетерополярные: КОБС (кубовые остатки производства бутилового спирта), КЭТГОЛ и др.

Методы обогащения в тяжелосредних гидроциклонах, отсадки, концентрационных столов ограничены нижней крупностью материала 0,15 мм. Методы с использованием водных циклонов, спиральных сепараторов и центрифугирования ограничены нижней крупностью 30 микрон (0,03 мм).

Фактически, альтернативных флотации способов, позволяющих обогащать ультратонкий шлам крупностью менее 0,03 мм в промышленных масштабах, не существует.

В последнее десятилетие практически на всех углеобогаительных фабриках России, перерабатывающих коксующиеся угли, выполнена модернизация технологических схем с установкой для обогащения зернистых шламов крупностью 0,15—1(2) мм спиральных сепараторов. Это позволило значительно снизить нагрузку на флотационные отделения фабрик по твердому. Но, вместе с тем, уменьшилась средняя крупность частиц, поступающих на флотацию. Также если присутствует в питании флотации глина, то критически ухудшаются показатели флотации, увеличивается расход флотореагентов и, соответственно, увеличивается себестоимость процесса обогащения.

Поэтому поиск и разработка экономичных методов, позволяющих составить альтернативу флотации, является важной технологической и экономической задачей.

Проведем краткий обзор существующих методов обогащения угольных шламов.

Тяжелосредние гидроциклоны применяются для обогащения углей с нижним пределом крупности 0,5 мм, в ряде случаев — 0,1 мм [1]. Значение погрешности разделения E_{pm} составляет 40—80 кг/м³. Для угля крупностью 0,1x0,5 мм погрешность составляет 130—170 кг/м³. Достоинства технологии обогащения углей в тяжёлосредних гидроциклонах: относительно высокая точность разделения; эффективное обогащение углей трудной и очень трудной обогатимости; высокая точность регулирования плотности разделения. Недостатки: относительно высокие эксплуатационные затраты (главным образом на электроэнергию и магнетит); необходимость регенерации магнетитовой суспензии, что усложняет технологическую схему.

Отсадочные машины для обогащения шламов получили широкое распространение в практике обогащения всех типов энергетических углей и коксующихся углей легкой и средней обогатимости благодаря следующим преимуществам [1]:

1. Универсальность: возможность эффективного обогащения углей различного фракционного и гранулометрического составов в широком диапазоне их марочной принадлежности, целевого назначения и обогатимости.

2. Простота технологии, заключающаяся в малооперационности технологического комплекса, не требующего специальных операций по приготовлению и регенерации рабочей среды.

3. Высокая производительность: удельная производительность составляет 5—20 т/ч на 1 м² рабочей площади отсадочной машины.

4. Относительно низкая энергоёмкость процесса.

По сравнению с другими методами гравитационного обогащения угля отсадка отличается относительной простотой, дешёвизной и универсальностью; но для обогащения тонких шламов эффективность ее применения относительно низкая. Погрешность разделения для класса 0,5х1 мм составляет 170 кг/м³, а для класса 0,1х0,5 мм — 230 кг/м³.

Со второй половины 90-х гг. прошлого века для обогащения угольных шламов крупностью 0,15—1(2) мм получили распространение *четырёхвитковые спиральные сепараторы*.

Внедрение спиральных сепараторов на углеперерабатывающих предприятиях позволило значительно снизить нагрузку на флотационные отделения, повысить нижний предел крупности мелкого машинного класса, обогащаемого в тяжёлосредних гидроциклонах, с 0,5 мм до 1 мм и тем самым существенно, в несколько раз, снизить потери магнетита с продуктами обогащения. Спиральные сепараторы также не заменимы при переработке шламов из внешних шламоотстойников, существующих при обогатительных фабриках, построенных в советское время. Но, учитывая то, что они производят разделение по средней и высокой плотности разделения (1600—2000 кг/м³), рекомендуется применять спиральные сепараторы для обогащения энергетических углей любой обогатимости и коксующихся углей лёгкой обогатимости. Для обогащения коксующихся углей трудной обогатимости применение спиральных сепараторов менее эффективно, поскольку качество концентрата существенно ухудшается вследствие засорения фракциями промежуточной плотностью 1400—1800 кг/м³.

Достоинства спиральных сепараторов: низкие капитальные и эксплуатационные затраты, простота устройства; отсутствие движущихся частей, возможно колебание содержания твёрдого в питании (250—450 кг/м³). Недостатки: ограниченный диапазон плотности разделения 1550—2000 кг/м³, низкая эффективность обогащения частиц крупностью менее 0,15 мм, относительно невысокая удельная производительность на единицу занимаемой

площади по питанию — до 9 т/ч на одну трехзаходную спираль. Погрешность разделения $E_{pm} = 100—250 \text{ кг/м}^3$.

В последние годы для обогащения тонкого шлама крупностью 0,4х0,15 мм применяют *семивитковые спиральные сепараторы*, что составляет определенную альтернативу флотации.

В России *концентрационные столы* не применяют для обогащения углей, хотя в 50—60-е гг XX в. на ряде обогатительных фабрик Донбасса концентрационные столы использовались. Тем не менее, в зарубежной практике концентрационные столы используются в операции обогащения угольных шламов крупностью 0,2—3(6) мм с высоким содержанием серы для удаления пиритной формы серы.

Погрешность E_{pm} работы концентрационных столов при обогащении коксующихся углей крупностью –3 мм при плотностях разделения 1550—2000 кг/м^3 составляет 100—150 кг/м^3 . Удельная производительность по концентрату — до 1 $\text{т/м}^2\cdot\text{ч}$.

Достоинства концентрационных столов: простота устройства, возможность эффективного обессеривания углей.

Недостатки: низкая удельная производительность, трудность регулирования плотности разделения, большие установочные площади, большой удельный расход воды.

Интересен опыт эксплуатации *сепараторов с качающейся постелью*, или **гидросайзеров**, применяемых для крупности угля 0,08—3 мм [2].

Достоинства гидросайзеров: относительная простота устройства, возможность обогащения углей по низкой плотности разделения менее 1500 кг/м^3 , возможность автоматического регулирования плотности разделения, относительно высокая удельная производительность. Недостатки: низкая эффективность обогащения углей трудной обогатимости, потребность в чистой оборотной воде для обеспечения процесса обогащения, узкий класс крупности частиц эффективно обогащаемых в одном аппарате.

Погрешность E_{pm} работы гидросайзеров составляет 70—150 кг/м^3 при плотностях разделения 1350—2000 кг/м^3 .

Поиск возможностей обогащения углей, прежде всего обращение к нефлотационным методам обогащения шламов, обусловило повышенный интерес к использованию *обезвоживаю-*

ших центрифуг. В частности к фильтрующим центрифугам, как к машинам, потенциально способным не только к обезвоживанию, но и частичной классификации шламов по крупности, что, в свою очередь, при определённых параметрах сырьевой базы позволяет обеспечить возможность получения осадка, качество которого соответствует требованиям к концентрату. При этом в фугат уходят тонкие высокозольные частицы.

Таким образом, зольность обезвоженного осадка оказывается ниже по сравнению с зольностью твёрдой фазы питания центрифуги.

Данная технология обезвоживания и одновременного обеззоливания угольного шлама на вертикальных фильтрующих центрифугах со шнековой выгрузкой осадка используется с середины 90-х годов и до настоящего времени на ЦОФ «Павлоградская» (Украина). При обезвоживании шлама в фугат уходят частицы илов высокой зольности.

Несомненно, схемы с обогащением шламов крупностью 0,2 (0,3)-1мм гравитационными методами эффективны и экономичны. Они позволяют снизить нагрузку на флотацию и обезвоживание продуктов разделения флотацией, сократить расходы реагентов, флокулянтов и другие эксплуатационные расходы. Тем не менее, выделение зернистой части шламов при обогащении гравитационными методами значительно усложняет флотацию шламов, особенно при наличии в пульпе тонких угольных и минеральных частиц (-0,05 мм), также возрастает сложность обезвоживания продуктов флотации. Чем больше тонких угольных частиц, имеющих высокоразвитую поверхность в питании флотации, тем больше расход реагентов, труднее обезвоживать флотоконцентраты. При повышенных расходах реагентов имеет место стабилизация пены, приводящая к «запениванию» водно-шламовой схемы и соответственно нарушению процессов обогащения угля, очистки оборотных вод.

Флотацией наиболее эффективно извлекаются частицы угля крупностью 0,05—0,3 мм; ограничение сверху 0,5 (0,6) мм (в зависимости от типа применяемых флотационных аппаратов) и снизу -0,02 (0,03) мм. Ультратонкие частицы заметно влияют на скорость флотации, стабилизацию пены, расходы реагентов и другие факторы процесса. Флотации, как и любому раздели-

тельному процессу, присуща глубина обогащения. В связи с этим, флотация как процесс обогащения, и как способ регенерации шламовых вод не эффективна для разделения тонкодисперсных и высокозольных угольных шламов, особенно при наличии значительного количества глинистых частиц микронной и субмикронной крупности. Отрицательное влияние тонкодисперсных частиц на флотацию объясняется рядом причин, это: малая масса тонких частиц, налипание тонких частиц на более крупные частицы, бронирование поверхности воздушных пузырьков, очень высокая удельная площадь активной поверхности ультратонких частиц, пониженная скорость флотации.

Малая масса тонких частиц снижает вероятность столкновения и соответственно закрепления частиц на пузырьке воздуха. Налипание тонкодисперсных шламов на поверхность угольных частиц затрудняет их прилипание к пузырькам. Тонкие частицы, обладая большой удельной поверхностью, в первую очередь адсорбируют реагенты. Низкая скорость их флотации также связана с их развитой поверхностью, поскольку требуется повышенное количество мелких воздушных пузырьков.

Важное экономическое значение имеет эффективность обезвоживания продуктов флотации. В связи с тем, что в последнее десятилетие, в проектах новых углеобогатительных фабриках отсутствует термическая сушка угля, то при обезвоживании шламов необходимо получать продукт с возможно более низкой влажностью, чтобы иметь возможность присоединить его к общему концентрату по фабрике. Для данного процесса применяются в основном дисковые вакуум-фильтры, а в некоторых проектах дисковые фильтры, работающие под давлением (гипербар-фильтры), а также применяют камерные и ленточные фильтр-прессы.

Современные требования по охране окружающей среды и ресурсосбережению обуславливают необходимость переработки отходов флотации на фабрике, не допуская сброса в наружные отстойники. Цель заключается в выделении твёрдой фазы отходов в виде осадка, пригодного для сухого складирования, и получении возможно большего количества осветлённой воды с минимальным содержанием твёрдого для направления в линию оборотного водоснабжения фабрики. Наиболее

распространена схема, предусматривающая сгущение отходов флотации до содержания твёрдого $300\text{--}500\text{ кг/м}^3$ (с применением флокулянтов) с последующим обезвоживанием на ленточных фильтр-прессах.

Ввиду низкой селективности флотационного обогащения наиболее тонких частиц (крупностью менее $0,04\text{--}0,05\text{ мм}$) в последние годы на ряде ОФ, построенных по технологии СЕТСО (ОФ Северная г. Березовский, ОФ Бочатская-Коксовая г. Белово, ОФ Краснобродская — все в Кемеровской обл., ОФ Свято-Варваринская в Украине), предусматривается классификация необогащенного шлама перед флотацией в гидроциклонах малого диаметра с целью выделения тонких частиц [3]. Такой подход может способствовать улучшению показателей флотации, однако, создаёт проблему переработки шламовой воды, содержащей тонкие частицы, и увеличивает потери угля. Есть опыт раздельной флотации песков и шламов после классификации. Так, на ОФ Северная и ОФ Свято-Варваринская применены схемы раздельной колонной флотации крупных и тонких шламов. На ОФ установлены колонные аппараты для тонких ($-0,04\text{ мм}$) и крупных частиц ($0,04\text{--}0,15\text{ мм}$), что позволяет подбирать соответствующие оптимальные расходы флотореагентов и аэрогидродинамические режимы для частиц различной крупности. Тем не менее, полученные результаты не обнадеживают: эффективность разделения частиц тонкого класса $0\text{х}0,04\text{ мм}$ низкая. При этом нельзя не отметить, что проблеме совершенствования колонных аппаратов и в частности аэраторов для них посвящено значительное число исследований. Именно колонные аппараты более эффективны, чем механические и пневмомеханические флотационные машины для селекции тонких шламов. Тем не менее, полностью проблема обогащения угольных шламов, по крайней мере, с размером частиц $-0,05\text{ мм}$, все еще требует решения.

В этом ключе следует выделить метод, получивший название «турбулентная микрофлотация», или «ТМФ-технология».

Метод микрофлотации был впервые предложен и теоретически обоснован применительно к ультрадисперсным рудным минералам. Более 10 лет этот метод в комбинации с флокуляцией используется для очистки промышленных стоков от тонкодисперсных загрязнений. Недавно в лабораториях компаний «Англоплатинум»

(ЮАР), «Рио Тинто» (Австралия) и «Коминко» (Канада) экспериментально было подтверждено, что «турбулентная микрофлотация» позволяет достигать не только высокой степени извлечения (до 90 %) полезного компонента тонкодисперсных рудных минералов (–15 мкм), но и высокого качества концентрата. Результаты пилотных испытаний турбулентной микрофлотации при обогащении тонкодисперсных угольных суспензий (крупностью –0,2 и –0,045 мм) на ОФ Свято-Варваринская (Украина) свидетельствуют об относительной эффективности метода.

Следует особо отметить, что, поскольку микропузырьки обладают эффективностью захвата ультратонких частиц на несколько порядков более высокой, чем пузырьки в обычных флотационных машинах, расход воздуха на единицу объема пульпы при турбулентной микрофлотации уменьшается на порядок по сравнению с обычной флотацией. Это позволяет, повысить извлечение угольных частиц в пенный продукт.

Известны схема и оборудование фирмы Iris (США) для микрофлотации углей в промышленных масштабах на колоннах большого диаметра.

Проблему генерации микропузырьков в необходимых объемах также решили специалисты СЕТСО, разработав устройство, устанавливаемое непосредственно на трубе питания флотомашин любого типа.

Частично проблемы генерации микропузырьков решили во флотомашинах Pneufлот (ФРГ) и во флотационных системах Jameson Cell (Австралия). Но практика эксплуатации этих систем показала, что расход флотореагентов превышает в 2–3 раза расходы флотореагентов в обычной флотации. Это приводит к «запениванию» всего водно-шламового хозяйства, и вынуждает значительно снижать нагрузку на фабрику, что не приемлемо с экономической точки зрения.

Известны работы по применению вакуумной флотации, электрофлотации, флотации с носителем, где в роли носителя применяются более крупные частицы. Однако применительно к флотации тонкодисперсных угольных шламов эти методы не нашли применения.

Одним из способов предотвращения отрицательного действия тонких высокозольных шламов при флотации угля является

применение специальных реагентов-пептизаторов, повышающих гидратированность поверхности тонких частиц, изменяя в нужном направлении их заряд, предотвращая тем самым налипание шламов на угольные частицы, пузырьки воздуха и капли эмульсии аполярных реагентов. Флотация в разбавленных пульпах, дробная подача реагентов несколько снижает загрязнение концентрата тонкодисперсными минеральными частицами.

На ОФ «Распадская» (Южный Кузбасс, г. Междуреченск) была решена проблема экономичного обогащения угольных шламов до «нуля» применением нового для углеобогащения метода избирательного осаждения угольных частиц с помощью метода их селективной флокуляции [4].

Себестоимость обогащения угольных шламов способом избирательного осаждения угля и обезвоживание продуктов в 2—3 раза ниже, чем при флотации угля.

В настоящее время изучается возможность применения этого метода обогащения угольных шламов в проектах новых углеобогачительных фабрик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обогащение углей. Справочник под ред. Благова И.С. и др. — М.: Недра, 1984.
2. Козлов В.А, Новак В.И. Развитие метода качающейся постели в обогащении угольных шламов. ГИАБ, № 6. МГУ, 2010.
3. Козлов В.А, Новак В.И. Применение колонной флотации в угольной промышленности. ГИАБ, № 4. МГУ, 2011.
4. Новак В.И. Автореферат диссертации «Обоснование и разработка рациональной технологии флокуляционного разделения тонкодисперсных угольных шламов//ИОТТ-МГУ. — М., 2012. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Новак Вадим Игоревич — кандидат технических наук, директор, novak@setco.ru,
Козлов Вадим Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, главный технолог, vak@setco.ru.
Угольный департамент Коралайна Инжиниринг — SETCO.

