

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Кондратьева Сергея Александровича на диссертацию Прохоровой Евгении Олеговны на тему: «Развитие комплексного подхода к оценке флотируемости мелких классов высокозольных углей для их эффективного обогащения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

1. Актуальность темы диссертации

В структуре мирового энергетического баланса уголь продолжает занимать значительную долю, а в России он остаётся стратегическим сырьём для металлургии и теплоэнергетики. При этом качество добываемых углей систематически снижается: растёт зольность, увеличивается доля тонких и труднообогатимых классов, повышается содержание минеральных примесей, которые при традиционных гравитационных схемах переходят в отвалы, создавая техногенную нагрузку. Особенно остро эта проблема наблюдается для мелких классов крупности, где гравитация практически неэффективна, а флотация требует подбора реагентных режимов.

В последние годы наблюдается дефицит качественных коксующихся углей, что заставляет обогатительные фабрики вовлекать в переработку высокозольные шламы с нестабильным вещественным составом. Однако существующие подходы к выбору собирателей и депрессоров базируются преимущественно на эмпирическом опыте, без учёта количественных оценок изменений поверхностных свойств. В связи с этим разработка комплексного метода, позволяющего на основе измерения свободной поверхностной энергии и её составляющих прогнозировать флотируемость и обоснованно выбирать реагенты, является актуальной. Диссертация Прохоровой Е.О., направленная на создание такого подхода и его практическую реализацию, имеет важное народнохозяйственное значение для минерально-сырьевого и металлургического комплекса.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна работы заключается в разработке комплексного подхода выбора аполярного собирателя, базирующегося на последовательной оценке динамической вязкости аполярных собирателей и эмульсий, скорости их растекания и изменений термодинамических характеристик поверхности, в обосновании применения коэффициента смачивания k , определяемого отношением работы адгезии к работе когезии, что позволяет численно характеризовать селективность действия реагентов, в установлении

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-362 от 03.08.2026
АУ УС

зависимостей зольности и выхода концентрата при флотогравитации от частоты колебаний деки и расхода собирателя.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений обеспечена использованием фундаментальных законов термодинамики поверхностных явлений, корректным применением стандартных методик ГОСТ при определении зольности, гранулометрического состава и фракционного анализа. Достоверность экспериментальных данных подтверждена большим объёмом опытов, применением современного оборудования и статистической обработкой результатов с оценкой сходимости. Выводы и рекомендации логически вытекают из полученных результатов, не противоречат известным положениям теории флотации и подкреплены положительными результатами внедрения в АО «Механобр инжиниринг».

Результаты диссертации апробированы на 12 научно-практических конференциях, включая 7 международных.

4. Научные результаты, их ценность

В диссертации получен ряд результатов, обладающих как теоретической, так и прикладной ценностью. Теоретическая ценность состоит в создании количественного метода оценки селективности действия реагентов на основе коэффициента смачивания. Автор показал, что изменение полярной и дисперсионной составляющих свободной поверхностной энергии при адсорбции реагентов связано с их флотационной активностью не только качественно, но и количественно. Для угля марки Д под действием эмульсии веретенного масла работа адгезии снижается с 94,84 мДж/м² до 64,47 мДж/м², а коэффициент смачивания – с 0,65 до 0,44, что напрямую коррелирует с ростом извлечения в пенный продукт.

Практическая ценность результатов выражается в следующем:

- разработанный комплексный подход позволил обосновать возможность применения эмульсии веретенного масла с раствором неолола АФ 9-12 (соотношение 40:60), которая обеспечивает снижение зольности концентрата на 1,97 % и увеличение его выхода на 3,59 % по сравнению с эмульсией керосина;

- на основе разработанной схемы (пенная и плёночная) предложены два варианта процесса флотогравитации, позволяющие получать из углей крупностью –6+0 мм три продукта, при этом концентрат имеет требуемую зольность для дальнейших процессов энергетической и металлургической промышленности, а промпродукт направляется на доизмельчение и последующую флотацию;

- получены математические модели, описывающие процесс с погрешностью не более 5 %, что даёт возможность прогнозировать результаты при изменении параметров;
- разработанная принципиальная технологическая схема имеет индекс доходности 4,64 и срок окупаемости 2,8 года (без дисконтирования), что подтверждено экономическими расчётами.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus; получено 2 патента.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость заключается в систематизации и углублении знаний о взаимосвязи между поверхностными термодинамическими параметрами и флотационным поведением углей и вмещающих минералов. Предложенный коэффициент смачивания даёт возможность не только сравнивать реагенты, но и прогнозировать их поведение на разных типах сырья, что расширяет методологическую базу физико-химии флотации.

Практическая значимость состоит в создании технологических решений, готовых к промышленному использованию:

- методика оценки поверхностных свойств внедрена в исследовательскую практику АО «Механобр инжиниринг» (акт о внедрении результатов диссертации от 21.05.2025 г.);
- разработанные способы обогащения защищены патентами РФ на изобретения № 2812378, № 2837504;
- экономическая эффективность схемы подтверждена расчётами, показавшими высокую рентабельность, что особенно важно в условиях импортозамещения и необходимости переработки труднообогатимых углей.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, рекомендуется использовать:

- в проектных и научно-исследовательских организациях горно-обогатительного сектора при разработке технологических решений обогащения мелких классов высокозольных углей и корректировке реагентных режимов обогатительных фабрик;
- в учебном процессе высших и средних учебных заведений при чтении курсов по специальности обогащение полезных ископаемых.

7. Замечания и вопросы по работе

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Основываясь на работе [Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Пестряк И. В., Лезова С. П., Поливанская В. В. Повышение эффективности закрепления аполярных собирателей на алмазах / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5] прочность закрепления флотационного реагента автором диссертации связывается с вязкостью аполярного реагента. Вязкость химического соединения определяется силами когезии и исходя из предположения о необходимости высокой вязкости автор выбирает веретенное масло (39,9 мПа·с). Из практики флотации известно, что показатели процесса в случае применения веретенного масла значительно уступают показателям с применением керосина. В этой связи автор выбирает комбинацию реагентов - веретенного масла и раствора неонола 40:60, что, по его мнению, даст наиболее устойчивый флотокомплекс, состоящий из частиц угля и пузырьков воздуха. Неонол АФ 9-12 полярное соединение и может взаимодействовать с водой. Высокие показатели флотации обязаны снятию кинетического ограничения образованию флотационного комплекса. Полученный результат подтверждает механизм работы физически сорбируемых собирателей, но не указанную выше работу Морозова В. В. с соавторами.
2. Автор не показал каково влияние дипольного момента молекулы собирателя на его флотационную активность и почему требуется определённая степень адгезии собирателя к воде. В работе [**Осина Н.Ю., Горохов А.В., Лахтин С.В.** Исследование влияния группового химического состава реагентов собирателей на эффективность флотации каменных углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 2] показано, что с ростом дипольного момента извлечение увеличивается, а качество снижается. Почему применение композиции веретенного масла и раствора неонола, гетерогенного спирта, повысило скорость растекания смеси по поверхности воды и выход угля?
3. Определялись поверхностные характеристики материала: равновесного краевого угла смачивания, свободной поверхностной энергии и работы адгезии по методу Оуэнса, Вендта, Рабеля и Кьельбле. Метод основан на применении двух тестовых жидкостей. Рекомендуется в дальнейшей работе определять указанные параметры по теории Van Oss С. J., Chaudhury M.K., Good J.R., которая позволяет определять энергию взаимодействия минерала с реагентом в водной среде. Предлагаемый метод сложнее (требуется три тестовых жидкости), но приближен к реальному процессу флотации.
4. В процессе исследования обогащения угля методом флотогравитации определялось влияние частоты колебаний деки и расхода аполярного реагента. На движение частиц угля по деке концентрационного стола оказывает влияние время их нахождения на

поверхности раствора. Отрыв частиц от поверхности раствора обусловлен в основном её волновым движением. Аполярные реагенты гасят амплитуду поверхностных волн. Поэтому следовало в перечень варьируемых параметров включить модуль упругости поверхностной плёнки аполярных реагентов.

5. Поверхностная энергия имеет размерность Дж/м². Поэтому будет более корректно для твёрдых тел указывать данную размерность, а не мН/м (Рисунок 3.13; 3.15 и т.д.).

Приведенные выше замечания и вопросы не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа представляет собой завершённую, логически структурированную и обладающую научной новизной работу.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Развитие комплексного подхода к оценке флотуемости мелких классов высокозольных углей для их эффективного обогащения», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых полностью, отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм., а ее автор **Прохорова Евгения Олеговна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Официальный оппонент
Заведующий лабораторией
обогащения полезных ископаемых
и технологической экологии ИГД СО РАН
д.т.н. **Кондратьев Сергей Александрович**



Подлинность оригинальной подписи официального оппонента Кондратьева С. А. заверяю.
Заведующая отделом кадров ИГД СО РАН Поор Л. Д.



Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук
Почтовый адрес: 630091, г. Новосибирск, Красный пр., д. 54
Официальный сайт в сети Интернет: <https://misd.ru/>
эл. почта: kondr@misd.ru телефон: +7 (383) 205-30-30 (120)