

На правах рукописи

Прохорова Евгения Олеговна



**РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ
ФЛОТИРУЕМОСТИ МЕЛКИХ КЛАССОВ
ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ УГЛЕЙ ДЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО
ОБОГАЩЕНИЯ**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор,

Александрова Татьяна Николаевна

Официальные оппоненты:

Кондратьев Сергей Александрович

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, заведующий лабораторией;

Фадеева Наталья Владимировна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты.

Защита диссертации состоится **11 сентября 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.5 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 10 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

НИКОЛАЕВА
Надежда Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ключевым технологическим сырьем для металлургической промышленности является уголь, являющийся осадочной породой, которая служит важнейшим источником энергии. Ввиду этого на стадии обогащения особенно важно получать угольные концентраты высокого качества.

В последние годы качество добываемого угля заметно ухудшается, а горно-геологические условия добычи становятся все более сложными. В этих условиях актуальной становится задача разработки новых эффективных технологий обогащения, которые позволят получать концентраты с минимальным содержанием вредных примесей.

Для флотационного обогащения углей ввиду их природной гидрофобности применяют в качестве собирателей аполярные реагенты, такие как керосин, дизельное топливо и др., флотационная активность которых определяется дисперсностью в пульпе, что делает актуальным исследование технологических характеристик эмульсии для повышения эффективности процессов флотации. Разнообразный состав и наличие большого количества форм минералов породы в совокупности с ее флотационной активностью предопределяют актуальность применения реагентов-депрессоров при флотации углей, в то же время широкий спектр флотационных реагентов и многофакторность процесса флотации усложняют выбор реагента, что показывает перспективность разработки нового подхода к выбору флотационных реагентов, позволяющих селективно подавлять извлечение ненужных минералов в концентраты.

Свободная поверхностная энергия является характеристикой поверхностных свойств минералов и определяется на основе измерений равновесного краевого угла смачивания. Определение значений свободной поверхностной энергии и ее составляющих дает возможность количественной оценки изменения поверхностных свойств, показывающих изменение поверхности после воздействия реагентов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросом переработки углеродсодержащего сырья, а также гравитационными и флотационными методами обогащения занимались и продолжают заниматься такие отечественные и зарубежные ученые, как Б. Берд,

Г.Ю. Гольберг, Ф. Майер, П.А. Ребиндер, П. Риттингер, Р. Ричард, Р. Ханкок, А. Хирст, А.А. Абрамов, В.М. Авдохин, Т.Н. Александрова, В.Ю. Бажин, Т.Е. Вахонина, С.Р. Исламов, М.С. Клейн, С.А. Кондратьев, А.А. Лавриненко, А.Е. Матвеев, Н.Н. Орехова, Н.В. Фадеева, В.А. Чантурия, С.А. Эпштейн и др.

Основным методом обогащения углей в настоящее время является гравитационный, однако по причине склонности угля к ошламование в процессах рудоподготовки, а также низкой эффективности традиционных гравитационных процессов при обогащении мелких классов углей актуальным для исследования является метод флотации, позволяющий подавить минералы породы при одновременном высоком извлечении в концентрат горючей массы. Комбинирование методов флотации и гравитации позволяет повысить извлечение ценных компонентов посредством вовлечения в переработку мелких классов углей при снижении экономических затрат на процесс обогащения за счет дополнительного воздействия реагентов.

Таким образом, обоснование возможности направленного регулирования поверхностных свойств материалов в процессе флотационного обогащения на основе комплексной оценки изменения поверхностных свойств материала является актуальной задачей и имеет народнохозяйственное значение для минерально-сырьевого и металлургического комплекса.

Объект исследования - каменные угли марок К, Г и Д, а также мономинералы кварца и кальцита, вовлекаемые в процессы флотации и флотогравитации угольного сырья.

Предмет исследования - поверхностные свойства углей и минералов породы, их изменение под воздействием флотационных реагентов и влияние этих изменений на флотируемость и эффективность процессов обогащения.

Цель работы – обоснование и разработка технологических решений, обеспечивающих получение низкосольных угольных концентратов.

Идея заключается в том, что повышение эффективности обогащения углей достигается за счет направленного регулирования поверхностных свойств на границе раздела фаз и научно обоснованного

выбора флотационных реагентов в процессах флотации и флотогравитации.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проведение анализа современного состояния переработки угля в отечественной и зарубежной практике и систематизация данных о влиянии флотационных реагентов на поверхностные свойства материалов.

2. Разработка алгоритма и обоснование методик проведения исследования для оценки флотируемости мелких классов высокозольных углей с учетом их минералого-технологических свойств.

3. Проведение экспериментально-теоретических исследований поверхностных свойств материалов при обработке реагентами и установление их связи с флотируемостью материалов для разработки комплексного подхода, включающего методики определения поверхностных свойств, к оценке флотируемости для улучшения технологических параметров процессов обогащения углей.

4. Разработка технологических решений в области переработки угольного сырья с применением процессов флотации и флотогравитации, позволяющих повысить качество концентратов за счет вовлечения мелких классов угля в переработку.

Научная новизна работы:

1. Разработан и обоснован алгоритм методики выбора аполярного собирателя и депрессора для направленного регулирования поверхностных свойств материалов, поступающих на обогащение методами флотации.

2. Предложен и обоснован коэффициент смачивания материалов $k = \frac{\sqrt{\sigma_1^D \cdot \sigma_2^D} + \sqrt{\sigma_1^{SP} \cdot \sigma_2^{SP}}}{\sigma_1^D + \sigma_1^{SP}}$, основанный на оценке поверхностных свойств через определение свободной поверхностной энергии материала до и после применения флотационных реагентов, позволяющий количественно оценить селективность действия флотационных реагентов.

3. Установлены зависимости зольности и выхода угольного концентрата, получаемые с применением флотогравитации, от расхода аполярного собирателя и частоты колебания деки, что позволяет прогнозировать качество получаемых концентратов.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых по пунктам: п. 3. «Повышение контрастности технологических свойств разделяемых минералов. Физические, физико-химические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов, руд, промежуточных продуктов переработки природного и техногенного сырья»; п. 5. «Технологии и аппараты физико-механической, физико-химической, химической, биохимической, химико-металлургической переработки и обогащения полезных ископаемых».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан и обоснован комплексный подход к выбору эмульсии аполярного собирателя в растворе неионогенного ПАВ, состоящий из трех этапов и заключающийся в установлении влияния соотношения компонентов на значение динамической вязкости реагента, определения скорости растекания реагента и поверхностных свойств материала, позволяющих повысить извлечение угля при флотации.

2. Разработана и обоснована методика оценки поверхностных свойств, внедренная в деятельность АО «Механобр инжиниринг» при проведении научно-исследовательских работ (акт о внедрении результатов диссертации от 21.05.2025 г.).

3. Разработаны способы обогащения угля, защищенные патентами на изобретение № 2812378, № 2837504.

4. Разработана принципиальная технологическая схема обогащения высокозольных углей мелких классов, экономическая эффективность которой подтверждена положительным индексом доходности.

5. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 23-47-00109 "Умный уголь" - создание научных основ обогащения углеродсодержащих материалов).

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составляет комплексный подход, включающий теоретический анализ существующих оценок поверхностных свойств материалов, проведение исследований поверхностных свойств угля и минералов породы через измерение равновесного краевого угла смачивания с определением свободной поверхностной энергии и ее характеристик с последующим расчетом работы адгезии и предложенного коэффициента смачивания, влияющего на флотируемость материалов, а также серии опытов исследования на обогатимость угольного материала при применении методов флотационного и гравитационного обогащения со статистической обработкой и анализа экспериментальных данных при анализе характеристик исходного материала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный комплексный подход к оценке флотируемости мелких классов высокзолных углей, основанный на количественном определении свободной поверхностной энергии и ее составляющих с последующим расчетом коэффициента смачивания исходных и обработанных реагентами образцов сырья позволяет обосновать выбор флотационных реагентов направленного действия для получения угольных концентратов с требуемой зольностью.

2. Научно обоснованная и разработанная схема обогащения высокзолных углей крупностью $-6+0$ мм, включающая последовательные операции флотогравитации и флотации с использованием эмульсии, обработанной ультразвуковой кавитацией, позволяет обеспечить получение угольных концентратов с требуемой зольностью менее 10 % и формирование двух товарных продуктов (концентрата флотогравитации и концентрата флотации) с достижением высоких технико-экономических показателей процесса с положительным индексом доходности.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью; применением современного оборудования и средств измерения, а также апробацией полученных результатов на международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов диссертации проведена на 12 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 7 международных. За последние 3 года принято участие в 10 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных: XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, май 2023 года); Международная конференция «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023)» (г. Москва, октябрь 2023 года); 16-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, октябрь 2023 года); Международная конференция «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения – 2024)» (г. Апатиты, сентябрь 2024 года); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, октябрь 2024 года); XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, декабрь 2024 года); XIX Всероссийская молодежная научно-практической конференция «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, февраль 2025 года); VI Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности» (г. Санкт-Петербург, апрель 2025 года); 2025 CUMT-SPMI Symposium on Progress on Mineral Processing Technology (г. Сюйчжоу, май 2025 года); 17-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, октябрь 2025 года).

Личный вклад автора заключается в проведении исследований в области направленного регулирования поверхностных свойств материалов и обогащения угольного сырья, сформулированы и решены научно-исследовательские задачи, обоснованы научные положения. Выполнение лабораторных исследований с определением элементного состава проб, поверхностных свойств материалов,

исследований по флотации и флотогравитации с последующей обработкой и анализом полученных результатов. Разработка и обоснование технологии обогащения угольного сырья мелких классов на основании подбора селективных реагентов и проведенных исследований в области обогащения угольного сырья.

Публикации. 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 международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 патента на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ учебных пособий и современной научно-технической литературы в области обогащения угольного сырья, разрабатываемых и применяемых методов обогащения углей.

Во второй главе представлены результаты исследования исходных свойств угольного сырья. Подробно описаны методы оценки поверхностных свойств материала и методы обогащения угля, основанные на флотации и флотогравитации.

В третьей главе приведены теоретические основы по существующим методам оценки поверхностных свойств. Разработан комплексный подход оценки флотируемости материала и выведен коэффициент смачивания, позволяющий подобрать более эффективный реагент для процесса обогащения угля.

В четвертой главе приведены результаты возможности использования флотогравитации для обогащения углей, а также представлены результаты флотации угля с применением подобранной эмульсии.

В пятой главе разработан участок схемы обогащения угля с вычислением экономической эффективности подбора более селективного собирателя для эмульсии.

В заключении даны обобщенные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанный комплексный подход к оценке флотируемости мелких классов высокозольных углей, основанный на количественном определении свободной поверхностной энергии и ее составляющих с последующим расчетом коэффициента смачивания исходных и обработанных реагентами образцов сырья позволяет обосновать выбор флотационных реагентов направленного действия для получения угольных концентратов с требуемой зольностью.

По результатам проведенных исследований, проводимых на основании порошкового рентгеновского дифрактометрического анализа с применением программного обеспечения Match!, для проведения исследований поверхностных свойств были выбраны мономинералы породы кварца и кальцита, вовлекаемые в процессы флотации и флотогравитации. Исследования поверхностных свойств угля проводили на трех марках – К, Г и Д.

Анализ результатов исследований по определению вязкости эмульсий керосина и веретенного масла, представленные на рисунках 1 (а, б) и 2 (а, б), позволил выявить линейные зависимости повышения вязкости при создании эмульсий с раствором неионогенного ПАВ.

Анализ результатов, представленных на рисунках 2а и 2б, свидетельствует о возможности применения веретенного масла в составе эмульсии как более эффективного аполярного реагента ввиду наибольшего значения вязкости, равного 39,9 мПа·с при соотношении веретенного масла и раствора неолола АФ 9-12 40:60.

Для оценки эффективности прорыва гидратного слоя были проведены исследования по растеканию применяемых аполярных реагентов по поверхности воды с порошком талька. Было установлено, что при создании эмульсии скорость растекания реагентов увеличивается. Исследования растекания эмульсий веретенного масла и керосина с раствором неонла АФ 9-12, представленных на рисунке 3 (а, б) при соотношении 40:60, показали, что создание данных эмульсий привело к увеличению скорости растекания в 12,45 раз для эмульсии веретенного масла и в 3,5 раза для эмульсии керосина. Эмульсии дизельного топлива в исследуемых условиях оказались неустойчивы.

Обосновано применение эмульсии, состоящей из аполярного собирателя и неионогенного ПАВ при их соотношении 40:60 соответственно.

Исследования поверхностных свойств осуществлялись в соответствии с предложенной методикой, представленной на рисунке 4. Для проведения оценки поверхностных свойств образцов используется анализ изменения свободной поверхностной энергии через измерение краевого угла смачивания до и после применения воздействий флотационными реагентами на его поверхность с последующим определением работы адгезии и разработанного коэффициента смачивания. Для выбора собирателя направленного действия значение краевого угла смачивания с водой должно увеличиваться, работа адгезии снижаться и коэффициента смачивания k стремиться к значению 0. Для выбора депрессора направленного действия значение равновесного краевого угла смачивания с водой на минералах породы должно снижаться, работа адгезии увеличиваться и коэффициент смачивания k стремиться к значению 1.

Адгезия характеризует работу внутреннего межмолекулярного взаимодействия молекул соприкасающихся фаз и выражается формулой, согласно теории Оуэнса и Вендта (1):

$$W_a = \sigma_1(1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\sigma_1^D \cdot \sigma_2^D} + 2\sqrt{\sigma_1^{SP} \cdot \sigma_2^{SP}}, \quad (1)$$

где σ_1 – свободная поверхностная энергия (натяжение) жидкости, мН/м; θ – равновесный краевой угол смачивания, °; σ_1^D и σ_1^{SP} – дисперсионная и полярная составляющие свободной поверхностной энергии поверхности материала, мН/м; σ_2^D и σ_2^{SP} – дисперсионная и

полярная составляющие свободной поверхностной энергии жидкости, мН/м, соответственно.

Для оценки смачивания был использован разработанный коэффициент смачивания материала, полученный из отношения работы адгезии к работе когезии (2):

$$k = \frac{W_a}{W_k} = \frac{\sqrt{\sigma_1^D \cdot \sigma_2^D} + \sqrt{\sigma_1^{SP} \cdot \sigma_2^{SP}}}{\sigma_1^D + \sigma_1^{SP}} \quad (2)$$

Результаты количественной оценки влияния депрессоров на поверхностные свойства углей марок Д, Г и К посредством определения работы адгезии и коэффициента смачивания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты изменения работы адгезии и коэффициента смачивания углей при применении депрессоров

Название реагента	Работа адгезии W_a , мН/м			Коэффициент смачивания k		
	Д	Г	К	Д	Г	К
Без обработки	97,42	68,08	87,66	0,67	0,47	0,60
Пирофосфат натрия	101,42	81,13	97,36	0,70	0,56	0,67
КМЦ	106,65	98,90	105,09	0,73	0,68	0,72
Жидкое стекло	103,97	89,99	100,90	0,71	0,62	0,69
Органический депрессор группы полисахаридов	113,52	77,58	104,63	0,78	0,53	0,72
КМК	123,71	97,43	124,99	0,85	0,67	0,86

Депрессоры пирофосфат натрия и жидкое стекло имеют наименьший рост работы адгезии и коэффициента смачивания для марок угля Д и К. Для марки угля Г наименьший рост показали пирофосфат натрия и органический депрессор группы полисахаридов.

В результате исследований применения депрессоров пирофосфата натрия и жидкого стекла на минералы породы получено, что для кварца данные депрессоры имеют сильное воздействие, увеличивая коэффициент смачивания более чем на 0,13 относительно исход-

ной поверхности. Для кальцита депрессоры жидкое стекло и пирофосфат натрия увеличили коэффициент смачивания относительно исходной поверхности на 0,09 и 0,20, соответственно.

Результаты количественной оценки влияния депрессоров на поверхностные свойства углей марок Д, Г и К посредством определения работы адгезии и коэффициента смачивания представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты изменения работы адгезии и коэффициента смачивания углей при применении эмульсий аполярных собирателей с раствором неионогенного ПАВ при соотношении 40:60

Название эмульсии	Работа адгезии W_a , мН/м			Коэффициент смачивания k		
	Д	Г	К	Д	Г	К
Без обработки	94,84	80,20	87,50	0,65	0,55	0,60
Эмульсия керосина	73,68	65,48	66,70	0,51	0,45	0,46
Эмульсия веретенного масла	64,47	64,48	68,12	0,44	0,44	0,47

Определено, что с применением эмульсии веретенного масла отмечается наибольшее снижение значения работы адгезии для марок угля Д и Г на 30,37 мН/м и 15,72 мН/м соответственно и значения коэффициента смачивания на 0,21 и 0,11 соответственно.

Отмечено, что для угля марки К имеет возможность применения как эмульсии керосина, так и эмульсии веретенного масла, поскольку значение работы адгезии и коэффициента смачивания снижаются в одинаковых пределах.

Обоснован выбор эмульсии аполярного собирателя с неионогенным ПАВ на основании применения комплексного подхода, представленного на рисунке 5, состоящего из трех этапов: исследование вязкости эмульсии, определение скорости растекания и применения методики подбора реагента. На основании проведенных исследований установлен аполярный собиратель - веретенное масло при его соотношении с раствором неолола АФ 9-12 40:60.

Применение разработанного комплексного подхода выбора аполярных собирателей посредством оценки флотирруемости мелких классов высокозольных углей через определение вязкости эмульсий

собиранья и его скорости растекания, значений работы адгезии и разработанного коэффициента смачивания позволил обосновать флотационные реагенты направленного действия для получения угольных концентратов требуемой зольности, состоящие из эмульсии веретенного масла с раствором неонла АФ 9-12 при соотношении 40:60 и смеси депрессоров пирофосфата натрия и жидкого стекла.

2. Научно обоснованная и разработанная схема обогащения высокозольных углей крупностью $-6+0$ мм, включающая последовательные операции флотогравитации и флотации с использованием эмульсии, обработанной ультразвуковой кавитацией, позволяет обеспечить получение угольных концентратов с требуемой зольностью менее 10 % и формирование двух товарных продуктов (концентрата флотогравитации и концентрата флотации) с достижением высоких технико-экономических показателей процесса с положительным индексом доходности.

Исследования флотации и флотогравитации проводились на угле марки К. Зольность определялась при помощи муфельной печи и составляла порядка 25-30 %, что согласуется с данными термogrавиметрического анализа проб.

Установлено, что исследуемый уголь относится к труднообогащаемому, так как показатель обогатимости равен 15. Построенные кривые обогатимости представлены на рисунке 6. Обосновано применение комбинированных схем обогащения с использованием гравитационных и флотационных методов обогащения для средних и мелких классов обогащения.

Обосновано, что при применении пенной флотогравитации для высокозольных углей крупностью $-6+0$ мм, возможно получение трех продуктов при применении эмульсии веретенного масла с раствором неонла АФ 9-12 и смеси депрессоров пирофосфата натрия и жидкого стекла: концентрата с зольностью 8,10 %, промпродукта с зольностью 29,12 % и хвостов.

Интерпретация результатов исследования пленочной флотогравитации, графическая зависимость которой для зольности представлена на рисунке 7, выявила, что при частоте колебаний деки концентрального стола в 220 об/мин и расходе аполярного собирателя

в диапазоне 540-580 г/т позволяет получить выход концентрата более 65 % с требуемой зольностью менее 10,5 %.

Обосновано применение эмульсии веретенного масла с раствором неонола АФ 9-12 при соотношении 40:60 при расходе 1 кг/т и смеси депрессоров пирофосфата натрия и жидкого стекла с расходом 200 г/т для флотации мелких классов высокозольных углей.

Анализ полученных результатов показал, что применение эмульсии веретенного масла при флотации снижает зольность концентрата на 1,97 % по сравнению с применением эмульсии керосина. Таким образом, учитывая, что выход концентрата при применении веретенного масла на 3,59 % выше, то веретенное масло целесообразно использовать при флотации угольного сырья.

Предлагаемый метод обеспечивает достижение более высокой селективности при разделении материала, чем существующие аналогичные технологии. Это достигается за счет повышения эффективности процесса разделения сырьевых материалов, обусловленного увеличением различий в их флотиремости.

Разработанная и обоснованная технологическая схема обогащения высокозольных углей класса крупности -6+0 мм, представленная на рисунке 8, позволит получать два концентрата (флотогравитационный и флотационный) с требуемой зольностью менее 10 %.

Исследование показателей рентабельности предлагаемых технологических решений свидетельствует о высокой эффективности проекта. Рассчитанный индекс доходности составляет 4,64, что указывает на инвестиционную привлекательность. Срок окупаемости вложений оценивается без дисконтирования в 2,8 года и дисконтированный срок окупаемости в 3,5 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача повышения эффективности переработки высокозольных углей за счет направленного регулирования поверхностных свойств минеральной составляющей и угольной матрицы в процессах флотации и флотогравитации, что имеет существенное народнохозяйственное значение для минерально-сырьевого и металлургического комплекса.

1. С учетом анализа данных зарубежного и отечественного опыта в области обогащения угля систематизированы данные о влиянии флотационных реагентов на поверхностные свойства материалов. Установлено, что исследование поверхностных свойств является перспективным направлением для оценки флотуемости минералов и подбора флотационных реагентов.

2. Разработан и обоснован методический алгоритм исследований, в том числе для оценки флотуемости, состоящий из измерения равновесного краевого угла смачивания с применением двух жидкостей для депрессоров и четырех жидкостей для аполярных собирателей и их эмульсий с последующим определением свободной поверхностной энергии и ее составляющих, через которые определяются работа адгезии и коэффициент смачивания.

3. Разработан комплексный подход к оценке флотуемости материалов, основанный на определении свободной поверхностной энергии и ее составляющих, расчете коэффициента смачивания исходных и обработанных реагентами образцов и выборе наиболее селективно действующих флотационных реагентов по отношению к ценному компоненту и минералам породы, что позволяет повысить качество получаемой продукции. Обосновано применение эмульсии веретенного масла с раствором неионогенного ПАВ при соотношении 40:60 для флотации высокозольных углей с учетом оценки поверхностных свойств угля по разработанному комплексному подходу. Показано, что направленное регулирование поверхностных свойств материалов при таком составе эмульсии обеспечивает снижение зольности концентрата по сравнению с эмульсией керосина.

4. Установлено, что применение флотогравитации на концентратном столе позволяет получать три продукта (концентрат, промежуточный продукт и хвосты) и снижать затраты на обогащение углей за счет выделения мелких классов в концентрат при оптимальном подборе технологических параметров и выбора флотационных реагентов направленного действия. Разработана и обоснована схема обогащения высокозольных углей крупности $-6+0$ мм с применением флотогравитации и флотации. Внедрение схемы позволит получать концентрат флотогравитации и концентрат флотации. Индекс доходности при этом составляет 4,64, что указывает на привлекательность

инвестиций. Срок окупаемости вложений оценивается без дисконтирования в 2,8 года и дисконтированный срок окупаемости в 3,5 года.

Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие комплексного подхода к оценке флотировемости применительно к углеродсодержащему сырью с целью повышения селективности разделения ценного компонента и минералов породы с учетом минерального состава сырья, поступающего на обогащение.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Афанасова, А.В. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные породообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд / А.В.Афанасова, В.А. Абурова, **Е.О. Прохорова**, Е.А. Лушина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022 – № 6-2 – С. 161-174. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161

2. **Прохорова, Е.О.** Оценка поверхностных свойств угля и породообразующих минералов при воздействии депрессоров / **Е.О. Прохорова**, А.Ю. Смирнов, Т.Н. Александрова // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 5. – С. 110-115. DOI: 10.17513/use.38274

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Александрова, Т.Н. Модификация свойств породообразующих минералов при флотации / Т.Н. Александрова, **Е.О. Прохорова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 123–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_123

4. Aleksandrova, T.N. Investigation of Interfacial Characteristics as a Key Aspect of the Justification of the Reagent Regime for Coal Flotation / T.N. Aleksandrova, V.V. Kuznetsov, **E.O. Prokhorova** // Minerals. – 2025. – Vol. 15, Issue 1. - p. 76. DOI: 10.3390/min15010076

Публикации в прочих изданиях:

5. Афанасова, А.В. Повышение качества угольной продукции на примере тонких классов коксующихся углей / А.В. Афанасова, **Е.О. Прохорова** // Современные проблемы комплексной и глу-

бокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023): Материалы международной конференции, Москва, 02-05 октября 2023 года - М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 335 – 337

6. **Прохорова, Е.О.** Направленное регулирование поверхностных свойств углеродсодержащих материалов / **Е.О. Прохорова**, А.Ю. Смирнов // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Сборник материалов 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов, Москва, 23–27 октября 2023 года. – Москва: ИПКОН РАН, 2023. – С. 297-299.

7. Кузнецов, В.В. Комплексный подход к исследованию поверхностных явлений при флотации углей / В.В. Кузнецов, **Е.О. Прохорова** // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения – 2024): Материалы международной конференции, Апатиты, 23-27 сентября 2024 года – Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2024. - С. 221-224.

8. **Прохорова, Е.О.** Влияние применения аполярного собирателя на процессы обогащения углеродсодержащего материала / **Е.О. Прохорова** // Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XX Всероссийской конференции-конкурса студентов выпускного курса и аспирантов, Санкт-Петербург, 2–6 декабря 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025. – Том 1. - С. 115-117

9. **Прохорова, Е.О.** Направленное регулирование поверхностных свойств угольных шламов для повышения эффективности их флотации / **Е.О. Прохорова** // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10-11 октября 2025 года, Санкт-Петербург. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. — С. 76-78.

10. Александрова, Т.Н. Возможности применения термодинамического метода анализа влияния флотационных реагентов на поверхностные свойства угля / Т.Н. Александрова, **Е.О. Прохорова** // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 17

международной научной школы молодых ученых и специалистов, Москва, 27–31 октября 2025 года. – Москва: ИПКОН РАН, 2025. – С. 275-277.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

11. Патент № 2812378 Российская Федерация, МПК В03В 7/00 (2006.01); В03D 1/02 (2006.01); СПК В03В 7/00 (2023.08); В03D 1/02 (2023.08). Способ обогащения угля. Заявка № 2023119782: заявл. 27.07.2023; опубл. 30.01.2024 / Т.Н. Александрова, В.Б. Кусков, **Е.О. Прохорова**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 10 с.

12. Патент № 2837504 Российская Федерация, МПК В03В 7/00 (2006.01); В03D 1/02 (2006.01); СПК В03В 7/00 (2025.01); В03D 1/02 (2025.01). Способ обогащения угольных шламов. Заявка № 2024126286: заявл. 06.09.2024; опубл. 31.03.2025. / Т.Н. Александрова, В.Б. Кусков, **Е.О. Прохорова**, А.Ю. Смирнов; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 9 с.

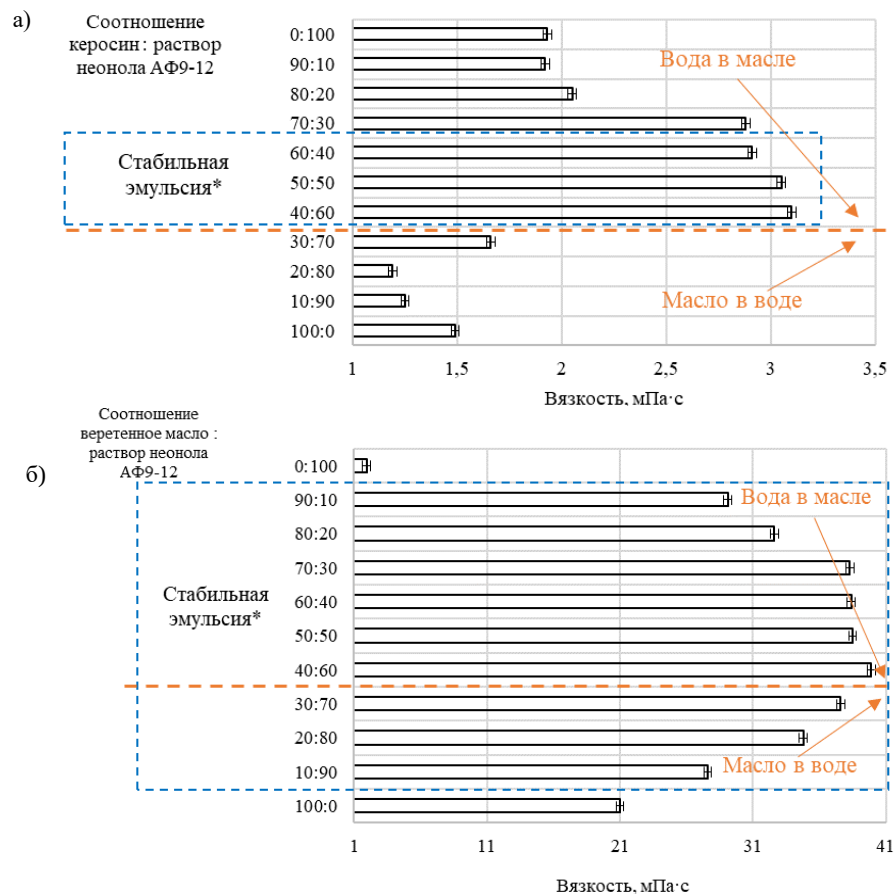


Рисунок 1 – Зависимость вязкости эмульсии а) керосина от соотношения реагентов; б) веретенного масла от соотношения реагентов (* устойчивость эмульсии выше 20 минут)

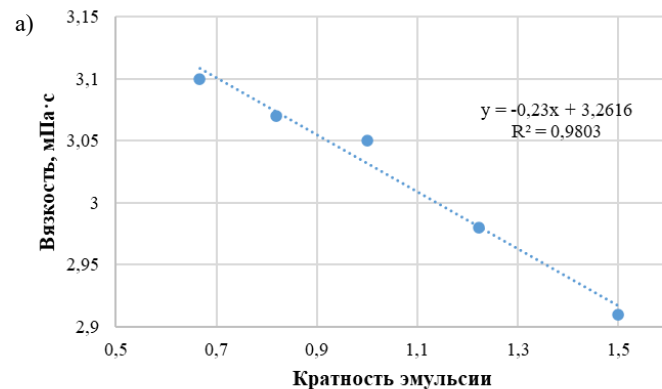


Рисунок 2 - Зависимость вязкости эмульсии а) керосина и б) веретенного масла от кратности эмульсии

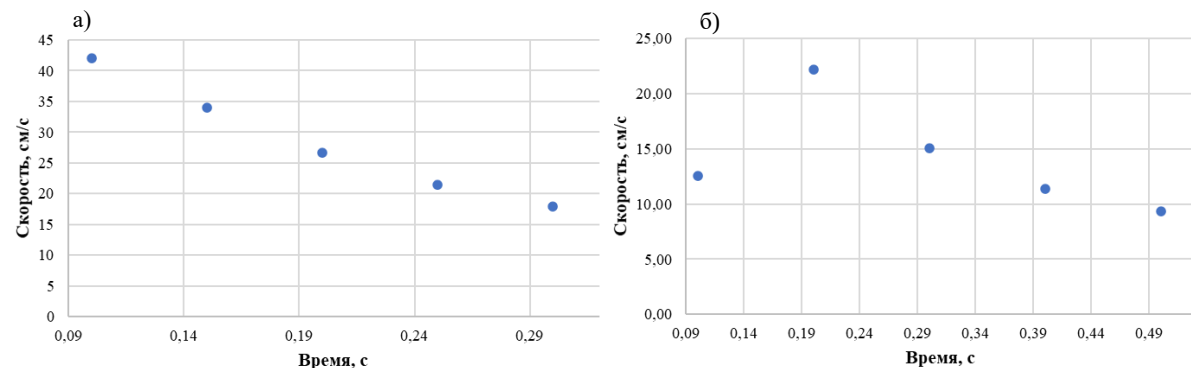


Рисунок 3 - Скорость растекания эмульсии а) керосина и б) веретенного масла от времени

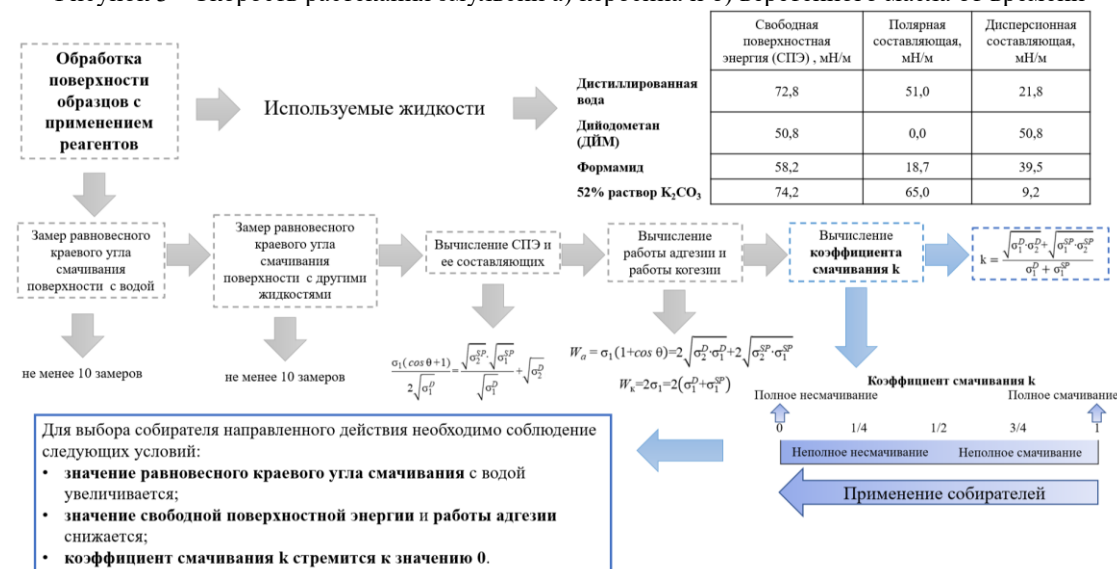
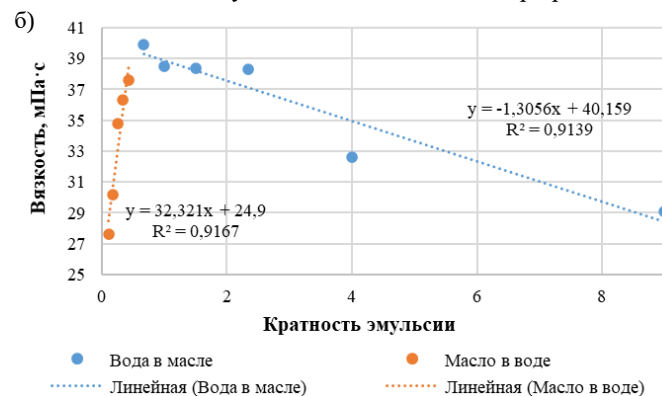


Рисунок 4 – Методика подбора реагента аполярного собирателя



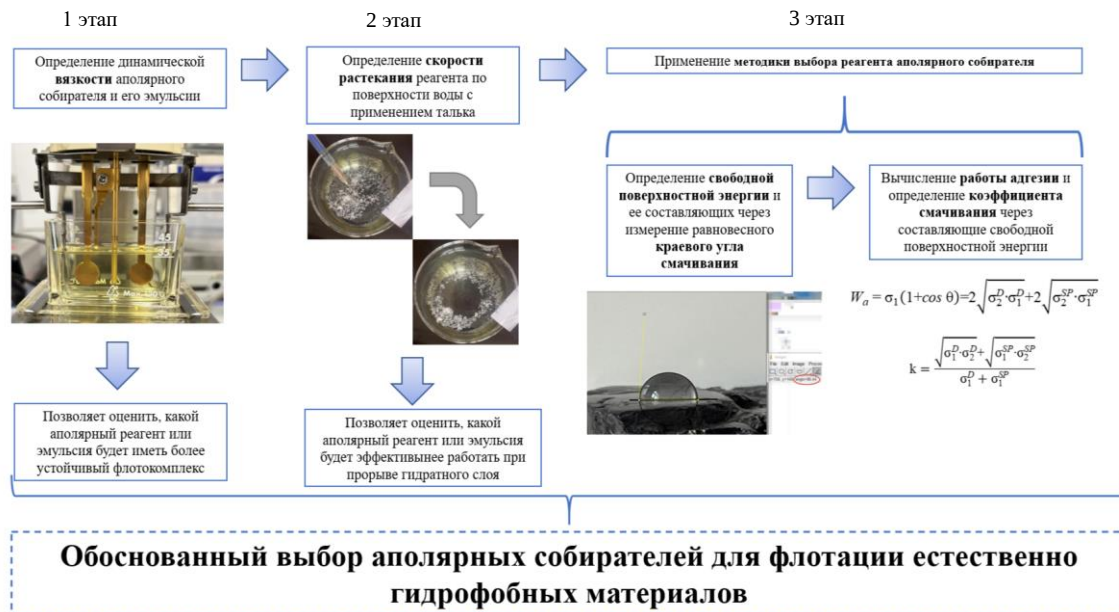


Рисунок 5 – Комплексный подход подбора собирателя

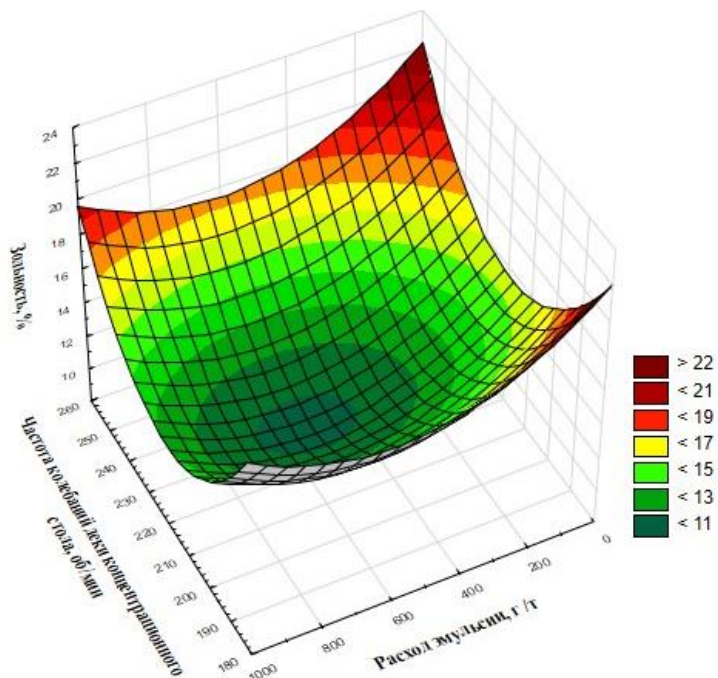


Рисунок 7 - Графическая зависимость зольности концентрата процесса пленочной флогогравитации от частоты колебаний деки концентратора и расхода собирателя

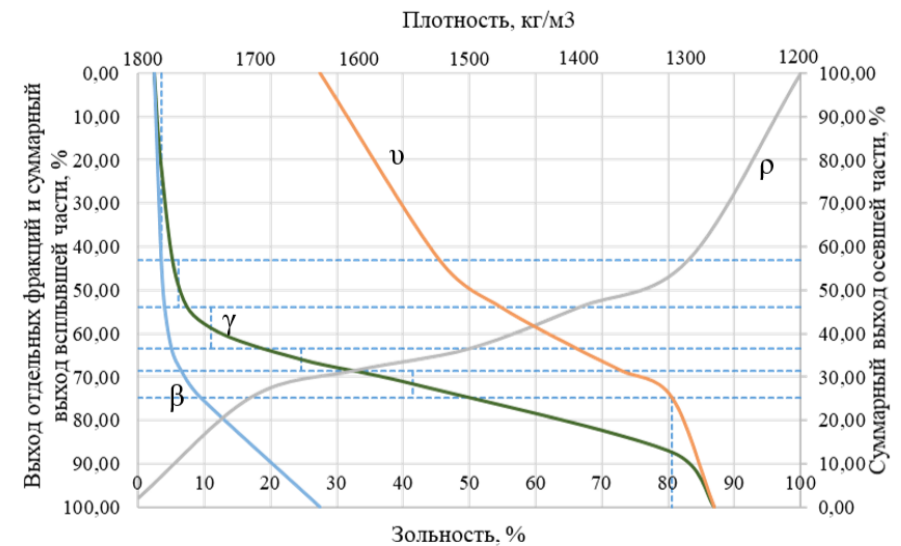


Рисунок 6 – Кривые обогатимости для угля марки К (λ – кривая зольности элементарной фракции; β – кривая зольности концентрата; υ – кривая зольности хвостов; ρ – кривая плотностей)

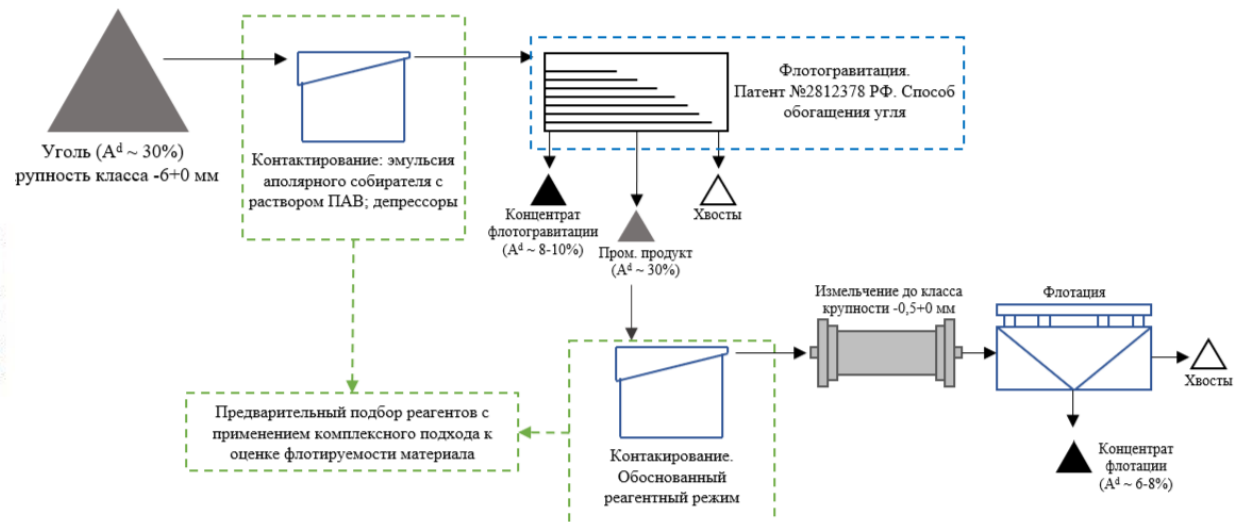


Рисунок 8 – Разработанная схема переработки углей