

На правах рукописи



КЛЕЙН МИХАИЛ СИМХОВИЧ

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ
ОЧИСТКИ ШЛАМОВЫХ ВОД УГЛЕБОГАЩЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ
ШЛАМОВ ФЛОТО-АГЛОМЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

Специальность: 25.00.36 – «Геоэкология»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Кемерово 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Гелий Романович Бочкарев

Доктор технических наук, профессор Юрий Леонидович Сколубович

Доктор технических наук, доцент Леонид Степанович Скрынник

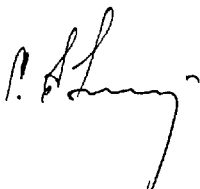
Ведущая организация: Институт угля и углекислоты СО РАН

Защита состоится 4 июля 2006 г. в 10-00 часов на заседании регионального диссертационного совета ДМ 212. 102. 04 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» по адресу: 650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (384-2) 36-16-87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет».

Автореферат разослан 2 июня 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Евменов С. Д.

Актуальность проблемы. Высокий уровень техногенных воздействий на окружающую природную среду в регионах с повышенной концентрацией угольной промышленности предопределяет актуальность решения проблемы ресурсо и природосбережения. Значимая роль при решении данной проблемы принадлежит углеобогащению, которое, управляя качеством продуктов углепроизводства, способствует повышению экологической безопасности работы предприятий угольной отрасли. Вместе с тем, углеобогатительные фабрики (УОФ) сами являются источниками повышенного техногенного воздействия.

Сравнительная оценка уровней экологической опасности технологических комплексов УОФ указывает на необходимость совершенствования прежде всего экологически «грязных» технологий очистки шламовых вод. Одним из «узких» мест указанных технологий является недостаточная глубина селективной очистки воды традиционным флотационным методом. Неохваченные флотацией тонкие угольные шламы ($< 0,03$ мм) накапливаются в оборотной воде и ухудшают показатели гравитационного обогащения углей. Низкозольные шламовые отходы являются основными источниками потерь угля, изъятия земельных ресурсов для их складирования. Термическая сушка шламовых концентратов сопровождается загрязнением воздушной среды.

Большое количество тонких шламов (до 10 % от рядового угля) и несовершенство применяемых процессов их переработки предопределяют необходимость разработки технологических решений более высокого уровня. Вопросам экологизации технологий углеобогащения посвящено большое количество отечественных и зарубежных исследований, однако до настоящего времени проблема эффективной очистки шламовых вод с повышенным содержанием тонких шламов остается открытой и требует своего разрешения.

При выборе научного направления и способов повышения экологической безопасности углеобогащения целесообразно ориентироваться не на борьбу с отходами и загрязнениями на последнем технологическом этапе (фильтры, очистные сооружения и т.д.), а на преобразование традиционных технологий в малоотходные, решающие задачи эффективного использования природного сырья и защиты окружающей среды за счет уменьшения количества отходов и различных загрязнений. Вместе с тем, проблема создания малоотходных технологий углеобогащения сдерживается недостаточной изученностью явлений, происходящих при разделении и обезвоживании тонких угольно-глинистых дисперсий. Необходим пересмотр принципов и развитие теоретических основ технологий очистки шламовых вод, обезвоживания шламовых концентратов и утилизации шламов. Это обусловило актуальность темы исследования, цель, задачи, структуру и содержание диссертационной работы.

Целью работы является теоретическое обоснование и разработка способов интенсификации процессов очистки шламовых вод и утилизации угольных шламов флото-агломерационными методами для создания малоотходной технологии углеобогащения.

Идея работы заключается в использовании закономерностей межфазных взаимодействий в процессах масляной агрегации и флотации угольных шламов

для разработки эффективных способов разделения и обезвоживания угольно-глинистых дисперсий при очистке шламовых вод углесобогащения.

Задачи исследований:

- установить факторы, определяющие экологическую безопасность работы УОФ, и возможности интенсификации водно-шламовых процессов для создания малоотходной технологии углеобогащения;
- установить причины недостаточной эффективности флотационного метода очистки шламовых вод от тонких шламов и потерь крупных частиц угля;
- исследовать механизм действия масляных реагентов и условия эффективного их использования при очистке шламовых вод методом флотации;
- изучить закономерности и механизм процесса образования углемасляных агрегатов и разработать на их основе эффективную технологию очистки шламовых вод, повышающую экологическую безопасность работы предприятий;
- разработать способы повышения эффективности механического обезвоживания угольных шламов для снижения загрязнения воздушной среды выбросами загрязняющих веществ при термической сушке углей;
- разработать эффективные технологии переработки и утилизации тонких угольных шламов с получением кондиционных товарных продуктов;
- разработать малоотходную технологию углеобогащения на основе научно обоснованных способов интенсификации водно-шламовых процессов.

Методы исследований. Системный анализ и научное обобщение результатов теоретических исследований, данных лабораторных, стендовых и промышленных экспериментов; количественные и кинетические методы изучения механизма элементарного акта флотации и закономерностей межфазных взаимодействий, включающие измерение прочности прилипания частиц к пузырькам воздуха в динамических условиях и скорости сокращения периметра смачивания при отрыве частиц от пузырька, оценку времени прилипания частиц к воздушным пузырькам, определение изменений смачиваемости поверхности минералов, флотационные опыты в аппарате беспенной флотации и в механической флотомашине; микрофотографический метод определения крупности масляных эмульсий; математический и физический методы моделирования процессов образования и разрушения углемасляных агрегатов; калориметрический метод определения степени агрегации угольных дисперсий; лабораторные и полупромышленные эксперименты в специальных камерах агломерации.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

- уровень экологической безопасности углеобогащения зависит от совершенства технологии очистки шламовых вод и определяется количеством циркулирующих с оборотной водой шламов, качеством шламового концентрата и потерями углей с отходами, при этом эффективность очистки возрастает при увеличении объема очищенных шламовых вод и глубины селективной очистки;
- количество шламовых отходов и потеря угля при использовании флотационного метода очистки шламовых вод уменьшается при увеличении константы скорости извлечения частиц угля из шламовых вод, величина которой экстремально зависит от крупности частиц, при этом для тонкодисперсных частиц ($< 0,03$ мм) константа стремится к нулю из-за малой вероятности закрепления

их на воздушных пузырьках, а для крупных частиц ($> 0,4-0,5$ мм) резко падает из-за недостаточной вероятности закрепления и удержания их на пузырьках;

- минимизация потерь крупных угольных частиц с отходами флотации при использовании масляных реагентов обеспечивается увеличением вероятностей закрепления и удержания частиц на пузырьках воздуха, величина которых зависит от скорости движения периметра смачивания по твердой поверхности, пропорциональной величине гистерезисных сил, минимальных при расширении периметра в процессе закрепления и максимальных при его сокращении вместе с каймой масла в процессе отрыва частицы;

- глубина очистки шламовых вод пропорциональна скорости гетерокоагуляции угольно-масляных дисперсий и степени агрегации тонкодисперсных фракций угля масляными реагентами, величина которых зависит от концентрации и крупности угольной и масляной фаз и возрастает с увеличением диссипации энергии в перемешиваемой суспензии выше $3-5$ Вт/кг;

- увеличение скорости и степени агрегации тонкодисперсных частиц в процессе масляной аэроагломерации (МАО) шламов обеспечивается ростом площади поверхности раздела масло – вода при подаче в суспензию газовой фазы, при этом эффективность процесса повышается с увеличением газосодержания и дисперсности воздушных пузырьков, зависящих от количества энергии, затрачиваемой на перемешивание суспензии;

- эффективность природопользования при переработке и утилизации угольных шламов методом фильтрации агрегированной маслом суспензии через слой гидрофобных частиц экстремально зависит от расхода масла, при этом величина экстремальных значений пропорциональна извлечению горючей массы в угольный концентрат и имеет обратную зависимость от соотношения цен на масло и товарную угольную продукцию.

Научная новизна:

- установленные зависимости эколого-экономических показателей обогащения углей от глубины очистки шламовых вод и избирательности процессов разделения шламов показывают, что интенсификация процессов очистки шламовых вод от тонких шламов, основных источников потерь углей и загрязнения природной среды, является необходимым условием создания малоотходной технологии углеобогащения;

- впервые установленные кинетические закономерности и вероятности процессов столкновения, закрепления и сохранения контакта между частицами угля, каплями масла и пузырьками воздуха позволили выявить причины малой эффективности флотационного метода очистки шламовых вод от тонких шламов и показать, что эффективным способом экологизации технологий очистки является селективная агрегация угольных дисперсий;

- теоретически и экспериментально с использованием оригинальных методов и приборов впервые обоснован гистерезисный механизм действия масляных реагентов, объясняющий учпрочняющее действие масел зависимостью скорости движения периметра смачивания в процессе отрыва от свойств и структуры масляных пленок на поверхности частиц, что позволило установить зави-

симость флотуемости частиц разной крупности от свойств масляных реагентов и возможность сокращения потерь углей с отходами флотации;

- разработаны кинетическая модель процесса масляной агломерации и методика оценки эффективности образования агрегатов, позволившие впервые установить, что степень агрегации тонкодисперсных частиц определяется извлечением их на омасленные крупные частицы, а причиной малой степени агрегации ($< 0,3$) тонкого угля при расходе масла меньше 10 кг/т является недостаток свободной поверхности раздела масло – вода;

- впервые установлено, что повышение скорости и степени агрегации мелких частиц угля обеспечивают омасленные пузырьки воздуха, являющиеся центрами аэроагрегации, при этом с увеличением диссипации энергии в процесс агрегации вовлекаются тонкодисперсные частицы угля, что обеспечивает более глубокую очистку шламовых вод и повышает экологическую безопасность углеобогащения;

- разработан новый метод разделения продуктов масляной агломерации (МА) угольных шламов через слой гидрофобных частиц, использование которого обеспечивает практически полное извлечение углесмешных агрегатов в концентрат и повышает эффективность его обезвоживания, что позволяет производить из шламов кондиционную угольную продукцию без термической сушки;

- разработана малоотходная технология углеобогащения с использованием процессов масляной агломерации и аэроагломерации при очистке шламовых вод, обезвоживании и утилизации шламов, которая обеспечивает эффективное использование природного сырья и защиту окружающей среды от загрязнений.

Личный вклад автора состоит в научном обосновании и развитии перспективного направления по созданию малоотходной технологии углеобогащения за счет использования селективной агрегации тонкого угля масляными реагентами в процессах очистки шламовых вод и включает: анализ факторов и разработку методов оценки экологичности углеобогащения; создание экспериментальных методов и установок для изучения механизма действия масляных реагентов и научное обоснование гистерезисного механизма их действия; определение закономерностей и оптимальных условий взаимодействия угольных частиц с каплями масла и воздушными пузырьками в процессах сепарации шламов; разработку теоретических и экспериментальных методов исследования механизма образования углесмешных агрегатов и способа интенсификации процесса МА пузырьками воздуха; разработку интенсивных технологий очистки шламовых вод с использованием селективной сепарации тонких шламов; испытания и внедрение новых технологий очистки шламовых вод и обезвоживания шламовых продуктов на УОФ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются использованием фундаментальных закономерностей для описания межфазных взаимодействий в процессах очистки шламовых вод; адекватностью полученных аналитических зависимостей и экспериментальных данных при математической обработке результатов экспериментальных исследований; соответствием теоретических положений работы результатам лабора-

торных, стендовых и промышленных испытаний; положительными результатами многолетнего промышленного использования на УОФ разработанных технологий очистки шламовых вод.

Научное значение работы заключается в развитии теории управления устойчивостью дисперсных систем. Установлены новые и уточнены известные закономерности образования углемасляных агрегатов и флотационных комплексов, что позволило дать научное обоснование и разработать интенсивные способы разделения и обезвоживания угольно-глинистых дисперсий.

Практическое значение работы:

- разработана интенсивная технология очистки шламовых вод с использованием масляной аэроагломерации угля, которая повышает экономическую эффективность и уровень экологической безопасности УОФ;

- разработаны способы интенсификации механического обезвоживания шламовых продуктов методом МА, обеспечивающие сокращение выбросов пыли и вредных веществ в атмосферу сушильными установками;

- разработана технология переработки и утилизации угольных шламов методом МА с получением качественного концентрата кондиционной влажности без термической сушки, что решает проблему обогащения угольных шламов с повышенным выходом летучих веществ;

- разработана малоотходная технология углеобогащения с использованием МА и МАА в процессах очистки шламовых вод, обезвоживания шламовых концентратов и утилизации шламов.

Реализация результатов работы. Исследования выполнялись в рамках: долгосрочной комплексной программы «Сибирь»; программы СО АН СССР 12.9.1.2.3. «Разработка месторождений и обогащение полезных ископаемых»; международного гранта РОЛЛ-2000; договоров с обогатительными фабриками ЦОФ «Сибирь», ГОФ «Томусинская», ЦОФ «Абашевская», ОФ «Анжерская». Научные и практические результаты работы, повышающие экологическую безопасность углеобогащения, нашли промышленное применение в результате внедрения интенсивной технологии очистки шламовых вод на ЦОФ «Сибирь», ГОФ «Томусинская» и ОФ «Анжерская». Длительное использование установок масляной аэроагломерации угольных шламов позволило снизить техногенные воздействия на окружающую среду при работе УОФ, улучшить качество очистки шламовых вод и увеличить выпуск концентрата, сократить потери угля и стабилизировать работу водно-шламовых систем фабрик.

Высокая эффективность технологии совместного обезвоживания флотоконцентрата с концентратом спирального сепаратора подтверждена результатами промышленных испытаний на ЦОФ «Сибирь». Перспективность разработанной технологии заключается в возможности получения кондиционных по содержанию влаги товарных продуктов без термической сушки.

Полупромышленная установка МА угля производительностью 10 м³/ч включена в схему приготовления водоугольного топлива из тонко измельченных шламов энергетических углей в ГУП НПС «Экотехника».

Интенсивная технология очистки шламовых вод углеобогащения отмечена дипломом участника конкурса экологического Фонда имени В. И. Вернадского

«Национальная экологическая премия» за 2005 год и награждена золотой медалью 6-го Московского международного салона инноваций и инвестиций, организованного Федеральным агентством по образованию.

Полученные в работе результаты общетеоретического и экспериментального характера используются в лекциях и лабораторных практикумах по курсам «Экология», «Флотационные методы обогащения», «Безотходные технологии обогащения полезных ископаемых», в дипломных проектах и работах студентов ГУ КузГТУ. Практические результаты исследований рекомендуются для использования в проектных институтах и на углеобогащительных фабриках.

Апробация работы. Отдельные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на всесоюзных, республиканских и международных научно-практических конференциях и совещаниях: «Новая техника и технология флотации угля» (Прокопьевск, 1981); «Развитие теории и практики, совершенствование технологии рудоподготовки при обогащении» (Ленинград, 1981); «Совершенствование техники и технологии грубозернистой флотации» (Апатиты, 1985); «Коагулянты и флокулянты в очистке природных и сточных вод» (Одесса, 1986); «Обогащение, переработка и комплексное использование минерального сырья» (Кемсрово, 1999); «Проблемы утилизации и переработки промышленных и бытовых отходов» (Кемсрово, 2003), «Экология Сибири: Сибэко'93» (Иркутск, 1993); «Перспективы развития горнодобывающей промышленности» (Новокузнецк, 1997); «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемсрово, 2000); «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемсрово, 2000–2004); «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемсрово, 2001, 2004); «Наукосмкие технологии добычи и переработки полезных ископаемых» (Новосибирск, 2001); «Проблемы ускорения научно-технического прогресса в отраслях горного производства» (Москва, 2003); «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2003); «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 58 печатных работ в том числе 1 авторское свидетельство и 2 патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и приложений (298 страниц основного текста, 85 рисунков, 54 таблицы).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проблемы экологической безопасности и рационального природопользования в углеобогащении

Приоритетными геоэкологическими проблемами совершенствования работы природно-технических систем по добыче, переработке и использованию углей являются защита природной среды от негативных техногенных воздействий, ресурсосбережение и рациональное природопользование. Важная роль при решении этих проблем принадлежит УОФ, которые, занимая промежуточное

положение между добычей и использованием углей, имеют возможность при научно обоснованном управлении качеством продуктов переработки минимизировать экологическую нагрузку на окружающую среду и оптимизировать эффективность природопользования всей природно-технической системы, создавая условия для применения экономичных ресурсосберегающих технологий добычи углей и экологически рациональных способов их использования.

Для эколого-экономической оценки работы предприятий угольной промышленности в работе использован показатель эффективности природопользования, пропорциональный разности между выручкой от реализации конечного продукта и ущербом окружающей среде, отнесенной к приведенным затратам производства. Проведенная оценка экологических и экономических показателей использования углей показала, что максимальная эффективность природопользования достигается при зольности энергетических углей 8–12 %, а коксующихся – 6–9 %. Высокие требования к качеству используемых углей подтверждают необходимость обогащения большей части рядовых углей.

При решении геоэкологических проблем угольной промышленности задачами экологического совершенствования углеобогащения являются:

- повышение качества обогащенного угля, позволяющее снизить экологическую нагрузку на природную среду при их использовании;
- защита окружающей среды от техногенных воздействий при работе УОФ;
- ресурсосбережение и рациональное природопользование, которое достигается путем увеличения выхода угольных концентратов, сокращения потерь углей и утилизации отходов.

Для установления факторов, определяющих экологическую безопасность углеобогащения, рассмотрены закономерности работы двух основных технологических комплексов УОФ. В 1-м технологическом комплексе проводится гравитационное обогащение угля с использованием оборотного водоснабжения технологических процессов, позволяющее сократить забор свежей воды и предотвращающее загрязнение рек и водоемов техногенными водами. При оборотном водоснабжении эффективность обогащения угля зависит от количества шламов в оборотной воде, влияющих на вязкость разделяющей среды, причем негативное влияние шламов увеличивается с уменьшением их размеров. Снижение содержания тонких шламов в оборотной воде позволяет сократить потери гравитационного концентрата, однако при этом одновременно увеличиваются затраты на очистку шламовых вод. Поэтому на фабриках используют оборотную воду оптимального качества, соответствующую максимальному значению рентабельности производства.

Уровень эколого-экономической эффективности гравитационного обогащения угля тесно связан и с глубиной его обогащения. При снижении глубины обогащения растут затраты производства и ущерб окружающей среде, однако качество и ценность продукции при этом повышаются, что обеспечивает увеличение рентабельности и экологической безопасности производства.

Следовательно, для повышения эколого-экономической эффективности гравитационного обогащения угля необходимо улучшение качества оборотной

воды и сплывшие глубины обогащения угля до минимальной крупности, ниже которой сепарация частиц гравитационными методами неэффективна.

Во 2-м технологическом комплексе проводится очистка шламовых вод, образующихся в результате накопления шламов в технологической воде при гравитационном обогащении угля, которая заключается в разделении жидкой и твердой фаз с направлением очищенной воды в оборот и получением из твердой фазы шламовых продуктов.

Сравнительный анализ результатов работы двух технологических комплексов указывает на особую значимость решения проблемы экологического совершенствования технологий очистки шламовых вод, так как при содержании шламов в рядовых углях 15–20 % приведенные затраты на водно-шламовые процессы составляют 40–50 %, а потери угля со шламами – 25–30 % от общих потерь. При этом большая часть техногенных воздействий на окружающую среду является результатом водно-шламовых процессов, из которых наиболее экологически опасными являются складирование шламовых отходов и термическая сушка мелкого угля.

Размер негативных экологических последствий при очистке шламовых вод и обработке шламов можно оценить по следующему примеру. При переработке на обогатительной фабрике 1 млн тонн коксующихся углей в гидроотвалы с отходами флотации сбрасывается примерно 800 тыс. м³ воды, содержащей 20 тыс. тонн шламов зольностью 40–60 %, т.е. теряется около 10 тыс. тонн органической части угля. Концентрация углеводородов в воде может доходить до 10 мг/л, что многократно превышает предельные допустимые концентрации. При работе сушильных установок для испарения влаги сжигается около 4 тыс. тонн угля и выбрасывается в атмосферу до 200 тонн загрязняющих веществ. Учитывая, что в настоящее время в Кузбассе обогащается около 50 млн тонн коксующихся углей в год, очевидны огромные масштабы загрязнения окружающей среды углеобогащением в регионе и ущерб от потерь и нерационального использования ископаемых углей.

Результатом не эффективной работы водно-шламовых систем угольных предприятий стало огромное количество шламов, скопившихся в различного вида наружных отстойниках. В Кузбассе в гидроотвалах сейчас находится более 30 млн тонн шламов зольностью 20–50 %, которые загрязняют окружающую среду, хотя могут быть использованы для получения товарных продуктов.

Таким образом, существующие технологии очистки шламовых вод, переработки и обезвоживания шламовых продуктов не обеспечивают в должной мере охрану природы от загрязнений и не позволяют рационально использовать природные ресурсы органического сырья. Необходима интенсификация водно-шламовых процессов, направленная на создание малоотходной технологии углеобогащения, комплексно решающей задачи:

- эффективной очистки шламовых вод с получением «чистой» оборотной воды, качественного концентрата и высокозольных шламовых отходов;
- обезвоживания шламового концентрата без термической сушки;
- складирования «сухих» шламовых отходов на породных отвалах;
- утилизации шламов гидроотвала.

Совершенствование технологий очистки шламовых вод

Системы очистки шламовых вод углеобогащения решают две неразрывно связанные между собой задачи:

1. *Обеспечение оборотного водоснабжения технологических процессов водой оптимального качества.* При экологической направленности совершенствования работы систем оборотного водоснабжения необходимо обеспечить улучшение качества оборотной воды за счет уменьшения количества циркулирующих тонких шламов и сокращение размеров ущерба окружающей среде и потерь углей при очистке техногенных вод углеобогащения.

2. *Выделение из шламовых вод твердой фазы с получением кондиционных по зольности и влажности товарных продуктов.* Актуальность решения этой задачи обусловлена большим количеством шламов в рядовых углях и заметным влиянием выхода и качества шламового концентрата на общие эколого-экономические показатели углепереработки.

Количество шламов, объединяемых с гравитационным концентратом в общей товарный продукт, зависит от их качества и кондиций на товарный продукт. При высоких требованиях к качеству товарного продукта возникает необходимость разделения шламов на концентрат и отходы либо путем классификации их по крупности, либо селективной сепарацией шламов. Сравнение типовых характеристик двух способов разделения шламов показало, что при постоянной зольности общего товарного продукта количество присаживаемого шламового концентрата после селективного разделения шламов значительно выше, чем после классификации их по крупности, а ущерб от потерь угля во много раз меньше. Следовательно, экологизация углеобогащения при переработке шламов достигается за счет повышения селективности и полноты извлечения угольных частиц из шламовых вод в концентрат, обеспечивая увеличение выпуска общего товарного продукта и сокращение потерь угля с отходами.

При выборе способа разделения шламов необходимо учитывать экономические показатели, так как приведенные затраты производства при селективной сепарации шламов больше, чем при классификации их по крупности.

При обогащении коксующихся углей высокие требования к качеству концентрата определяют целесообразность селективной сепарации угольных шламов, так как сложно получить кондиционный по зольности и влажности товарный продукт объединяя гравитационный концентрат с необогащенным шламом. Кроме того, за счет сепарации шламов коксующихся углей обеспечивается стабильность технологического процесса обогащения и устойчивое получение кондиционного концентрата при колебаниях качества рядовых углей.

Системы очистки шламовых вод с классификацией шламов по крупности обычно используют при обогащении энергетических углей, когда требования к качеству товарного продукта ниже и можно присаживать к гравитационному концентрату необогащенный шлам. К недостаткам таких схем очистки можно отнести следующее:

- в товарный продукт попадают высокозольные угольные шламы, усиливающие экологическую нагрузку на природную среду при их сжигании;

- низкая эффективность операций улавливания и обезвоживания тонких угольных шламов приводит к необходимости сбрасывать часть их в наружные отстойники, увеличивая потери угля и загрязняя природную среду;

- повышенные зольность и влажность не позволяют использовать шламы энергетических углей некоторых марок для технологических целей.

Указанные недостатки устраняются включением в схемы очистки шламовых вод сепарационных процессов. При этом экономическая целесообразность сепарации шлама возникает только в том случае, когда увеличение затрат производства компенсируется ростом стоимости концентрата в результате изменения его потребительских свойств.

Таким образом, применение селективной сепарации шламов в схемах очистки шламовых вод обеспечивает:

- устойчивое получение из шламов качественного концентрата и рациональное использование природных ресурсов углей;
- сокращение потерь углей с техногенными водами углеобогащения и снижение загрязнения окружающей среды шламовыми отходами;
- улучшение качества оборотной воды и стабилизацию всего технологического процесса.

Следовательно, селективная сепарация шламов является не только способом разделения угольных и породных частиц, но и важнейшим процессом регенерации оборотной воды, определяющим уровень экологической безопасности углеобогащения в целом. Однако, как указывалось выше, работа водно-шламовых систем фабрик часто малоэффективна, что приводит к снижению экологической безопасности работы УОФ.

Одной из основных причин недостаточной эффективности отдельных операций схем очистки шламовых вод является высокое содержание в шламах тонкодисперсных частиц. Результаты гранулометрического анализа шламов ряда УОФ показывают, что содержание частиц размером меньше 30 мкм составляет 30-40 % и может достигать до 50 % в случае обогащения крупного шлама гравитационными методами. Высокая сложность разделения угольно-глинистых суспензий, содержащих большое количество тонкодисперсных частиц, объясняет низкую эффективность и высокую стоимость процессов очистки шламовых вод и обезвоживания шламов.

Следовательно, одна из основных проблем повышения экологической безопасности углеобогащения связана с отсутствием эффективных технологий очистки шламовых вод и способов переработки тонких шламов, которые, с одной стороны, нельзя сбрасывать с отходами из-за роста потерь угля и загрязнения ими окружающей среды, а с другой стороны, нельзя добавлять к угольному концентрату из-за увеличения его зольности и влажности и снижения при этом экологической ценности и конкурентоспособности товарного продукта. Необходимо замена существующих технологий на эффективные малоотходные технологии с использованием селективной очистки шламовых вод от тонкодисперсного угля и утилизации тонких шламов.

Интенсивное направление по созданию таких технологий заключается в научном обосновании, разработке и использовании новых эффективных спосо-

бов воздействия на угольно-глинистые дисперсии при селективном их разделении и отделении воды, обеспечивающих одновременное повышение экологической безопасности углеобогащения и рентабельности производства.

Кинетические закономерностей флотационного метода очистки шламовых вод

Использование сепарационных процессов в схемах очистки шламовых вод в большинстве случаев повышает экологическую безопасность работы УОФ. Практически единственным способом селективной сепарации шламов является разделение угольных и породных частиц по смачиваемости с использованием масляных реагентов, что обусловлено естественной гидрофобностью угольной поверхности и хорошей смачиваемостью угля маслом. Наибольшее распространение в углеобогащении получил флотационный метод очистки шламовых вод. Механизм разделения частиц по смачиваемости этим методом и технологические закономерности производственных процессов достаточно хорошо изучены благодаря работам как отечественных, так и зарубежных ученых: Б. В. Дерягина, В. И. Классена, В. А. Глембоцкого, А. А. Байченко, В. Г. Левича, В. И. Мелик-Гайказяна, С. С. Духина, А. Т. Елишевича, Л. А. Антипенко, В. Д. Самыгина, А. М. Годена и др. Тем не менее применяемые на практике технологии очистки шламовых вод флотационным методом не позволяют в ряде случаев достигать желаемых экологических и экономических показателей, что связано прежде всего с низкой эффективностью флотации самых мелких и крупных шламовых частиц угля.

Флотлируемость элементарных фракций угля оценивается по величине константы скорости флотации, которая зависит от крупности частиц. Присутствие в угольной пульпе частиц микронного размера и размером в сотни микрон, имеющих значительную разницу во флотлируемости, предопределяет сложность создания оптимальных условий процесса одновременно и для крупных и для мелких частиц. Это относится как к условиям взаимодействия частиц угля разной крупности с масляными реагентами, так и к гидродинамическим условиям их флотации. В результате этого, существенное различие кинетических характеристик флотации отдельных фракций угля обуславливает недостаточную эффективность селективной сепарации по дисперсному угля.

Для установления факторов, влияющих на величину константы скорости флотации разных по крупности частиц, изыскания и научного обоснования способов интенсификации флотационного метода очистки шламовых вод проведено изучение закономерностей отдельных этапов элементарного акта флотации. Процесс флотации происходит в суспензии, содержащей огромное количество частиц угля, капель масла и пузырьков воздуха, что предопределяет его статистический характер и необходимость вероятностного изучения, при котором константа скорости флотации равняется произведению вероятностей отдельных стадий процесса.

Вероятность столкновения W_c^u частиц угля с пузырьками зависит от скорости потоков жидкости относительно пузырька u_n и числа N^n пузырьков в пульпе: $W_c^u = E_c u_n S_n N^n$, где S_n – площадь диаметрального сечения пузырька. Эффективность столкновений частиц с пузырьками E_c зависит от их размера и режима обтекания пузырька жидкостью. Крупные частицы сталкиваются с пузырьками по инерционному механизму, а мелкие – преимущественно по механизму зацепления. Эффективность столкновений по инерционному механизму на несколько порядков выше, чем по механизму зацепления, а граничный размер между крупными и мелкими частицами угля составляет 30–40 мкм. Вероятность столкновения с пузырьками частиц мельче 30 мкм очень низкая (рис. 1).

Вероятность закрепления W_z^u частиц на пузырьках представляет наибольшую сложность для количественного описания. В зависимости от гидродинамического режима осаждения и значений критерия Стокса K выделены различные механизмы закрепления частиц угля размером d_c на пузырьках (табл. 1).

Таблица 1

Вероятность закрепления W_z^u частиц на пузырьках

Вид взаимодействия	K	d_c , мм	W_z^u
Упругий удар	>3	$>0,3-0,5$	$<0,4$
Неупругий удар	$0,1-1$	$0,07-0,4$	$0,4-0,8$
Скольжение	$<0,1$	$<0,15$	$0,2-0,85$
Прорыв пленки	$<0,01$	$<0,02$	$<0,2$

Вероятность закрепления W_z^u можно рассчитать, используя результаты измерений времени индукции на контактном приборе. Результаты расчета величины W_z^u (рис. 1) показали экстремальную зависимость вероятности W_z^u от крупности частиц. Высокие значения вероятности ($W_z^u > 0,5$) имеют частицы крупностью от 40 до 400 мкм, которые закрепляются в результате скольжения по поверхности пузырька и при неупругом ударе о поверхность пузырька.

Вероятность удержания W_y^u частиц угля на пузырьках определяется соотношением сил прилипания и сил отрыва, действующих на частицу. Максимальный размер флотирующихся частиц d_{\max} рассчитывается на основе решения уравнения Фрумкина – Кабанова относительно диаметра частиц.

Основная сложность при расчете d_{\max} связана с зависимостью d_{\max} от ускорения турбулентного вихря $C = \varepsilon_o^{2/3} \lambda^{1/3}$, величина которого зависит от масштаба пульсации $\lambda \approx d_{\max}$. Для определения d_{\max} предложено использовать простой графический метод, который заключается в нахождении зависимости $d_{\max}(C)$ при постоянном значении ε_o , построении графика $(d_{\max} - d)$ от d и определении значения d_{\max} , при котором $d_{\max} - d = 0$.

Для экспериментальной проверки достоверности определения d_{\max} разработана методика проведения эксперимента и расчета вероятности удержания частиц на пузырьке по результатам измерений сил отрыва на инерционном приборе. Высокие значения корреляционных отношений при сравнении теоретических и экспериментальных значений подтвердили возможность использования расчетных зависимостей и методики измерений для оценки вероятности отрыва частиц разной крупности от пузырьков.

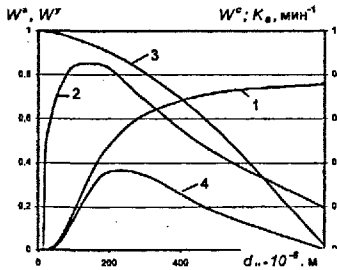


Рис. 1. Влияние крупности частиц угля на вероятности столкновения (1), закрепления (2), удержания (3) и константу скорости флотации (4).

Установленные закономерности влияния крупности частиц угля на вероятности отдельных стадий процесса и величину константы скорости флотации (рис. 1) позволили выявить основные причины малоэффективной флотации частиц угля крайних размеров. Низкая скорость флотации микрочастиц угля ($< 0,02 \text{ мм}$) вызвана малой вероятностью безинерционного столкновения их с пузырьками и близкой к нулю вероятностью закрепления на пузырьках.

Значительные потери крупных частиц угля ($> 0,5 \text{ мм}$) с отходами флотации происходят в результате недостаточной вероятности закрепления их на пузырьках из-за частичного омасливания угольной поверхности и высокой скорости столкновения с пузырьками, а также из-за малой вероятности удержания на пузырьке при попадании в турбулентные вихри перемешиваемой пульпы, т.е. из-за недостаточной прочности контакта частиц с пузырьками.

Значительные потери крупных частиц угля ($> 0,5 \text{ мм}$) с отходами флотации происходят в результате недостаточной вероятности закрепления их на пузырьках из-за частичного омасливания угольной поверхности и высокой скорости столкновения с пузырьками, а также из-за малой вероятности удержания на пузырьке при попадании в турбулентные вихри перемешиваемой пульпы, т.е. из-за недостаточной прочности контакта частиц с пузырьками.

Повышение эффективности действия масляных реагентов при флотации крупных частиц угля

В связи с недостаточной вероятностью закрепления и удержания крупных частиц угля на пузырьках воздуха вопрос о механизме повышения скорости и прочности прилипания частиц к пузырькам в присутствии масел является весьма актуальным, а решение его позволит снизить потери угля с отходами.

Изучение механизма действия масляных реагентов при флотации приводилось в динамических условиях, моделирующих реальный процесс. Для этой цели в работе использованы усовершенствованные и разработанные автором новые методики и приборы.

Время прилипания частиц к пузырьку определялось с помощью контактного прибора, изготовленного на основе механического фотозатвора. Результаты измерений показали снижение времени индукции при повышении концентрации масляных реагентов (рис. 2). Измерения сил отрыва частиц от пузырька, проведенные на двух типах инерционных приборов, свидетельствуют об увели-

чении прочности контакта частицы с пузырьком при добавлении масляных реагентов (рис. 2).

Экспериментальные исследования кинетики процесса отрыва частиц от поверхности пузырька на приборе «Кинетика» показали, что в присутствии масел силы отрыва частиц возрастают при уменьшении времени t действия отрывающей силы (рис. 3). На приборе «Кинетика 2» получены зависимости изменения диаметра периметра контакта и краевых углов от расстояния, на которое опустилась частица под действием отрывающего усилия. Установлено, что отрыв частицы от пузырька происходит в том случае, если за время действия силы периметр контакта успевает сократиться до критического значения.

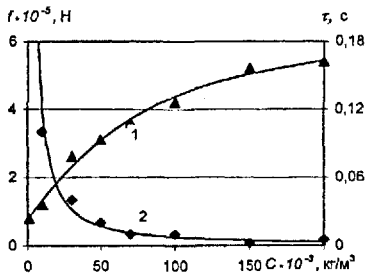


Рис. 2. Влияние концентрации эмульсии октана C на силу отрыва f (1) и время индукции τ (2)

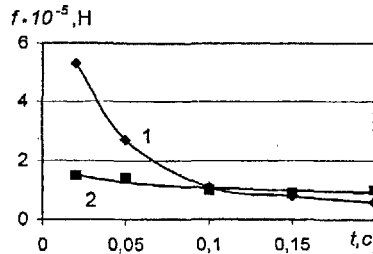


Рис. 3. Влияние времени t на силу отрыва f частицы, обработанной (1) и необработанной (2) маслом

При образовании контакта между частицей и пузырьком и при его разрушении периметр смачивания движется по твердой поверхности со скоростями, зависящими от величины гистерезисных сил. При этом скорость движения относительно поверхности вершины наступающего краевого угла моделирует процесс прилипания частиц к пузырьку, а скорость движения вершины отступающего краевого угла — процесс отрыва. Для экспериментальной оценки этих параметров использован прибор «Гистерезис», с помощью которого показано, что при добавлении масляных реагентов повышается скорость движения наступающего угла и снижается скорость движения отступающего угла, что согласуется с наблюдаемыми в экспериментах сокращением времени индукции и увеличением прочности трехфазного контакта (рис. 2).

Результаты экспериментальных исследований позволили сделать вывод, что упрочнение контакта между частицей и пузырьком связано с наличием вязких сил, возникающих в масляной пленке при перемещении каймы масла по поверхности частицы. Установлена теоретическая зависимость изменения удельной гистерезисной силы $\Delta\psi$ от силы отрыва f .

Расчетные значения сил внутреннего трения при различных вязкости углеводородов и скорости движения периметра смачивания хорошо коррелируют со

значениями $\Delta\psi$, рассчитанными по экспериментальным результатам определения сил отрыва.

Для количественной проверки предложенного гистерезисного механизма действия масляных реагентов рассмотрена роль каймы масла у периметра контакта и зависимость наступающего и отступающего краевых углов каймы от скорости ее перемещения.

При рассмотрении величины отступающего угла учитывалось, что за отступающей каймой образуется пленка масла, толщина которой увеличивается с ростом скорости перемещения каймы и вязкости масла. При малых скоростях движения каймы и низких концентрациях эмульсии масла за отступающей каймой образуется тонкая пленка масла и гистерезисный угол близок к равновесному значению. При увеличении скорости движения толщина пленки за отступающей каймой начинает превышать радиус действия сил расклинивающего давления. При этом отступающий краевой угол становится близким к нулю, а гистерезисный краевой угол омасленного пузырька и сила отрыва частицы увеличиваются. Расчетные значения времени действия силы отрыва ($t \approx 0,1c$), при которых наблюдается существенное упрочнение контакта частицы с пузырьком (рис. 3), хорошо согласуются с экспериментом.

Скорость перемещения трехфазного периметра смачивания по твердой поверхности и величина гистерезисных сил зависят от структуры смачивающей пленки. В работе предложен механизм формирования гетерогенных водно-масляных пленок, состоящих из микроучастков воды и масла. Измерениями скорости и прочности прилипания частиц к пузырьку показана возможность управления свойствами гетерогенных пленок за счет воздействия реагентов на отдельные составляющие расклинивающего давления.

Флотационная активность углеводородных масел в значительной степени зависит от их вязкости. Измерениями времени индукции и сил отрыва установлено, что при повышении вязкости масляных реагентов скорость и вероятность прилипания частиц к пузырьку воздуха уменьшаются, а прочность закрепления и вероятность удержания их на пузырьке увеличиваются. Анализ кинетики флотации в беспенном аппарате и расчеты константы скорости флотации частиц угля различной крупности показали существование граничной крупности частиц, выше которой целесообразно применение вязких углеводородов (более 4 мПа·с). При флотации угля граничная крупность частиц имеет порядок 0,3–0,4 мм (рис. 4).

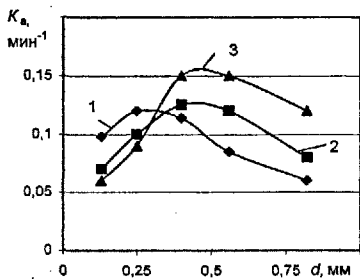


Рис. 4. Влияние крупности частиц угля на константу скорости флотации при вязкости углеводородов: 1 – 4 мПа·с, 2 – 14 мПа·с, 3 – 28 мПа·с

ной крупности частиц, выше которой целесообразно применение вязких углеводородов (более 4 мПа·с). При флотации угля граничная крупность частиц имеет порядок 0,3–0,4 мм (рис. 4).

Интенсификация процессов очистки шламовых вод методом селективной агрегации микрочастиц угля масляными реагентами

Одним из действенных способов интенсификации флотационного метода очистки шламовых вод является снижение количества мельчайших частиц угля в шламовой воде за счет гидрофобной агрегации их масляными реагентами. При этом основная задача заключается в разработке условий, обеспечивающих высокую эффективность образования агрегатов малым количеством масла, не превышающим флотационные расходы. Для решения этой задачи изучены закономерности межфазных взаимодействий в процессе медленной гетерокоагуляции угольно-масляных дисперсий в перемешиваемой суспензии. Константа скорости гетерокоагуляции определяется произведением вероятностей отдельных стадий процесса.

Вероятность столкновений W_c^* капель масла размером d_c с частицами угля размером d_u при условии $d_u \ll d_c$ определяется формулой: $W_c^* = E_c u_c S_u N^4$, где E_c – эффективность столкновений, S_u – площадь поверхности частицы; u_c – скорость движения частиц относительно жидкости, N^4 – число частиц.

Важным параметром, определяющим механизм и вероятность взаимодействий, является скорость u_c , которая зависит от соотношения размера частиц и внутреннего масштаба турбулентности λ_o , гидродинамических характеристик перемешиваемой суспензии. Эффективность столкновения E_c капли масла с частицей угля по механизму зацепления увеличивается при уменьшении крупности частиц и при увеличении крупности капель и диссипации энергии в перемешиваемой суспензии.

Вероятность закрепления капель масла на частицах $W_z^* = K_n W_{зк}^* W_{зм}^*$. Коэффициент $K_n = (1 - A^d / 100)(a/a_{\max})$ учитывает сорбционную способность угля a и количество минеральных включений, вероятности $W_{зк}^*$ и $W_{зм}^*$ характеризуют влияние кинетических и термодинамических факторов.

Действие кинетических факторов определяет вероятность прорыва тонкой пленки жидкости за время контакта частицы и капли. Кинетическую составляющую $W_{зк}^*$ предложено рассчитывать по формуле $W_{зк}^* = 1 - (T_y / T_n)^2$, где T_y – время утончения межфазной пленки; $T_n = T_\lambda = (\lambda^2 / \epsilon_o)^{1/3}$ – период турбулентных пульсаций масштабом $\lambda_d \approx d_u$.

Расчетные значения $W_{зк}^*$ показали ее повышение с увеличением размера капель и при уменьшении размера частиц, а величина диссипации энергии ϵ_o на $W_{зк}^*$ не влияет, т.к. время утончения пленки T_y , как и период пульсаций T_n , пропорциональны $\epsilon_o^{-1/3}$.

Величина термодинамической составляющей $W_{зм}^*$ зависит от расклинивающего давления пленки жидкости и действующих на каплю внешних сил и может быть рассчитана по формуле $W_{зм}^* = \exp[-U(h)\pi R_s^2 / U(r)]$, где $U(h)$ – сум-

марная энергия отталкивания и притяжения тонкой пленки жидкости; $U(r)$ – кинетическая энергия движения капли с учетом вязкой диссипации энергии.

Расчетные значения $W_{зм}^k$ повышаются с увеличением размера капель, при-

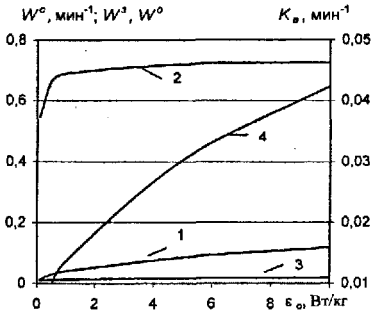


Рис. 5. Влияние ε_0 на вероятности столкновения (1), закрепления (2), отрыва (3) и константы адсорбции (4) каплей на частицах

чем для малых капель (< 5 мкм) величина $W_{зм}^k$ близка к нулю, т.к. значительная часть кинетической энергии малых капель теряется при приближении к потенциальному барьеру. Для крупных капель (> 20 мкм) вероятность $W_{зм}^k$ приближается к единице. Для капель промежуточной крупности увеличение ε_0 значительно повышает $W_{зм}^k$, а крупность частиц угля слабо влияет на ее величину.

Общая вероятность закрепления W_3^k каплей на частицах угля повышается с увеличением размера капель и диссипации энергии (рис. 5). При этом, чем мельче капли и частицы, тем существенней влияние диссипации энергии.

Вероятность удержания каплей $W_3^k = 1 - W_0^k$ определяется через вероятность их отрыва W_0^k , которая зависит от максимального размера r_k^{\max} удерживаемых на частицах каплей $W_0^k = (r_k / r_k^{\max})^{5/3}$. Из условия, что отрыв капли происходит в случае, если энергия турбулентных вихрей превосходит работу адгезии, установлена зависимость $r_k^{\max} = 0,97[\sigma(1 - \cos\theta)\rho^{-1}]^{0,6} \varepsilon_0^{-0,4}$, где σ – поверхностное натяжение на границе раздела масло – вода; θ – краевой угол; ρ – плотность частицы.

Максимальный размер каплей r_k^{\max} , удерживаемых в метастабильном минимуме можно определить по формуле $r_k^{\max} = [3U(h)T_0^2 / 2\pi\rho r_k^{\min}]^{1/4}$, где T_0 – период пульсации, который при $r_k < \lambda_0$ имеет постоянное значение.

Расчетные зависимости константы скорости адсорбции каплей масла на частицах угля $K_a^k = W_c^k W_3^k (1 - W_0^k)$ показывают резкое снижение K_a^k при диссипации энергии меньше 1 Вт/кг и с увеличением крупности частиц, низкую скорость адсорбции мелких капель (~ 5 мкм), при этом минимальный размер закрепляющихся на частицах каплей снижается при увеличении ε_0 . Влияние ε_0 на W_c^k, W_3^k, W_0^k и K_a^k показано рис. 5.

Зависимость извлечения каплей масла $\varepsilon_a^k(t) = 1 - \exp(-K_a^k t)$ от крупности частиц угля хорошо согласуется с результатами экспериментов многих авторов по адсорбции масляных эмульсий фракциями угля различной крупности.

Исследование механизма образования углемастных агрегатов

Установленные закономерности межфазных взаимодействий дисперсных частиц использованы для расчета значений констант скорости переходов в кинетической модели процесса МА, разработанной для изучения кинетики и механизма образования углемастных агрегатов. Модель описывает развитие процесса во времени, основана на вероятностном способе и отражает основные стадии МА – столкновение, закрепление и сохранение контакта между мелкими частицами и каплями масла, каплями масла и крупными частицами, мелкими частицами и омасленными крупными частицами. Для описания процесса агломерации введены следующие обозначения: $\varepsilon_i^j(t)$ – извлечение объектов i в состояние j к моменту времени t ; $\varepsilon_{j\bar{j}}^i(t) = 1 - \exp(-K_{j\bar{j}}^i t)$ – извлечение объектов i на переходе из состояния j в состояние \bar{j} за отрезок времени dt ; $K_{j\bar{j}}^i$ – константа скорости перехода объекта i из состояния j в состояние \bar{j} в единицу времени t ; c, z, y, m – стадии столкновения, закрепления, удержания, отрыва.

Общее извлечение мелких частиц в масляную фазу равняется:

$$\varepsilon_{\bar{f}}^{M^*}(t) = [1 + B(t)]^{-1} \frac{\varepsilon_{\bar{c}}^{M^*}(t)}{1 + C_{\bar{c}}^{z^*}(t) \varepsilon_{\bar{c}}^{M^*}(t)} + [1 + B(t)]^{-1} \frac{\varepsilon_{no}^{M^*}(t)}{1 + C_o^{z^*}(t) \varepsilon_{no}^{M^*}(t)},$$

где $B(t)$ – отношение числа мелких частиц, закрепившихся на омасленных крупных частицах к числу частиц на каплях масла; $C_{\bar{c}}^{z^*}(t)$ и $C_o^{z^*}(t)$ – коэффициенты занятости поверхности соответственно масляных капель и омасленной поверхности крупных частиц.

Извлечение мелких частиц на капли масла равняется:

$$\varepsilon_{\bar{c}}^{M^*}(t) = 1 - \exp\left\{-\frac{K_{\bar{c}}^{czm}}{K_{no}^{ck} + K_{kn}^{tm}} [1 - \exp(-t(K_{no}^{ck} + K_{kn}^{tm}))]\right\}.$$

Извлечение мелких частиц на омасленные крупные частицы равняется:

$$\varepsilon_{no}^{M^*}(t) = 1 - \exp\{-K_{no}^{czm} [1 - \exp(-K_{on}^{tm} t)] / K_{on}^{mm}\},$$

где $K_{no}^{czm} = W_{np}^{cm} M_o(t) W_{no}^{zm}$. Кинетический коэффициент омасливания угольной поверхности с учетом адсорбционной способности угля a равняется:

$$M_o(t) = a \{1 - \exp[-K_o^M \{t + [\exp(-K_{no}^K t) - 1] (K_{no}^K)^{-1}\}]\}.$$

Константа $K_o^M = K_{op}^{cm} M^d$ характеризует скорость омасливания угольной поверхности за счет передачи реагента с частицы на частицу.

Для экспериментальной оценки изменения дисперсного состава угля в процессе МА использован метод фотоэлектрической седиментометрии и введен показатель степени агрегации $Ag_i^d = 100(\beta_u^d - \beta_i^d) / \beta_u^d$, где β_u^d и β_i^d – содержание узких классов частиц в начальный момент времени и в момент времени t .

В работе изучено влияние на степень агрегации тонкого угля многих технологических факторов, что дало возможность установить основные закономерности процесса МА и целенаправленно воздействовать на него.

Изучение механизма образования углемастных агрегатов в зависимости от свойств взаимодействующих фаз и гидродинамических условий перемешивания пульпы позволило сделать ряд важных выводов.

1. Степень омасливания угольной поверхности увеличивается в результате соударения частиц и передачи реагента с частицы на частицу в турбулентных потоках перемешиваемой пульпы. При этом степень омасливания растет с увеличением интенсивности перемешивания суспензии и дисперсности масляной фазы (рис. 6). Влияние крупности капель масла на величину $M_o(t)$ становится малозаметным при высоких значениях диссипации энергии ($\varepsilon = 10$ Вт/кг). При слабом перемешивании пульпы скорость омасливания низкая, особенно при подаче масла без диспергирования.

2. Суммарное извлечение мелких частиц в углемастные агрегаты определяется в основном извлечением их на омасленные крупные частицы (рис. 7), т.к. процесс адсорбции капель на поверхность угля протекает с большей скоростью, чем процесс закрепления мелких частиц угля на каплях масла. Этот вывод подтверждается повышением степени и скорости агрегации микрочастиц угля при добавлении даже небольшого количества крупных частиц.

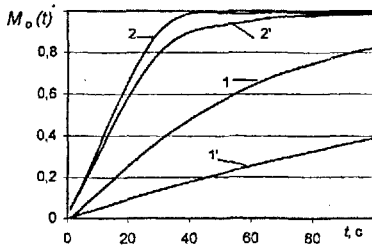


Рис. 6. Кинетические зависимости $M_o(t)$ при диссипации энергии 1 Вт/кг (1, 1') и 10 Вт/кг (2, 2') и размерах капель масла 15 мкм (1, 2) и 60 мкм (1', 2')

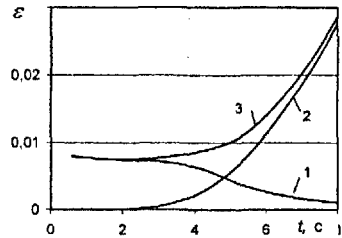


Рис. 7. Кинетические зависимости извлечения ε мелких частиц: 1 — на капли масла; 2 — на омасленные участки крупных частиц; 3 — суммарное извлечение

3. Основной причиной низкой степени агрегации (< 30 %) тонкого угля при расходе масла не более 10 кг/т является недостаток свободной поверхности масла, т.к. вследствие малой толщины масляной пленки мелкие частицы угля при закреплении на омасленных частицах не втягиваются в объем масляной фазы и остаются на поверхности раздела масло-вода, постепенно занимая всю свободную площадь. В результате этого резко снижается вероятность закрепления мелких частиц на омасленных крупных частицах при их соударении.

Занятость поверхности масла осевшими частицами в момент времени t определяется по формуле

$$C_o^2(t) = \frac{\gamma_m \bar{r}_p}{4(1-\gamma_m)\bar{r}_m M_o(t)} \varepsilon_{\phi}^m(t),$$

где γ_m - содержание мелких частиц в исходном материале; \bar{r}_m и \bar{r}_p - средние радиусы соответственно мелких и крупных частиц; $M_o(t)$ - кинетический коэффициент омасливания крупных частиц; $\varepsilon_{\phi}^m(t)$ - суммарное извлечение мелких частиц в масляную фазу. Расчеты показали, что в реальных условиях при полной занятости поверхности масла максимально возможная степень агрегации не превышает 40-50 %.

Следовательно, для достижения высокой степени агрегации микрочастиц угля маслом необходимо интенсивное перемешивание суспензии в течение некоторого времени и достаточная площадь поверхности раздела масло - вода.

Интенсивная технология очистки шламовых вод с использованием процесса масляной аэроагломерации (МАО) угольных шламов

Увеличить поверхность раздела масло - вода без увеличения расхода масла можно введением в суспензию дополнительных центров агрегации мелких частиц, в качестве которых можно использовать омасленные пузырьки воздуха, т.к. толщина масляной пленки на пузырьках примерно на 2 порядка меньше ее толщины на угольной поверхности. На поверхности мелких омасленных пузырьков с высокой скоростью закрепляются частицы угля, образуя устойчивые углемасляные аэрокомплексы, которые легко отделяются от минеральной пульпы последующей флотацией.

Исследование механизма и закономерностей процесса МАО проведено с использованием специальной камеры агломерации, оборудованной гидрозатвором, а также на смонтированной в отделении флотации ЦОФ «Сибирь» стендовой установке производительностью до 5 м³/ч. Показатели флотации угольных шламов после проведения МАО свидетельствуют о более высокой по сравнению с МА скорости флотации и повышении извлечения в концентрат как мелких, так и крупных частиц угля (табл. 2).

Улучшение флотации мелких частиц угля связано с повышением скорости и степени их агрегации. С увеличением диссипации энергии ε_o уменьшается размер пузырьков воздуха, а газосодержание увеличивается, что приводит к повышению степени агрегации мелких частиц. В процессе МАО на поверхности крупных частиц закрепляются мелкие пузырьки воздуха, повышая эффективность последующей флотации по коалесцентному механизму. Закрепление пузырьков на угольной поверхности подтверждается снижением скорости осаждения крупных частиц угля после прекращения перемешивания суспензии.

Сравнение кинетических характеристик двух процессов показывает, что за счет использования масляной аэроагломерации шламов сближаются показатели флотации частиц угля разной крупности, увеличивается скорость флотации тонких шламов и сокращаются потери крупных частиц угля с отходами. В результате этого повышается извлечение угольных частиц в концентрат, растет

удельная производительность оборудования при снижении производственных затрат.

Таблица 2
Результаты флотации угольных шламов после процессов МА и МАА

Продукты	Время, мин	Питание флотации		Крупность, мм					
				0 – 0,045		0,045 – 0,25		+ 0,25	
		γ, %	A ^d , %	γ, %	A ^d , %	γ, %	A ^d , %	γ, %	A ^d , %
<i>после МА</i>									
Концентрат	4,8	89,8	6,1	38,5	7,9	25,6	5,3	25,8	4,0
Отходы		10,2	68,2	8,9	70,2	0,8	61,5	0,5	44,9
Всего		100	12,4	47,4	19,6	26,4	7,0	26,2	4,8
<i>после МАА</i>									
Концентрат	3,3	91,5	6,3	41,2	7,9	26,0	5,9	26,0	4,4
Отходы		8,5	77,3	7,8	79,0	0,5	62,3	0,2	49,8
Всего		100	12,4	47,4	19,6	26,4	7,0	26,2	4,8

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность процесса МАА, является количество энергии, затрачиваемой на перемешивание пульпы. С увеличением диссипации энергии выше 3–5 Вт/кг заметно улучшаются все показатели селективной сепарации шламов, повышается эффективность природопользования. При этом, чем больше тонкодисперсных частиц в суспензии, тем больше должны быть затраты энергии и продолжительность процесса.

Подача воздуха в камеру агломерации значительно повышает эффективность процесса при одновременном снижении энергозатрат на перемешивание газосодержащей суспензии. При определении оптимального количества добавляемого воздуха учитывалось, что избыточное образование и накопление пены в камере агломерации снижает эффективность процесса в результате уменьшения концентрации угольных частиц и масла в объеме пульпы. Для предотвращения накопления пены конструкция аэрационной трубы предусматривает автоматическую регулировку количества засасываемого воздуха на заданном уровне. Многочисленными технологическими исследованиями очистки шламовых вод с использованием МАА и флотации угольных шламов установлены оптимальные параметры процессов и показана возможность улучшения показателей очистки для всех исследованных шламов.

Таким образом, использование новой технологии в схемах очистки шламовых вод позволяет повысить эффективность очистки и улучшить качество оборотной воды, увеличить количество выпускаемой конечной угольной продукции, сократить потери угля и количество сбрасываемых отходов, снизить загрязнение окружающей среды и обеспечить рациональное использование ресурсов угля. Следовательно, интенсификацией сепарационных процессов достигается повышение экологической безопасности углеобогащения с получением значительного экологического и экономического эффектов.

Повышение экологической безопасности работы УОФ интенсификацией процессов механического обезвоживания мелкого угля

Перспективным направлением повышения экологической безопасности работы УОФ является интенсификация процессов механического обезвоживания угля. Снижение влажности мелких угольных концентратов создает предпосылки для полного или частичного исключения термической сушки угля, которая является дорогим, взрывоопасным процессом, в ходе которого выбросы загрязняющих веществ в атмосферу составляют более 80 % от всех выбросов УОФ. Наибольшую сложность представляет механическое обезвоживание тонких угольных шламов, поэтому образование агрегатов из мелких частиц угля способствует повышению эффективности их обезвоживания. Использование для агрегации угля процесса МА создает надежную основу для интенсификации механического обезвоживания шламов, т.к. хорошая смачиваемость угольной поверхности маслом обеспечивает вытеснение влаги и снижение влажности обезвоженного продукта. Кроме того, повышается скорость формирования осадка и снижается унос твердых частиц через отверстия перегородок.

Установлено, что для повышения эффективности процесса фильтрации необходимо проводить повторную агломерацию частиц флотоконцентрата с добавлением небольшого количества масла. Экспериментальные исследования показали, что включением в схему регенерации оборотной воды двух операций МА достигается снижение влажности осадка вакуум-фильтров на 4-5 % и увеличение их удельной производительности на 40-50 %.

Для количественной оценки экологического эффекта установлена зависимость относительного удельного снижения расхода топлива в сушильных агрегатах $D_{\text{вуд}}$ при снижении влажности поступающего на сушку осадка вакуум-фильтров $W_{\text{ос}}$ на 1%: $D_{\text{вуд}} = (2,3 - 1,4 \ln W_{\text{ос}}) \ln m - 0,14 W_{\text{ос}} + 5,9$, где $W_{\text{ос}}$ – влажность поступающего на сушку гравитационного концентрата; m – отношение массы сухого гравитационного концентрата к массе сухого осадка вакуум-фильтров. Установленные в работе зависимости $D_{\text{вуд}}(m)$ свидетельствуют о возможности снижения удельного расхода топлива на 3-4 %. Следовательно, за счет снижения влажности осадка вакуум-фильтров на 4-5 % количество сжигаемого при термической сушке топлива сократится на 15-18 % и уменьшатся выбросы загрязняющих веществ в атмосферу на такую же величину.

Более значительное снижение влажности достигается, если агрегированный маслом флотоконцентрат совместно с мелким гравитационным концентратом последовательно обезвоживается на вибрационных грохотах и в центрифугах. При подаче флотоконцентрата на дренажный слой из частиц угля большего размера (гравитационные концентраты) углемастные агрегаты прочно налипают на гидрофобную поверхность крупных частиц, вытесняя при этом гигроскопическую влагу с их поверхности. Лабораторными исследованиями показано, что глубокое обезвоживание смеси концентратов возможно только при высокой степени агрегации частиц флотоконцентрата. В этом случае можно получить конечный концентрат влажностью до 10 %. Без масляной аг-

ломерации значительная часть (более 50 %) флотоконцентрата уходит в подрешетный продукт грохота, что делает эту операцию нецелесообразной.

Новая технология обезвоживания флотоконцентрата создает предпосылки

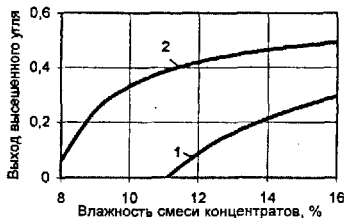


Рис. 8. Зависимости $\gamma_{\text{суш}}(W_{\text{см}})$:
1 — летом; 2 — зимой

для исключения из технологической схемы УОФ процесса термической сушки. Для оценки возможного сокращения объемов сушки угля и определения выхода направляемого на сушку концентрата $\gamma_{\text{суш}}$ получены зависимости $\gamma_{\text{суш}}(W_{\text{см}})$, которые показывают (рис. 8), что при влажности обезвоженной смеси $W_{\text{см}}$ мелкого и флотационного концентратов менее 11 % появляется возможность полного отказа от сушки угля летом и снижения выхода направляемого на сушку концентрата зимой.

Кроме того, дополнительный экологический эффект достигается в результате снижения пыления и потерь угля при погрузке и транспортировке общего концентрата, в котором шламовые частицы повышенной влажности.

Переработка и утилизация угольных шламов методом масляной агломерации (МА) угля

Огромное количество скопившихся в гидроотвалах шламов, значительные потери угля и загрязнение окружающей среды сбросами техногенных вод угольных предприятий обуславливают необходимость разработки эффективных технологий переработки и утилизации шламовых отходов. Весьма перспективно применение для этой цели метода масляной агломерации угля, который заключается в образовании крупных углемасляных агрегатов и разделении продуктов агломерации по крупности. К преимуществам этого метода можно отнести высокую селективность образования агрегатов из тонкодисперсных и крупных угольных частиц, возможность эффективно обезвоживать на грохотах и в центрифугах с получением кондиционных продуктов, что подтверждается результатами переработки угольных шламов Кузбасса различных марок и крупности. Однако основным недостатком метода — высокий расход масла (100–200 кг/т) ограничивает его применение в практике углеобогащения.

При использовании известных технологий МА повышенный расход масляного связующего вызван необходимостью образования крупных углемасляных гранул, чтобы при разделении на сите не происходило засорение подрешетного продукта мелкими агрегатами. Для сокращения потерь угля при пониженном расходе связующего (10–50 кг/т) разработано несколько вариантов технологических решений, из которых наиболее эффективно разделение продуктов МА происходит при фильтрации их через слой гидрофобных частиц гравитационного концентрата. Исследование процесса разделения продуктов МА на экспериментальной установке показало, что качество продуктов разделения зависит от свойств и расхода связующего, содержания твердого в суспензии, крупности

частиц в дренажном слое и его толщины, интенсивности механического воздействия на процесс фильтрации. Обезвоживание надрешетного продукта грохота в центрифуге позволяет снизить влажность концентрата до 8–12 % и использовать его без дополнительной обработки.

Эколого-экономические показатели переработки и использования шламового концентрата для производства энергии показывают, что значительная прибыль Π достигается при расходе масла $Q_m = 30 \div 50$ кг/т, а высокие значения показателя эффективности природопользования $K_{эп}$ объясняются повышенной стоимостью $C_{пр}$ низкогопольного топлива при сравнительно небольших себестоимости C_b и затратах производства (рис. 9).

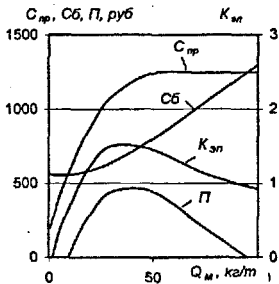


Рис. 9. Влияние расхода масла на эколого-экономические показатели МА

обусловлена возможностью осуществления процесса в широком диапазоне плотности водоугольной суспензии и высокой эффективностью агломерации тонкодисперсных угольных частиц. Необходимость измельчения угля для приготовления ВУТ и обновление при этом угольной поверхности создает предпосылки для утилизации окисленных угольных шламов из отстойников в виде экологически чистого топлива.

Таким образом, очевидна перспективность применения МА при переработке и утилизации шламов энергетических углей, т.к. практически полное извлечение в угольный концентрат органической части углей и беззольного углеводородного связующего приводит к дополнительному повышению теплотворной способности получаемого топлива, а рост его стоимости компенсирует затраты производства.

Промышленные испытания и внедрение разработанных технологий очистки шламовых вод и обезвоживания флотоконцентрата

Теоретические положения диссертационной работы, послужившие основой разработанных природоохранных технических решений, прошли проверку в промышленных условиях и внедрены на УОФ.

Технология совместного обезвоживания агрегированного флотационного концентрата и концентрата спирального сепаратора на высокочастотном грохоте испытана на ЦОФ «Сибирь». Промышленные испытания показали перспективность нового способа обезвоживания флотоконцентрата при решении проблемы исключения термической сушки угля из схем УОФ.

Технология селективной очистки шламовых вод с использованием процесса МАА внедрена в 2001 и 2002 годах на двух секциях ЦОФ «Сибирь», в 2004 году – на ГОФ «Томусинская» и в 2006 году – на ОФ «Анжерская». Сравнительная оценка результатов работы фабрик до и после внедрения новой технологии показала, что применение МАА позволило уменьшить загрязненность оборотной воды и обеспечило повышение экологической безопасности и экономической эффективности работы фабрик: сократились потери угля и количество сбрасываемых шламовых отходов на 40–50 %, уменьшилось количество загрязняющих выбросов в атмосферу при термической сушке на 8–12 %, увеличился выход угольного концентрата на 0,5–1 %.

Величина предотвращенного экологического ущерба, достигнутая в результате сокращения ущерба земельным ресурсам при размещении меньшего количества шламовых отходов, уменьшения ущерба минеральным ресурсам от потерь углей и снижения ущерба от загрязнения атмосферного воздуха, составила 49 млн руб.

Дополнительный экономический эффект от внедрения природоохранной и ресурсосберегающей технологии очистки шламовых вод на трех обогатительных фабриках, полученный за счет выпуска дополнительной продукции и сокращения производственных затрат, превысил 120 млн руб.

Дальнейшее развитие практических работ по реализации проверенных и внедренных на фабриках технических решений направлено на создание малоотходной технологии углеобогащения, которая включает четыре основных цикла: очистку шламовых вод методами селективной агрегации и флотации тонких угольных шламов; масляную агломерацию и эффективное механическое обезвоживание флотоконцентрата; обезвоживание и «сухое» складирование высокозольных шламовых отходов; утилизацию шламов гидроотвалов.

Отдельные мероприятия по созданию малоотходной технологии углеобогащения осуществляются в настоящее время на ОФ «Анжерская», где внедрена установка МАА и создан за счет этого фронт флотации для переработки шламов гидроотвала, планируется обезвоживание высокозольных шламовых отходов на фильтр-прессах и эффективное механическое обезвоживание флотоконцентрата. Реализация указанных мероприятий позволит исключить термическую сушку и ликвидировать загрязняющие выбросы в атмосферу, утилизировать шламы гидроотвала и провести рекультивацию освобожденной земли, создать замкнутую систему оборотного водоснабжения и обеспечить технологические процессы «чистой» оборотной водой, получить дополнительный угольный концентрат, что значительно повысит экологическую безопасность работы УОФ.

Внедрение на обогатительных фабриках разработанных в диссертации технических решений вносит значительный вклад в решение геоэкологических проблем угольной промышленности.

Заключение

Диссертация является квалификационной научной работой, в которой теоретические и экспериментальные исследования в области управления устойчивостью дисперсных систем позволили установить новые и развить известные знания о закономерностях межфазных взаимодействий в процессах масляной агрегации и флотации угольных шламов, что явилось теоретической основой для разработки способов интенсификации процессов очистки шламовых вод и технологических решений по созданию малоотходной технологии углеобогащения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономического потенциала и решение геоэкологических проблем угольной отрасли.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Определяющим фактором экологической безопасности углеобогащения является степень совершенства наиболее экономически затратных и экологически «грязных» технологий очистки шламовых вод, совершенствование которых должно быть направлено на снижение загрязненности оборотной воды, уменьшение количества шламовых отходов и сокращение ущерба от потерь углей, а также на ликвидацию основных источников загрязнения природы – гидроотвалов и выбросов термической сушки, что позволит комплексно решить проблемы охраны природы, ресурсосбережения и оборотного водопотребления.

2. Использование сепарационных процессов в схемах очистки шламовых вод повышают экологическую безопасность углеобогащения, обеспечивая устойчивое получение кондиционного концентрата при колебаниях качества рядовых углей, рациональное использование природных ресурсов и снижение загрязнения окружающей среды шламовыми отходами. Вместе с тем, недостаточные глубина и селективность применяемых процессов очистки шламовых вод от тонких угольных шламов, являющихся основными источниками потерь углей и загрязнения природной среды, свидетельствует о необходимости интенсификации и разработки высокоэффективных водно-шламовых процессов для создания на их основе малоотходной технологии углеобогащения.

3. Кинетическими исследованиями элементарного акта флотации выявлены причины низкой эффективности флотационного метода очистки шламовых вод, связанные с малой вероятностью безинерционного столкновения и закрепления тонкодисперсных частиц угля на пузырьках воздуха и недостаточной прочностью контакта крупных угольных частиц с пузырьками. Анализ установленных закономерностей образования и разрушения флотационных комплексов показал, что для экологизации технологий очистки необходимы селективная агрегация тонкодисперсных угольных частиц и повышение эффективности действия масляных реагентов.

4. Теоретическими и экспериментальными исследованиями механизма действия масляных реагентов доказана зависимость скорости и прочности прилипания частиц к пузырькам воздуха от величины гистерезисных сил и установлено, что для сокращения потерь крупных угольных частиц с отходами флотации необходимо использовать масляные реагенты, свойства которых должны соответствовать крупности флотируемых частиц.

5. Эффективным способом интенсификации процессов очистки шламовых вод и утилизации шламов является селективная агрегация угольных дисперсий масляными реагентами, которая достигается при интенсивной турбулизации суспензии за счет увеличения числа результативных столкновений частиц угля и капель масла и повышения энергии взаимодействия их между собой. Экспериментальным и теоретическим определением степени агрегации угольных частиц установлено, что основными факторами, определяющими эффективность агрегации, являются диссипация энергии в перемешиваемой суспензии и площадь поверхности раздела масло – вода, величина которой уменьшается в ходе агрегации и зависит от степени омасливания угольной поверхности и содержания тонкодисперсных частиц угля.

6. Интенсификация сепарационных процессов очистки шламовых вод достигается проведением масляной агломерации угольных шламов в аэрированной пульпе в результате многократного увеличения поверхности раздела масло – вода и образования углемасляных аэрокомплексов, повышающих эффективность и скорость последующей угольной флотации. Разработанная на основе процесса масляной аэроагломерации угольных шламов технология селективной очистки шламовых вод от тонкодисперсных частиц позволяет при пониженном расходе масла повысить скорость и качество очистки, сократить количество шламовых отходов и загрязнение ими окружающей среды, снизить потери углей и получить дополнительный кондиционный товарный продукт.

7. Эффективным способом защиты воздушной среды от выбросов пыли и загрязняющих веществ при термической сушке углей является интенсификация процессов механического обезвоживания шламовых концентратов агрегацией мелких частиц угля масляными реагентами, обеспечивающей снижение влажности обезвоженных продуктов за счет вытеснения маслом влаги с угольной поверхности, увеличение скорости формирования осадка из агрегированных частиц и уменьшение их уноса через отверстия перегоронок.

8. Перспективность широкого применения природоохранной технологии переработки и утилизации угольных шламов путем селективного разделения продуктов масляной агломерации фильтрацией через слой гидрофобных частиц обусловлена высокими эколого-экономическими показателями и возможностью производить из шламов кондиционный угольный концентрат без термической сушки, что особенно важно при переработке углей с повышенным выходом летучих веществ.

9. Практическое применение разработанной малоотходной технологии углеобогащения на основе испытанных и внедренных в производство технических решений по интенсификации процессов очистки шламовых вод, обезвоживания и утилизации шламов повышает эффективность использования при-

родных ресурсов и снижает негативное воздействие обогатительных фабрик на окружающую среду.

10. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны, испытаны и внедрены в производство технологии очистки шламовых вод, обезвоживания и утилизации шламов с использованием масляной агломерации угля, повышающие экологическую безопасность работы предприятий. Предотвращенный экологический ущерб в результате внедрения разработок автора только на трех УОФ Кузбасса составил 49 млн. рублей. Годовой экономический эффект от улучшения производственной деятельности этих же фабрик превысил 120 млн. рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. Исследование условий подавления фосфорита при карбонатной флотации руд / А. А. Байченко, Н. В. Бурдин, М. С. Клейн, Ж. У. Досумов // Известия ВУЗов. Горн. журн., 1975. – № 9. – С. 158–160.

2. Клейн, М. С. Исследование селективности флотации фосфатно-карбонатных руд Джанатаса / М. С. Клейн // Флотационное обогащение руд и очистка сточных вод : сб. науч. тр. / Ин-т горн. дела СО АН СССР. – Новосибирск, 1980. – С. 9–16.

3. Клейн, М. С. О действии аполярных реагентов при фосфатной флотации / М. С. Клейн // Библиографический указатель ВИНТИ «Депонированные научные работы». – М., 1981. – № 9. – С. 96.

4. Клейн, М. С. Улучшение технологических показателей флотации углей, содержащих топкидисперсные шламы // Интенсификация процессов обогащения полезных ископаемых : сб. науч. тр. / М. С. Клейн, А. П. Ломакин; Ин-т горн. дела СО АН СССР. – Новосибирск, 1982. – С. 40–48.

5. Байченко, А. А. О прочности закрепления частиц минералов на всплывающих пузырьках воздуха / А. А. Байченко, М. С. Клейн // Известия ВУЗов. Горн. журн., 1986, – № 2. – С. 117–119.

6. Клейн, М. С. Роль гистерезисных сил при флотации крупных частиц // Энергетические воздействия в процессах переработки минерального сырья : сб. науч. тр. // М. С. Клейн ; Ин-т горн. дела СО АН СССР. – Новосибирск, 1987. – С. 133–140.

7. Байченко, А. А. Гистерезис смачивания и упрочнение контакта между частицей и пузырьком в присутствии аполярного реагента / А. А. Байченко, А. В. Листовничий, М. С. Клейн // Коллоидный журнал, 1989. – Т. 1. – С. 127–129.

8. Клейн, М. С. Осветление вод отходов флотации угля / М. С. Клейн, А. А. Байченко, Г. В. Иванов // Библиографический указатель ВИНТИ «Депонированные научные работы». – М., 1989. – № 12 (218) – С. 14.

9. Клейн, М. С. Масляная грануляция угольных шламов Кузбасса / М. С. Клейн, А. А. Байченко, Е. В. Почевалова // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 1999. – № 6. – С. 59–62.

10. Клейн, М. С. Обогащение шламов энергетических углей методом масляной грануляции / М. С. Клейн, Е. В. Почевалова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : труды междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2000. – С. 101–102.

11. Байченко, А. А. О механизме образования при флотации гетерогенных пленок между частицей и пузырьком / А. А. Байченко, М. С. Клейн // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 2000. – № 4. – С. 117–123.

12. Клейн, М. С. Перспективы использования процесса масляной грануляции при переработке угольных шламов / М. С. Клейн, Е. В. Почевалова // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2000. – С. 211–212.

13. Клейн, М. С. Влияние вязкости аполярных реагентов на флотируемость крупных частиц / М. С. Клейн, А. А. Байченко, // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2001. – № 1. – С. 93–95.

14. Клейн, М. С. Подготовка шламов энергетических углей к сжиганию в виде водоугольного топлива. / М. С. Клейн, Е. В. Почевалова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : труды междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2001. – С. 141–142.

15. Клейн, М. С. Повышение эффективности регенерации шламовых вод углеобогащения / М. С. Клейн // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс-2001 : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2001. – С. 213–214.

16. Клейн, М. С. Селективная масляная агрегация тонких угольных шламов / М. С. Клейн, В. И. Иванов // Научоемкие технологии добычи и переработки полезных ископаемых : материалы очно-заочной науч. конф. ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2001. – С. 174–176.

17. Клейн, М. С. Обогащение и обезвоживание тонких угольных шламов с использованием метода масляной грануляции / М. С. Клейн, А. А. Байченко, Е. В. Почевалова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. : МГУ, 2002. – № 4. – С. 237–239.

18. Клейн, М. С. Селективная сепарация по смачиваемости угольных и породных частиц / М. С. Клейн // Проблемы ускорения научно-технического прогресса в отраслях горного производства : материалы междунар. науч.-практ. конф. – М. : ННЦ ГП – ИГД им. А. А. Скочинского, 2003. – С. 385–392.

19. Клейн, М. С. Оценка эффективности процесса масляной агломерации мелких угольных частиц / М. С. Клейн // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2003. – № 5. – С. 82–85.

20. Применение масляной агломерации для глубокого обогащения угля / А. Н. Заостровский, В. И. Мурко, М. С. Клейн и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – МГУ, 2003. – № 12. – С. 187–189.

21. Клейн, М. С. Кинстическая модель процесса масляной агломерации / М. С. Клейн // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2003. – № 6. – С. 74–79.

22. Утилизация угольных шламов Кузбасса в виде высококонцентрированных водоугольных суспензий / Г. А. Солодов, А. Н. Заостровский, А. В. Папил, Т. А. Папица, М. С. Клейн // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2003. – № 6. – С. 71–74.

23. Клейн, М. С. Повышение экологической безопасности углеобогащения при интенсификации процессов механического обезвоживания угольных шламов / Клейн М. С. // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2004. № 6(1). – С. 109–111.

24. Клейн, М. С. Ресурсосберегающие и экологичные технологии регенерации шламовых вод углепереработки / М. С. Клейн // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс-2004 : материалы X междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2004. – С. 263–265.

25. Клейн, М. С. Проблемы экологии и ресурсосбережения при очистке шламовых вод углепереработки / М. С. Клейн, Т. Е. Алешкина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2005. – № 2. – С. 114–117.

26. Клейн, М. С. Эффективная технология извлечения мелкого угля из техногенных вод углеобогатительных фабрик / М. С. Клейн // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2005. – № 2. – С. 117–119.

27. Клейн, М. С. Экологизация процессов очистки шламовых вод углеобогащения / М. С. Клейн, Т. Е. Алешкина // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2005. – С. 294–296.

28. Клейн, М. С. Рациональное природопользование и экологизация производства при обогащении углей / М. С. Клейн // Вест. Кузбасс. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2005. – № 5. – С. 72–75.

29. Клейн, М. С. Очистка шламовых вод углеобогащения с использованием селективной сепарации шламов масляными реагентами / М. С. Клейн // Уголь, 2005. – № 9. – С. 43–45.

30. Клейн, М. С. Эффективное природопользование и природоохранные технологии углепереработки / М. С. Клейн, Т. Е. Алешкина // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы XI Всероссийской науч.-практ. конф., 7–9 декабря 2005 г. – Томск, 2005. – С. 302–304.

31. А.с. № 940009 СССР, МКИ³ G01N 13/00. Устройство для измерения сил отрыва частиц минералов от пузырька газа / А. А. Байченко, М. С. Клейн; опубл. 30.06.82, Бюл. № 24.

32. Пат. № 2223828 РФ, МПК⁷ В 03 D 1/02. Способ обогащения угольных шламов / ЗАО ЦОФ «Сибирь»; Клейн М. С. Опубл. 20.02.2004. Бюл. № 5.

33. Патент № 2268289 РФ, МПК C10 L 1/32. «Способ получения композиционного водоугольного топлива» / ЗАО «НПП «Сибэкотехника»; Мурко В. И., Федяев В. И., Дзюба Д. А., Заостровский А. Н., Папина Т. А., Клейн М. С.; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 02.

Подписано к печати 30.05.2006. Формат 60×84 1/16

Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ № 442

Типография Кузбасского государственного технического университета,
650026, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.

