

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Кондакова Вероника Николаевна



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ
УГЛЕБОГАЩЕНИЯ В ОТВАЛАХ С УЧЁТОМ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОГЕНЕЗА

Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук
Поспехов Г. Б.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	10
1.1 Анализ изменения темпов накопления отходов углеобогащения и фактическое состояние вопроса.....	10
1.2 Анализ технологий складирования отходов углеобогащения	18
1.3 Классификация техногенных пород.....	24
1.4 Инженерно-геологическая изученность отходов обогащения	30
1.5 Выводы к главе 1	39
ГЛАВА 2 ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	41
2.1 Общие представления о моделях формирования свойств дисперсных пород .	41
2.2 Инженерно-геологические условия, определяющие состав и свойства отходов углеобогащения	46
2.3 Техногенные факторы, определяющие состав и свойства отходов углеобогащения	53
2.4 Схема техногенеза отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом, на примере ПЦОФ	66
2.5 Выводы к главе 2	70
ГЛАВА 3 ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ ЦОФ «ПЕЧОРСКАЯ»	71
3.1 Изучение минералогического состава отходов углеобогащения.....	73
3.2 Петрографические исследования отходов флотации	76
3.3 Изучение гранулометрического состава отходов углеобогащения.....	79
3.4 Изучение физико-механических свойств отходов углеобогащения.....	81
3.4.1 Программа и задачи исследований.....	81
3.4.2 Исследование физических свойств отходов углеобогащения.....	83
3.4.3 Исследование прочностных свойств отходов углеобогащения	84
3.4.4 Исследование деформационных свойств отходов углеобогащения.....	88
3.5 Типизация отходов углеобогащения как техногенных пород.....	94

3.6 Закономерности формирования состава, состояния и свойств техногенных пород, сформированных из «сухих» отходов углеобогащения.....	97
3.7 Выводы к главе 3	98
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ОТВАЛА ПРИ СОВМЕСТНОМ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ	100
4.1 Задачи мониторинга безопасности отвальных сооружений.....	100
4.2 Прогноз напряженно-деформированного состояния отвала при совместном размещении отходов углеобогащения	107
4.3 Комплексный мониторинг объектов складирования отходов углеобогащения	120
4.3.1 Деформационный мониторинг.....	120
4.3.2 Эксплуатационный контроль	125
4.3.3 Гидрогеологический мониторинг	126
4.3.4 Инженерно-геологический мониторинг	133
4.4 Схема мониторинга безопасности на отвалах отходов углеобогащения	134
4.5 Выводы к главе 4	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации базы данных	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов диссертации	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Уголь играет значительную роль в топливно-экономическом балансе России. По данным Минприроды России объем добычи угля за период с 2011 по 2021 вырос на 30%. Ожидается, что эта тенденция сохранится: энергетическая стратегия России подразумевает увеличение добычи угля до 490 млн т в год к 2035 г. Помимо роста добычи, отмечается увеличение темпов накопления отходов добычи и переработки угля. На долю угольной промышленности приходится 67% промышленных отходов в России, ежегодный объём накопления которых оценивается в 5 млрд т. Ежегодный прирост накопленных отходов углепереработки составляет примерно 12 млн тонн, что составляет 3% от всех отходов, образующихся в стране за год.

Накопленные отходы переработки угля оказывают масштабное и длительное воздействие на окружающую среду, под их складирование изымается большое количество земельных ресурсов, поэтому решение проблем накопления и утилизации отходов угольных обогатительных фабрик является ключевой отраслевой задачей. В рамках её решения, при складировании отходов флотационного обогащения углей рассматривается возможность отказа от повсеместно применявшейся технологии гидронамыва в пользу укладки частично обезвоженных с помощью вакуумных фильтр-прессов отходов флотации и гравитационного обогащения в отвалы, осуществляя селективное складирование. Это обуславливает необходимость изучения отходов углеобогащения с целью исследований механизма формирования их свойств и разработки рекомендаций по контролю поведения техногенных массивов с учётом процессов техногенеза при формировании «сухих» отвалов углеобогатительных фабрик. Таким образом, проблема разработки инженерно-геологического обоснования размещения отходов углеобогащения в отвалах является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами инженерно-геологического и геомеханического изучения намывных и насыпных отвальных сооружений занимались А. М. Гальперин, Р. Э. Дашко, М. Е. Певзнер, В. Г. Зотеев, Ю. В. Кириченко, А. В. Киянец, О. Ю. Крячко, С. П. Бахаева и др. Вопросы напряженно-деформированного состояния массивов, сложенных техногенными отложениями, изучались А. М. Гальпериным, Г. Т. Трунковой, П. Л. Ивановым, Ю. И. Кутеповым, Н. А. Кутеповой, Г. Л. Фисенко, А. В. Жабко, В. В. Мосейкиным, П. С. Шпаковым, В. В. Ческидовым и др.

Результаты изучения физико-механических свойств различных типов отходов с точки зрения вторичного использования представлены в работах Е. Н. Огородниковой, Ю. М. Лычко, В. П. Якунина, М. Я. Шпирта и Н. Н. Розанова.

Несмотря на изученность вопроса накопления и складирования различных техногенных образований, задаче комплексного изучения закономерностей формирования и изменения свойств отходов углеобогащения, складированных в насыпных отвалах, уделено недостаточно внимания.

Объект исследования – отходы гравитационного и флотационного обогащения угля.

Предмет исследования – генезис техногенных пород, образующихся из отходов углеобогащения, и механизм формирования их свойств в процессе селективного складирования в «сухих» отвалах.

Цель работы – разработка инженерно-геологического обоснования селективного размещения отходов углеобогащения в отвалах с учетом процессов техногенеза для обеспечения устойчивости и промышленной безопасности накопителей отходов.

Идея работы. Учет характера техногенеза отходов углеобогащения позволяет реализовывать их безопасное и эффективное складирование в отвалах, а именно установить закономерности деформирования массива на основании прогнозируемых эпигенетических изменений техногенных отложений.

Основные задачи исследования:

1. Сбор и анализ исследований по вопросам образования, складирования и изучения состава и свойств отходов углеобогащения.

2. Выявление основных факторов, определяющих генезис и характер постгенетических процессов для техногенных пород, формирующихся из отходов углеобогащения при их складировании в «сухих» отвалах.

3. Лабораторные исследования состава, состояния и физико-механических свойств отходов углеобогащения Печорской центральной обогатительной фабрики.

4. Прогноз напряженно-деформируемого состояния «сухих» отвалов угольных обогатительных фабрик в процессе селективного складирования отходов углеобогащения.

5. Разработка рекомендаций по инженерно-геологическому обеспечению безопасного и эффективного складирования отходов углеобогащения в отвалах на основе полученных результатов исследования.

Научная новизна работы:

1. Определены факторы и разработана схема техногенеза, определяющие образование и характер постгенетических процессов для техногенных пород, формирующихся из отходов углеобогащения при их селективном складировании в «сухих» отвалах.

2. Установлены закономерности деформирования техногенных массивов «сухих» отвалов, формирующихся при селективном складировании отходов углеобогащения.

3. Сформулированы научно-методические принципы инженерно-геологического обоснования селективного размещения отходов углеобогащения в «сухих» отвалах.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы формирования физико-механических свойств отходов углеобогащения в зависимости от применяемой на предприятии технологии обогащения и выбранной схемы «сухого» складирования.

2. Обоснованы характеристики физико-механических свойств отходов углеобогащения Печорской центральной обогатительной фабрики для определения рациональных параметров «сухих» отвалов при селективной укладке отходов гравитационного и флотационного обогащения угля.

3. Разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости «сухих» отвалов угольных обогатительных фабрик на основании организуемого по результатам численного моделирования комплексного мониторинга их устойчивости.

4. Результаты исследования были использованы при разработке проекта реконструкции обогатительной фабрики в виде экспериментальных данных по исследованию физико-механических свойств отходов углеобогащения, а также рекомендаций по размещению отходов углеобогащения на участке их складирования в рамках деятельности ООО «СПб-Гипрошахт» (акт внедрения от 07.09.2023 от ООО «СПб-Гипрошахт»).

Методология и методы исследования. В работе использован комплексный метод исследований, включающий системный анализ научной, нормативно-методической и патентной информации, лабораторные исследования физико-механических и деформационных свойств пород, аналитические методы механики грунтов и численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование комплекса инженерно-геологических исследований, необходимого для складирования отходов углеобогащения в отвалах, следует производить с учётом разработанной схемы техногенеза, отражающей изменения

их состава и физико-механических свойств в зависимости от выбранных технологических схем обогащения и складирования.

2. Нарращивание высоты отвалов угольных обогатительных фабрик при селективном складировании отходов определяется исходным составом отходов, их фильтрационными свойствами, технологической схемой складирования и контролируется развивающимся в массиве избыточным поровым давлением.

3. Инженерно-геологическое обоснование безопасных условий отвалообразования при селективном размещении отходов углеобогащения различного типа в отвалах следует осуществлять на базе разработанной системы прогноза и мониторинга их состояния, включающего инженерно-геологические, гидрогеологические, деформационные и технологические составляющие с привлечением численного моделирования.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена выбором методологии исследования, базирующейся на доказанных теоретических/практических положениях прикладных, фундаментальных наук, метрологическим обеспечением практических исследований по теме научной работы, применением апробированных научных методов экспериментальных исследований, использованием стандартных методов численного анализа при выполнении расчётов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Всероссийская конференция «Новые идеи в науках о Земле», МГРИ, Москва, 02-05.04.2019; 70-й студенческий форум Фрайбергской горной академии, 06.06.2019, Фрайберг, Германия; Семинар молодых учёных в рамках 12-го Российско-Германского сырьевого форума, 27.11.2019, Санкт-Петербург; XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка», 29.01.2020, МИСиС, Москва; 16-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020», 14-18.09.2020, Пермь; XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка», 25-29.01.2021, МИСиС, Москва.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; выполнении анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме исследования, проведении лабораторных исследований, выполнении численного моделирования, анализе и оформлении результатов в виде публикаций и научных докладов.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литературы № 54, 95, 153, 157, 158, 159, 161), в том числе в 1 статье – 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 свидетельство о государственной регистрации базы данных физико-механических свойств техногенных грунтов (Приложение А).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 172 наименований, списка иллюстративного материала и приложений. Диссертация изложена на 161 страницах машинописного текста и содержит в себе 38 рисунков и 22 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, к.г.-м.н., Г. Б. Поспехову за всестороннюю помощь и неоценимый вклад в научно-исследовательскую деятельность, директору Научного центра «Геомеханики и проблем горного производства» А. Н. Шабарову, профессору Ю. И. Кутепову и всему научному коллективу за содействие в работе и обсуждение защищаемых положений, а также д.т.н., доценту М. А. Карасеву за помощь в проведении исследований.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

1.1 Анализ изменения темпов накопления отходов углеобогащения и фактическое состояние вопроса

Образование отходов всегда сопровождало добычу и переработку полезных ископаемых, однако накопление горнопромышленных отходов не рассматривалось как проблема. Тем не менее, в ходе научно-технического прогресса общая добыча минерального сырья непрерывно увеличивается вследствие ежегодного роста спроса на энергетические ресурсы. Горнодобывающая промышленность является самым крупным источником всех видов отходов. Так, за 2021 год согласно Государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» объем накопленных отходов превысил 8 млрд т, 95% которых составляют отходы промышленности и потребления, при этом больше 50% приходится на добычу и обогащение угля [9].

В России количество отходов, образуемых в год на одного человека, превышает 34 т, в то время как в странах Европейского союза этот показатель составляет 6 т. Актуальные мониторинговые и аналитические данные о состоянии и использовании земельных ресурсов публикуются в государственных отчётах Министерством природных ресурсов РФ, начиная с 2001 года. Согласно данным о состоянии окружающей среды в РФ за 2019 год, площадь нарушенных горнопромышленными работами земель увеличивается ежегодно на 5%. Только 45% из нарушенных земель подвергаются рекультивации, в то время как остальная часть изымается из использования под отвалы, в результате чего ежегодно отчуждается приблизительно 10 тыс. га земель [9]. Решение проблемы отчуждения потенциально плодородных земель и осуществления рационального недропользования является ключевой задачей охраны земельного фонда.

Кроме того, актуальной проблемой является то, что отвальные, вскрышные породы и продукты переработки горной массы наносят значительный ущерб окружающей природной среде. Химически неустойчивые в гипергенных процессах минералы, оказывающиеся на дневной поверхности вследствие перемещения

горных пород, являются источником загрязнения среды и вызывают деградацию экосистемы и почвенного покрова, загрязнение подземных вод, изменение микроклимата. Происходит разрушение структуры ландшафта, что приводит к отчуждению зон размещения промышленных объектов [15, 106]. Наибольшую опасность представляют объекты складирования отходов обогащения как источник токсичных соединений и тяжелых металлов.

С точки зрения охраны окружающей среды отходы горной и перерабатывающей промышленности представляют собой источник загрязнения атмосферы, гидросферы, почвенного покрова, фактор разрушения ландшафтов и биоценозов, а также причиной ухудшения здоровья населения и повышения смертности в районах добычи [58]. В криолитозоне складированные отходы оказывают влияние на процесс оттаивания многолетнемерзлых пород.

Отходы горнодобывающего сектора подразделяются на отходы добычи (более 3 млрд т отвалов) и отходы переработки полезного ископаемого, включающие свыше 0,5 млрд т хвостов обогащения руд, около 60 млн т металлических шлаков, более 50 млрд т шлаков и шламов ТЭС, десятки млн нефтяных шламов, около 10 млн т фосфогипса и фторогипса [9]. Более того, современный этап развития горного производства характеризуется непрерывным снижением содержания полезных компонентов, что влечёт за собой увеличение объёмов добычи и приводит к накоплению большего количества отходов (рисунок 1.1).

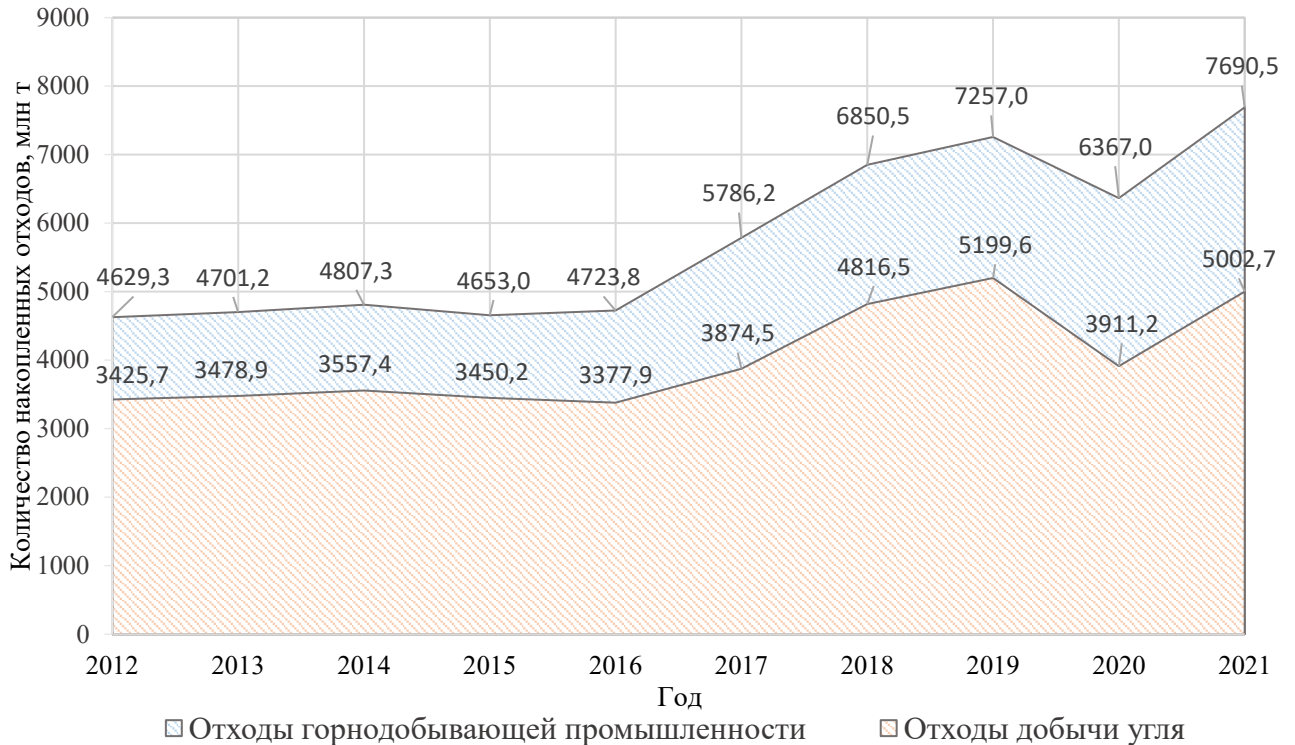


Рисунок 1.1 – Накопление горнопромышленных отходов в России [9]

Среди всех секторов горной промышленности наибольший по объёму вклад в накопление отходов вносит угольная промышленность. К углеотходам относятся вскрышные и шахтные породы, отходы углеобогащения, угольная зола и шлаки. В топливно-экономическом балансе России, как и многих стран, обладающих большими его запасами, уголь играет значительную роль. Объем мировой добычи угля за период с 2010 по 2021 г. в среднем остался на одном уровне, но в некоторых угледобывающих странах увеличился до 30% (например, в России и Индии) (рисунок 1.2), доля России в мировой добыче увеличилась до 5,5% [113]. Ожидается, что тенденция увеличения добычи сохранится в ближайшем будущем. Исходя из Энергетической стратегии России до 2035 г., объем добычи угля возрастет к 2035 г. до 490 млн т в год, несмотря на экологические ограничения [85]. Помимо роста добычи, отмечается рост переработки угля, о чем сообщают российские угледобывающие компании с целью повышения качества и рыночной стоимости [111].

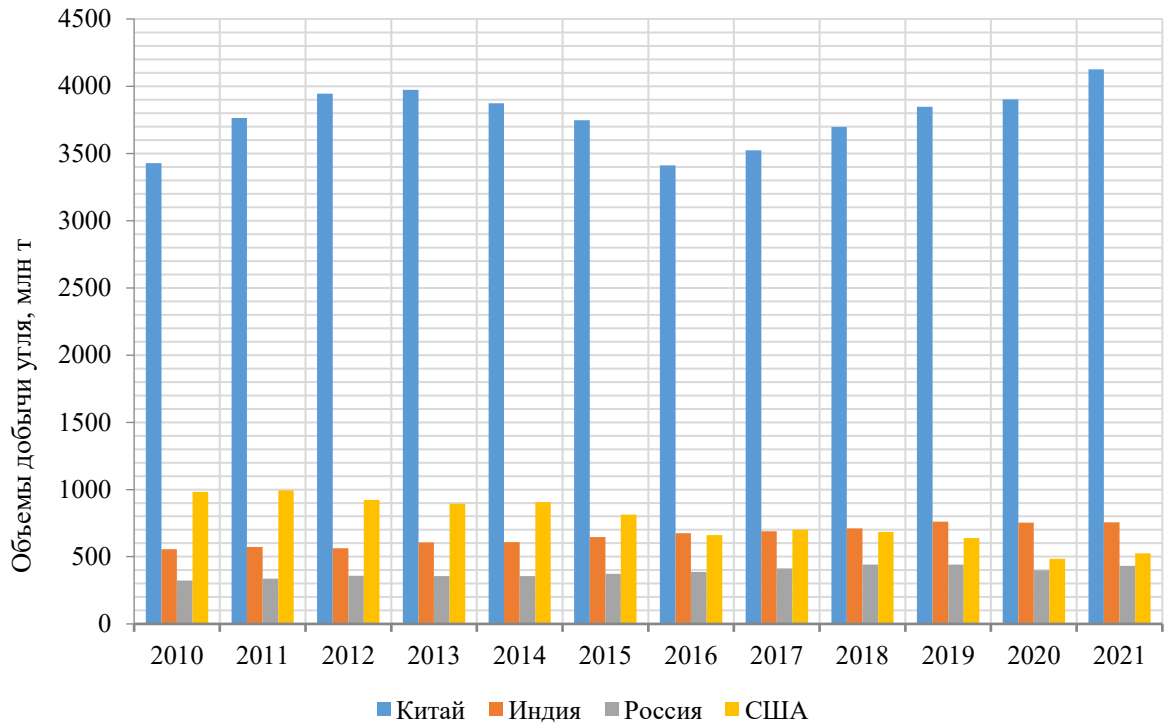


Рисунок 1.2 – Динамика добычи угля в основных угледобывающих странах в 2010-2020 годах [113]

На долю угольной промышленности приходится 67% промышленных отходов в России (5 млрд т к 2021 г.) [111]. В России, в среднем, выход на 1 т добываемого угля приходится 1,5-10 т вскрышных пород, 0,1-0,35 т шахтных пород, 0,15-0,4 т отходов обогащения и 0,12-0,5 т золошлаковых отходов [133]. Ежегодно образуется примерно 12 млн тонн отходов углеобогащения, что составляет 3% всех отходов, образующихся в стране за год [8]. Сравнивая статистические данные, можно сделать вывод, что за последние 10 лет объем накапливаемых за год отходов увеличился на 66% (рисунок 1.3).

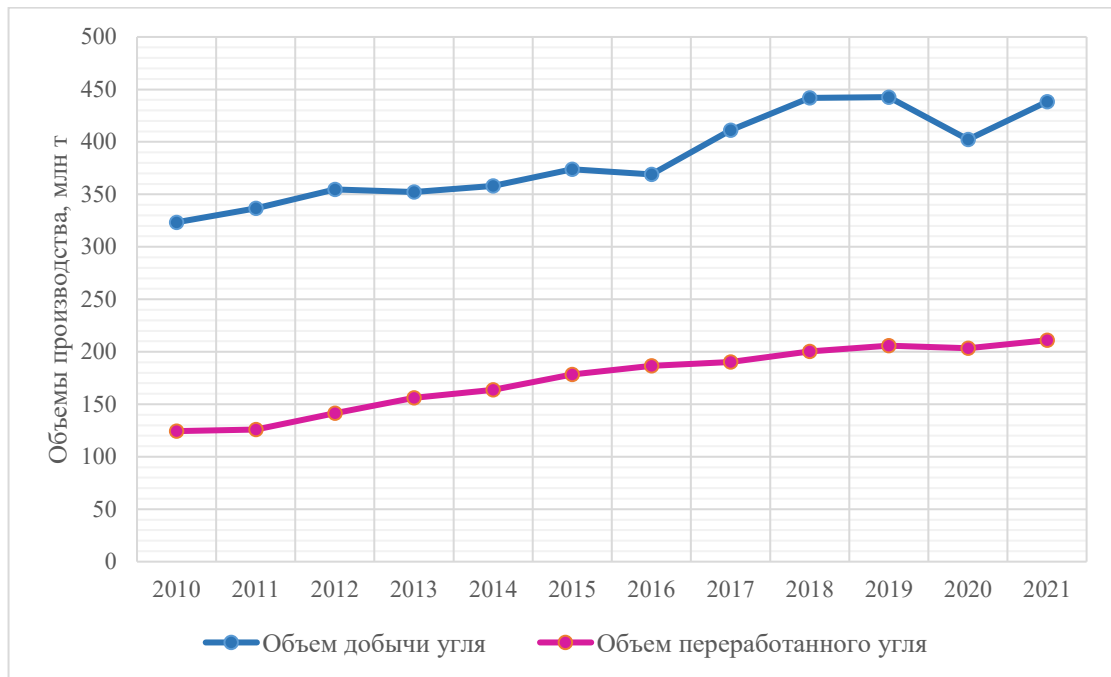


Рисунок 1.3 – Объёмы добычи и переработки угля в Российской Федерации с 2010 по 2021 года [8]

Накопленные отходы оказывают масштабное и длительное воздействие на окружающую среду, становятся причиной ухудшения здоровья населения в районах добычи. Под складирование изымается большое количество земельных ресурсов: до 60% площади горного отвода может быть отдано под размещение отходов, а в случае обогатительного предприятия, в среднем, для складирования отходов требуется 2-3 тыс. га [22]. Решение проблемы накопления, складирования и повторного использования отходов угольной промышленности является ключевой отраслевой задачей для всех угледобывающих стран.

К настоящему времени предложено большое количество способов утилизации и вторичного использования углеотходов. Отходы горной промышленности рассматриваются сырьевым ресурсом для строительства. По оценке Б. К. Михайлова [77], около 30% вскрышных пород и отходов являются строительными материалами, при этом объёмы подобного строительного больше, чем потребности строительной отрасли. Однако целесообразность их использования определяется не только свойствами отходов, но и экономическими показателями. Слабое вовлечение отходов горной промышленности во вторичное

производство обуславливается, как правило, отдалённостью места расположения сырья от потенциального места применения.

Опыт зарубежных стран свидетельствует о значительном проценте вовлечения отходов в хозяйственный оборот. Так, отходы горной промышленности являются источником для добычи 40% годового объёма добычи меди и 35% золота [53]. Доля вовлечённых во вторичное использование ежегодно образующихся отходов может достигать 90%, однако в России этот показатель равен 20-25% [67].

Причина высокого процента вовлечения отходов во вторичное использование заключается в политике государства, стимулирующей предприятия путем предоставления льготной системы налогообложения и кредитования [154, 164]. В результате того, что предприятия самостоятельно несут ответственность за рекультивацию территорий, вторичное использование отходов становится более целесообразно и экономически эффективно [67, 71].

Следовательно, проблема отсутствия заинтересованности у предприятий в разработке вторичных месторождений в России заключается в следующем:

- ресурсная база характеризуется большим количеством малых месторождений, многие из которых не востребованы и не рентабельны в существующей конъюнктуре рынка;
- сложность и дороговизна извлечения компонентов при общей неопределённости государственного стимулирования подобных работ. Наблюдается отсутствие государственной координации по освоению техногенных месторождений и, как следствие, отсутствие методики решения вопроса о вовлечении техногенных месторождений в использование;
- специфические физико-химические свойства сырья, затрудняющие процесс проектирования и разработки;
- экологические риски, которые необходимо уменьшать. Риски связаны с негативным воздействием отходов добычи и переработки на окружающую среду.

Основные принципы рационального недропользования сейчас – это воспроизводство минерально-сырьевой базы, обеспечение полного извлечения полезного компонента, снижение отходов производства [40]. Для отечественной

промышленности основной путь к достижению данных целей – совершенствование законодательства и нормативной базы [78].

На фоне отсутствия необходимых изменений в горном законодательстве активно развивается экологическое законодательство, разрабатываются нормативные документы для регулирования процедуры обращения с техногенными отходами [1]. Так, в 2012 году приняты Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Основными задачами названы сокращение образования отходов, а также вторичное использование техногенного сырья.

Помимо вышеупомянутых указаний, в 2017 году была опубликована Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, посвящённая тематике внедрения наилучших доступных технологий. Итогом проводимой политики, согласно данной Стратегии, должны стать трансформация системы обращения с горнопромышленными отходами и создание отрасли по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов горного производства.

К положительным примерам вторичного использования отходов горнорудного производства относится их применение в качестве источника полезных компонентов. В некоторых случаях переработка техногенных отходов позволяет извлекать редкие и рассеянные металлы [171, 9]. В настоящее время учтены более ста техногенных месторождений различного типа [23]. Подобные месторождения могут увеличить до четверти ресурсный потенциал государства по запасам меди, золота, серебра, мышьяка, кобальта, молибдена и других элементов. При этом затраты на освоение подобных месторождений ниже, чем природных. Соответственно, можно говорить об экономической выгоде от вовлечения техногенного сырья в промышленный оборот. Так, для лежалых хвостов обогащения центральной обогатительной фабрики «Кузнецкой» (ЦОФ «Кузнецкой») (Кемеровская область, Россия) было проведено исследование о возможности получения ликвидного железосодержащего и углесодержащего сырья гравитационно-магнитным методом обогащения [96].

Другим перспективным методом утилизации промышленных отходов является их применение в устройстве оснований зданий и сооружений. Однако одновременно с положительным опытом использования у данного метода существуют недостатки. При изменении температурно-влажностного режима наблюдаются значительные осадки сооружений, возведённых на техногенных отложениях. Это обусловлено специфическими прочностными и деформационными свойствами подобного типа отложений, которым характерны процессы самоуплотнения, суффозии, изменение крупности с течением времени, что отличает их по инженерно-строительным свойствам от отложений естественного сложения. Следовательно, изучение физико-механических свойств специфических отложений должно происходить по методике, отличной от общепринятых правил. Некоторые виды отходов характеризуются слабой изученностью, что является сдерживающим фактором для их применения [54].

С точки зрения инженерной геологии первостепенной задачей можно считать изучение свойств техногенных пород, что в дальнейшем позволит осуществлять недропользование наиболее рационально. Более глубокое понимание свойств техногенных пород и, в частности, отходов угольной промышленности, могло бы ускорить процесс их внедрения в различные сферы производства и расширить область их применения. Кроме того, внимания требует также тема взаимосвязи различных свойств, выделения наиболее актуальных и ключевых, определяющих поведение пород во времени. Имеющиеся к настоящему времени экспериментальные и теоретические данные о свойствах техногенных пород недостаточны для прогнозирования изменений их свойств и поведения.

Таким образом, приведённые выше данные свидетельствуют о наличии проблемы накопления и складирования отходов горного производства и отходов угольной промышленности, в частности. Комплексные исследования по теме вторичного использования, а также рационального обращения с отходами угольной промышленности, являются актуальными.

1.2 Анализ технологий складирования отходов углеобогащения

Представленные в предыдущем разделе статистические данные подтверждают тренд увеличения объёмов накопления горнопромышленных отходов, который сохранится и в будущем. В связи с этим размещение твёрдых отходов горной промышленности и эксплуатация объектов складирования должны соответствовать современным требованиям и обеспечивать высокий уровень безопасности.

Технологии складирования отходов добычи и переработки сырья разделяются на сухое складирование и складирование намывным способом.

Намывные массивы формируются с помощью гидромеханизированных технологий транспортирования вскрышных пород, золошлакового материала и хвостов обогащения [79, 29]. Для транспортировки отходов в хвостохранилище используют трубопроводы. В хвостохранилище происходит выпуск пульпы, укладка хвостов, осветление жидкой фазы пульпы и её возвращение в производственный цикл. В некоторых случаях целесообразным является предварительное сгущение пульпы.

Преимуществами технологии являются высокая производительность и автоматизация, низкая себестоимость процессов, рациональное потребление водных ресурсов в случае использования в процессе дренажных вод [16, 28]. В то же время, сейчас некоторые компании стараются уйти от использования гидромеханизированных технологий. К недостаткам метода относят долгий период уплотнения и консолидации, что связано с водонасыщенностью материала [125] и, следовательно, низкую несущую способность. Рекультивация намывных массивов затруднена и длительна, до проведения которой они представляют собой источник негативного и длительного воздействия на окружающую среду. Фиксируется большое количество аварий на подобных объектах, связанных с прорывом ограждающих дамб. Таким образом, в отношении технологии гидроотвалообразования промышленности требуются качественные изменения в области внедрения инновационных разработок для увеличения вместимости

сооружения, повышения его несущей способности, разработки методов оперативного контроля состояния [130].

Промежуточными между отходами в сухом и пульпообразном состоянии являются отходы в пастообразном состоянии. К пастообразным относят техногенный материал, обладающий специфическими характеристиками: содержание минеральных компонентов в пастообразных отходах – до 75%, также они отличаются высоким содержанием пылеватых частиц (более 20%), после складирования либо не происходит отделения воды, либо происходит в небольшом количестве (менее 10%), прочность на сдвиг составляет больше 200 Па [136]. Соответственно, пастообразные отходы характеризуются неосаждаемостью, вязкостью и устойчивостью к расползанию, не каждый тип отходов может быть приведён к состоянию пасты с помощью сгустителей и флокулянтов. Такой метод обращения с отходами позволяет возвращать наибольшее количество воды в технологический процесс, сокращать затраты на электроэнергию и рекультивационные работы, повышать стабильность сооружения, наиболее эффективно транспортировать и складировать отходы, занимая меньшие, чем при намывном складировании, площади, также отсутствуют затраты, связанные с возведением пионерной дамбы. На примере отходов Боголюбовского месторождения было рассчитано, что сгущение отходов до пастообразного состояния позволяет сократить площадь отводимых под складирование площадей на 80% по сравнению с хвостохранилищем [131]. Пастообразные отходы также часто используются как закладочный материал при подземной добыче. Однако полусухие отходы, также, как и пульпообразные, транспортируются гидротранспортом и складировются в хвостохранилищах. Соответственно, все недостатки складирования намывным способом свойственны и для данного типа отходов (пыление, риск прорыва ограждающих дамб, высокая стоимость обслуживания хвостохранилища, ущерб окружающей среде).

Сухое складирование отходов, то есть насыпной способ отвалообразования, применяется для складирования вскрышных, вмещающих пород и отходов углеобогащения. Как и намывные массивы, отвалы негативно воздействуют на

среду в результате пыления, горения, разрушения ландшафта и химического загрязнения среды. По сравнению с гидромеханизацией отвалообразование, осуществляемое железнодорожным и автотранспортом, менее производительное и более дорогостоящее. Тем не менее, достоинством технологии является большая вместимость сооружения благодаря отсутствию избыточной влаги в материале и более высоким прочностным характеристикам. Также отсутствуют риски, связанные с прорывом дамбы хвостохранилища. Сухое складирование позволяет сэкономить ресурсы предприятия как на возведение дамбы, так и на транспортировку. Обезвоживание происходит на обогатительной фабрике путём дренирования (для крупнообломочного материала), центрифугирования, сгущения, фильтрации и сушки.

Отходы флотации угля на первом этапе обезвоживаются путём сгущения, в ходе которого суспензия размещается в отстойнике с добавлением химикатов для флокуляции. Флокулировавшие частицы осаждаются на дно резервуара, затем выводятся. Дальнейшее обезвоживание происходит механическим путём, чаще всего с помощью ленточных и вакуумных фильтр-прессов, где создаётся высокое давление с отжатием влаги. Ленточные фильтры имеют более высокую производительность, их эксплуатация дешевле, но обеспечивают большую влажность отхода. Вакуумные фильтр-прессы производят менее влажный материал, но сложны и дорогостоящи в эксплуатации. Содержание влаги после обезвоживания крупнообломочного материала составляет от 5 до 15%, отходов флотации – от 22 до 55% и зависит от содержания глинистых частиц (таблица 1.1) [13, 140].

Таблица 1.1 – Влажность отходов углеобогащения после прохождения фильтр-прессового оборудования [13]

Содержание глинистого материала в отходах флотации, %	Влажность материала, %
<50	24
50-60	27
60-70	30
70-80	>30

Гидротранспортирование отходов с такой влажностью невозможно, поэтому для транспортировки материала чаще всего используют автотранспорт. В ходе складирования происходит погрузка, транспортирование, укладка и уплотнение, что требует больших капитальных затрат, чем гидротехнические работы.

Несмотря на постоянное повышение уровня безопасности возводимых сооружений, в настоящее время регулярно сообщается о авариях, связанных с потерей устойчивости объектов складирования горнопромышленных отходов и отходов углеобогащения, в частности. Наиболее заметные из них перечислены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Описанные в научной литературе случаи аварий на объектах складирования отходов угольной промышленности

Местоположение	Год	Тип сооружения	Описание события	Причина
Оползень в Аберфане, Уэльс, Великобритания	1966	Отвал угольной шахты	Сдвигение около 107 000 м ³ пород, размещённых в отвале угольной шахты, разрушение близлежащего города, 144 жертвы	Вызванное ливнями увеличение порового давления воды в подошве сооружения; слабая консолидация пород и вследствие этого их разжижение [138]
Наводнение Буффало-Крик, Виргиния	1972	Хвостохранилище	Прорыв оградительной дамбы хвостохранилища, сооружённой из отходов угледобычи, затопление города, 125 жертв	Основанием дамбы являлись отходы добычи угля. Выветривание оказало влияние на прочность на сдвиг. Повышение порового давления в приподошвенном слое [141]
Разрушение отвала угледобывающего предприятия, Центральная Анатолия, Турция	2001 - 2002	Внутренний отвал угольного разреза	Перемещение более 20 млн т материала	Разрушение произошло по комбинированной поверхности скольжения: по плоскости ослабления между отвалом и основанием, а также по круглоцилиндрической поверхности в теле отвала. Постепенное разрушение частиц при уплотнении до пылеватого состояния [156]

Продолжение таблицы 1.2

Местоположение	Год	Тип сооружения	Описание события	Причина
Разрушение отвалов угольного предприятия, Калимантан, Индонезия	2004	Отвал угольной шахты в выработанном пространстве карьера	1 обвала в теле отвалов 80 млн м ³ и 10,5 млн м ³	Свойства отложений, находящихся в неводонасыщенном состоянии, изменились при увеличении их влажности в сторону размягчения и ослабления [167]
Птолемаида, Греция	2004	Отвал угольного разреза	Перемещение 40 млн м ³ материала на расстояние до 300 м со скоростью 40-50 м/сут.	Под отвалом располагалось место разгрузки подземных вод. Могло произойти из-за повышения давления воды в теле отвала [166]
Прорыв дамбы пруда-отстойника, Теннесси, США	2008	Пруд-отстойник для угольной золы	Прорыв дамбы и разлив 4,12 млн м ³ шлама на территории 1,2 км ²	Дамба была возведена на недоупрочненных техногенных отложениях. В недренированном состоянии прочностные характеристики материала были значительно снижены [135]
Прорыв дамбы хвостохранилища, Альберта, Канада	2013	Хвостохранилище	Прорыв дамбы хвостохранилища и вынос в реку Атабаска 670 000 м ³ промышленных вод и 90 000 т шлама.	Подъем уровня воды в хвостохранилище, нарушение конструктива дамбы, приведшее к ее полному разрушению [151]
Разрушение отвала вскрышных пород, разрез «Заречный», Кузбасс, Россия	2015	Внешний отвал угольного разреза	Перемещение 27,5 млн м ³ отвальных пород в результате оползня	Повышение уровня техногенного водоносного горизонта в результате снеготаяния [24]

Продолжение таблицы 1.2

Местоположение	Год	Тип сооружения	Описание события	Причина
Разрушение хвостохранилища, Синграули, Индия	2020	Хвостохранилище	Прорыв дамбы, в результате чего 400 000 т отходов углеобогащения распространилось на 6,5 км	Повреждение в ходе земляных работ стенки дамбы. Высокое гидростатическое давление в верхней части дамбы привели к дальнейшему разрушению [152]
Разрушение отвала вскрышных пород, Солнцевский угольный разрез, Сахалинская область, Россия	2021	Отвал угольного разреза	Перемещение 70 000 м ³ отвальных пород в результате оползня	Нет опубликованных данных

Анализ произошедших аварий свидетельствует о том, что наиболее часто аварии связаны с разрушением ограждающих дамб намывных массивов. Помимо случаев на гидротехнических сооружениях, аварии были вызваны нарушением технологии ведения горных работ и отсутствием мониторинга состояния массива: породы, складированные в отвалах, снижали несущую способность в водонасыщенном состоянии вследствие возникновения избыточного порового давления для глинистых пород и возникновения плавунных свойств для песчаных. Зачастую не удаётся установить точную причину разрушений и выработать единое мнение о причинах аварии. Несмотря на то, что отходы углеобогащения относятся к V классу опасности, подобные техногенные аварии имеют большие экологические последствия. При этом наиболее разрушительные события, происходящие с высокой скоростью и интенсивностью, приводящие к гибели людей и наносящие значительный экономический ущерб, связаны с разрушением хвостохранилищ. Таким образом, предотвращение аварийных ситуаций на любом объекте складирования угольных отходов остаётся актуальной задачей. Переход к технологии «сухого» складирования отходов в насыпные отвалы при качественном проектировании позволяет уменьшить экологические риски.

Таким образом, на современном этапе развития науки и техники складирование намывным способом во многих случаях можно отнести к устаревшим методам горной промышленности в связи с высокими экологическими рисками и использованием большого количества водных и земельных ресурсов. Тем не менее, намывной способ складирования отходов до сих пор остаётся широко распространённым, что может быть обусловлено инерционным развитием горнопромышленных предприятий. Анализ существующих технологий складирования отходов углеобогащения показывает, что наиболее перспективным и внедряемым на многих новых предприятиях методом является сгущение отходов перед складированием ввиду технологических и экологических преимуществ метода. Экономия водных ресурсов, особенно на территориях с суровым климатом, где их количество ограничено, также доказывает актуальность темы изучения отходов углеобогащения, складированных сухим способом в отвалах.

1.3 Классификация техногенных пород

Особое значение для авторов, занимающихся тематикой техногенных пород и техногенных месторождений, приобрели вопросы типизации и классификации. Авторы отмечают, что первым шагом при разработке методики изучения техногенных пород должна стать разработка их классификационных признаков, позволяющая определить направление их дальнейшего использования [11]. Как отмечается в работах В. Т. Трофимова и В. А. Королёва, до настоящего времени не было создано унифицированной и общепринятой классификации.

Ф. В. Котловым в работах, посвящённых изменению геологической среды под влиянием деятельности человека, впервые было введено понятие антропогенных отложений и антропогенного литогенеза [59]. По Ф. В. Котлову антропогенный литогенез представляет собой «геологический процесс образования молодых в геологической истории Земли отложений, связанных с хозяйственной деятельностью человека». В дальнейшем под антропогенными отложениями подразумевались коренным образом преобразованные или созданные в ходе хозяйственной деятельности человека породы [17, 26]. Однако в

инженерно-геологических классификациях горных пород этот термин был заменён понятием техногенные породы. В иностранной литературе этому термину соответствует понятие «man-made soils» и «artificial soils». Однако для отходов горного производства используется термин «mining wastes», который распространён наиболее широко. В данной работе под техногенными породами и техногенными отложениями подразумеваются отходы недропользования.

Классификацию, разработанную, чтобы отразить прочностные и деформационные свойства техногенных пород, впервые разработал О. А. Савинов. В ней отражён минимальный возраст, при котором данные породы могут быть использованы как основания, а также допустимое давление и коэффициент упругого сжатия (из-за которых классификация относится к устаревшим) [105]. Кроме того, предлагаемый допустимый возраст (от 5 до 10 лет) в настоящее время установлен в несколько раз выше.

М. И. Агошков в 1982 году разработал типизацию техногенных георесурсов, в которой отходы горного производства являются типом техногенного георесурса наряду с глубинным теплом Земли и техногенными полостями в земных недрах [14]. Автор отмечал возможность повышения эффективности функционирования предприятия за счёт вовлечения техногенных георесурсов в производственные процессы. В целом, постоянно происходит расширение понятия георесурсов. С развитием научной мысли к ним стали относить не только полезные ископаемые в трёх агрегатных состояниях и имеющие природное происхождение, но и энергетические ресурсы в виде глубинного тепла Земли, а также пространства и полости техногенного происхождения. Вследствие истощаемости минеральных ресурсов основная задача горнопромышленного сектора – повышение эффективности производства, которое в настоящее время невозможно обеспечить внедрением более высокопроизводительного оборудования из-за экономических причин, в связи с чем необходим новый подход к недропользованию, заключающийся во вторичном использовании природном сырьевых ресурсов, освоении выработанных пространств и формировании техногенных месторождений [14].

Трубецким К. Н. была создана классификация техногенных месторождений. Автор рассматривал экологические последствия и ущерб, наносимый объектами складирования отходов горного производства, и отмечал необходимость их освоения и ориентирования на концепцию устойчивого развития [118]. Одной из ключевых работ по данной теме является учебное пособие профессора А. М. Гальперина «Техногенные массивы и охрана природных ресурсов» [30].

Классификация техногенных породных массивов по степени опасности представлена в работах М. А. Пашкевич [89, 90]. Автор определяет опасность для окружающей среды на основании токсикологических свойств складированных отходов. Наиболее полное описание физико-механических свойств техногенных пород и их классификация было выполнено Лычко М. Ю. [70].

Ю. М. Абелевым и В. И. Крутовым в 1962 была разработана классификация, где самым крупным таксоном авторы предложили способ отсыпки, так как он в значительной степени влияет на свойства материала. Однако в данной классификации недостаточное внимание уделено намывным отложениям, что не соотносится с современными представлениями о техногенных породах. [12]

М. И. Хазанов представил в 1975 году 2 классификации, одна из которых являлась генетической, где в качестве источников накопления выделялись горнотехническая, инженерно-строительная, сельскохозяйственная и военная деятельность, но не рассматривающая промышленное производство как источник отходов; а также относительно полная классификация по инженерно-геологическим характеристикам [125]. Однако в обеих классификациях отсутствуют такие породы как золы, хвосты, шлаки и шламы, которые в настоящее время составляют большую часть как горнотехнических, так и промышленных отходов.

Существующие классификации подразделены на частные, региональные и общие. К частным и региональным классификациям относятся классификации Ю. М. Абелева и В. И. Крутова, Ю. М. Лычко. В частных классификациях даётся представление только об отдельных типах пород. К общим классификациям могут

быть отнесены классификации Ф. В. Котлова и М. И. Хазанова, а также классификация ГОСТ 25100–2020.

Согласно действующему стандарту ГОСТ 25100–2020, техногенные породы классифицированы как техногенные грунты являются одним из типов трёх классов грунтов: скальных, дисперсных и мёрзлых. По генезису дисперсные техногенные и мёрзлые техногенные грунты подразделяют на природные грунты, техногенно изменённые, на техногенно перемещённые грунты и на грунты антропогенного происхождения. Эта классификация была разработана на основе классификации Е. А. Вознесенского [26].

Такая классификация совпадает с классификацией, составленной коллективом авторов [17], где впервые был введён термин «техногенные грунты» (таблица 1.3).

Важным аспектом, который необходимо учитывать при типизации техногенных пород и пород в принципе, является наличие процесса промерзания/протаивания. Для России это особенно актуально: на территории страны значительная часть горнопромышленных предприятий, а также объектов складирования отходов горного производства, расположена в зоне распространения многолетнемерзлых пород [41]. Установлено, что вследствие наблюдаемой динамики климатических изменений в сторону потепления, в условиях криолитозоны происходит и активизация экзогенных геологических процессов и явлений [168]. Таким образом, для создания надёжного горно-геологического прогноза поведения системы «техногенные породы-основание», расположенной в условиях крайнего Севера, при классификации и типизации необходимо также учитывать и температурный режим пород. Вопрос о формировании техногенных отложений вследствие добычи угля в условиях крайнего Севера (архипелаг Шпицберген), а также определения их позиции среди существующих таксонов поднимается в работе Е. Явид [153].

Таблица 1.3 – Классификация техногенных грунтов (по Афонину [17])

Класс	Группа	Подгруппа		Тип	Вид
Техногенно-образованные	По виду деятельности (источнику формирования): строительное, промышленное, горное производство, коммунальное хозяйство	Насыпные	Свалки	Твердые коммунальные и бытовые отходы Строительные отходы	Рыхлые Уплотнившиеся
			Отвалы	Шлаки металлургические Золошлаки Шламы	Распавшиеся Нераспавшиеся
		Намывные	Гидроотвалы	Золошлаки Золы Шламы	Химически активные Инертные
Техногенно-переотложенные		Насыпные	Отвалы	Вскрышные породы Горные выработки Горно-обогатительные предприятия Строительные	Свежеотсыпанные Уплотнившиеся
			Планомерно возведенные	Насыпи Плотины Территории Локальные сооружения	Рыхлые Средней плотности Плотные
		Намывные	Гидроотвалы	Вскрышные породы горно-обогатительных предприятия	Свеженамывные
			Планомерно намывные	Дамбы Плотины Территории Локальные сооружения	Уплотнившиеся Упрочнившиеся
Техногенно-изменённые		Изменённые физическим воздействием		Уплотненные Разуплотненные Замороженные Оттаевшие Обезвоженные	Упрочненные
		Изменённые химико-физическим воздействием		Увлажненные Осушенные Химически модифицированные Химически закрепленные	Разупрочненные

Проблема отсутствия унифицированной терминологии и классификации поднималась в работах Каздыма А. А., который показал, что многие авторы предлагают различные решения для создания номенклатуры относительно техногенных отложений, основываясь на субъективных выводах. Многие из существующих терминов, в сущности, означают одно и то же, однако автор объясняет разницу между «техногенными» и «антропогенными» отложениями, заключающуюся в применении любых технических средств и химическом воздействии на материал при формировании «техногенных» отложений [46].

Что касается зарубежного подхода к классификации техногенных пород, то, в целом, техногенные породы на территории Европейского союза рассматриваются как один из типов отходов. В 2000 году была создана классификация, которая разделяет техногенные породы в зависимости от их генезиса (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Классификация отходов обогащения, принятая на территории Европейского союза [148]

01 03	Wastes from physical and chemical processing of metalliferous minerals	Отходы обогащения рудных полезных ископаемых
01 03 04*	Acid-generating tailings from processing of sulphide ore	Кислотообразующие отходы обогащения сульфидных руд
01 03 05*	Other tailings containing dangerous substances	Прочие отходы, содержащие опасные вещества
01 03 06	Tailings other than those mentioned in 01 03 04 and 01 03 05	Прочие отходы, отличные от 01 03 04 и 01 03 05
01 03 07*	Other wastes containing dangerous substances from physical and chemical processing of metalliferous minerals	Прочие отходы обогащения рудных полезных ископаемых, содержащие опасные вещества
01 03 08	Dusty and powdery wastes other than those mentioned in 01 03 07	Пылящие и порошкообразные отходы, отличные от 01 03 07
01 03 09	Red mud from alumina production other than wastes mentioned in 01 03	Глинозём из красного шлама, отличные от 01 03
01 03 99	Wastes not otherwise specified	Неспецифические отходы
01 04	Wastes from physical and chemical processing of non-metalliferous minerals	Отходы обогащения нерудных полезных ископаемых
01 04 07*	Wastes containing dangerous substances from physical and chemical processing of non-metalliferous minerals	Отходы обогащения нерудных полезных ископаемых, содержащие опасные вещества
01 04 08	Waste gravel and crushed rocks other than those mentioned in 01 04 07	Крупнообломочные отходы, отличные от 01 04 07
01 04 09	Waste sand and clays	Отходы мелко- и тонкодисперсные
01 04 10	Dusty and powdery wastes other than those mentioned in 01 04 07	Пылящие и порошкообразные отходы, отличные от 01 04 07
01 04 11	Wastes from potash and rock salt processing other than mentioned in 01 04 07	Отходы обогащения калийных и каменных солей, отличные от 01 04 07
01 04 12	Tailings and other wastes from washing and cleaning of minerals other than mentioned in 01 04 07 and 01 04 11	Хвосты и другие отходы промывки и очистки полезных ископаемых, отличные от 01 04 07 и 01 04 11
01 04 13	Wastes from stone cutting and sawing other than mentioned in 01 04 07	Отходы резки и распиловки камня, отличные от 01 04 07
01 04 99	Wastes not otherwise specified	Неспецифические отходы
* Hazardous waste regardless of any threshold concentrations		Опасные отходы независимо от концентрации опасных веществ
* Hazardous waste only if dangerous substances are present above threshold concentrations		Опасные отходы в случае превышении допустимых концентраций опасных веществ

В странах, где действует данная директива, основным критерием для классификации техногенных пород является их опасность. Опасность оценивается по следующим критериям:

- 1) Существует вероятность деформации, которая может привести к негативному воздействию на окружающую среду;
- 2) Концентрация опасных отходов, рассматриваемых как опасные вне зависимости от концентрации, превышает пороговые значения;
- 3) Содержание опасных веществ в отходах превышает пороговые значения.

Если выполняется одно из вышеперечисленных условий, независимо от того, выполняются ли другие, техногенные породы классифицируются как потенциально опасные.

Основным подходом при классификации техногенных пород за рубежом является метод оценки рисков [157]. Соответственно, принцип обеспечения безопасности для человека и окружающей среды является основополагающим. В целом, в современных реалиях данный подход определённо является актуальным и, вполне возможно, что в будущем в России данная характеристика также будет рассматриваться как первоочередная для всех типов техногенных пород.

Таким образом, ни одна из существующих классификацией не является общепризнанной. Во многих из перечисленных классификаций отсутствуют некоторые из существующих типов пород. Анализ рассмотренных классификаций показывает их несовершенство, что обусловлено излишней детальностью, отсутствием унификации в ряде случаев, а также отсутствием количественных мер для выделения таксонов, позволяющих относить породы к определённой группе. Отсутствие общепринятой классификации, а также утверждённых методов исследования затрудняет дальнейшее изучение и применение техногенных пород.

1.4 Инженерно-геологическая изученность отходов обогащения

На основании изложенной выше информации можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день основной научной проблемой горнопромышленной отрасли является уменьшение площадей территорий горных отводов в первую

очередь угольных предприятий. Оптимизация складирования достигается путём изучения свойств и особенностей поведения техногенных пород, позволяет выполнить научное обоснование схемы складирования с учётом обеспечения промышленной безопасности.

Минералого-петрографический состав углевмещающих пород и отходов углеобогащения хорошо изучен для каждого угольного бассейна. Отличия в соотношении макрокомпонентов между различными бассейнами существуют, но малозначительны, однако каждый из бассейнов также имеет отличительные особенности. Для отходов обогащения углей Печорского бассейна, например, характерны низкие содержания пирита и карбонатных включений в отходах [82]. В целом, отходы углеобогащения в России характеризуются низкими содержаниями кальция и магния (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Содержание в золе отходов углеобогащения макрокомпонентов в процентах [82]

Название бассейна	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO+MgO
Подмосковный	52-63	22-38	4-23	1-4
Донецкий	55-60	21-29	7-15	2-7
Челябинский	53-56	22-24	11-13	2-5
Печорский	62-65	21-23	6-8	2-6
Кузнецкий	50-67	15-30	1-9	2-12
Минусинский	34-56	13-18	11-15	8-28
Иркутский	56-58	18-21	2-4	5-8
Нуренгинский	62-69	13-15	8-10	3-7

Отходы угольной промышленности классифицируются согласно генезису и содержанию органического углерода. При содержании $C_{орг} < 5\%$ отходы относятся к минеральным, при $C_{орг} > 5\%$ – к органоминеральным. При этом отходы обогащения и шлаки всегда относятся к органоминеральным отходам.

Главными показателями отходов углеобогащения является зольность, содержание серы и углерода, так как именно эти показатели определяют возможное направление вторичного использования отходов и влияют на технико-экономические показатели. Поэтому содержания этих макрокомпонентов

определяются на всех действующих предприятиях и общеизвестны для всех угольных бассейнов (рисунок 1.4). Содержание серы всегда коррелирует с её содержанием в угольной массе, а содержание углерода зависит от режима обогащения. Углеоботходы отличаются от других отходов присутствием в них органического вещества [82].

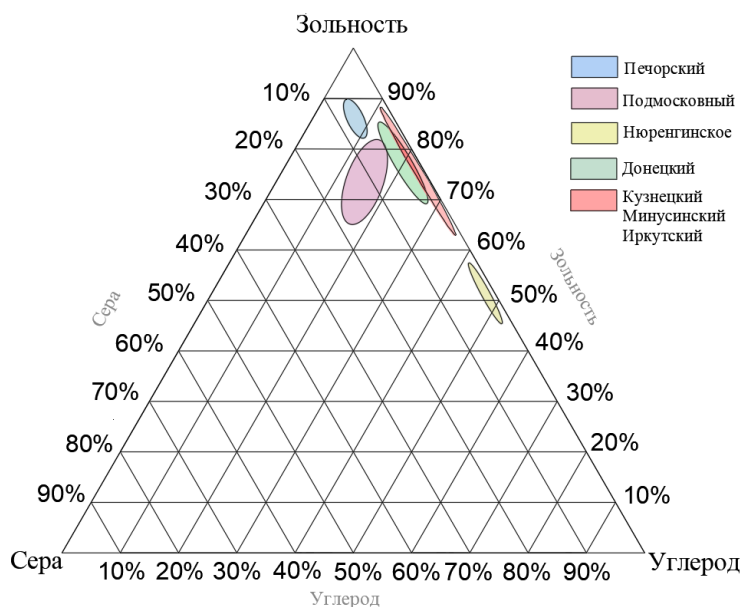


Рисунок 1.4 – Главные показатели отходов углеобогащения основных угольных бассейнов России [82]

Особенностью отходов углеобогащения является наличие сростков органического и минерального вещества [55]. К основным неорганическим (золообразующим) компонентам отходов относят Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K. Кремний обычно встречается в виде α -кварца, являющегося порообразующим минералом, и в составе алюмосиликатов. Содержание кварца обычно определяется методами РФА. Алюминий входит в состав алюмосиликатов (встречаются как группа полевых шпатов, так и глинистых минералов). Содержание глинистых минералов в большей степени определяет технологические свойства отходов (размокаемость, пластичность). Железо представлено собственными минералами (пирит, в меньшей степени марказит), входит в состав алюмосиликатов. Содержание также определяется методами РФА. Кальций и натрий присутствуют в виде карбонатов, магний и калий сосредоточены в алюмосиликатах. Описанное в литературе содержание других минералов редко превышает 1%.

Однако состав отходов углеобогащения определяется не только генезисом и характеристикой угольной массы, но и схемой обогащения и типом оборудования. Соответственно, после проведённой модернизации состав отходов всегда изменяется, соответственно, полученные ранее данные о минералогическом составе могут устаревать и можно говорить только о текущем составе отходов углеобогащения. Полный комплекс лабораторных испытаний, как правило, выполняется только тогда, когда установлена потребность предприятия в материале и определено перспективный метод вторичного использования. Соответственно, к изучению отходов углеобогащения не предъявляется строгих и регламентированных требований и состав работ определяется исключительно потребностью предприятия.

Вопросами инженерно-геологического и геомеханического изучения намывных и насыпных отвальных сооружений с научной стороны, а также аспектами гидрогеомеханического обеспечения работ по возведению горнотехнических сооружений занимались Р. Э. Дашко [36-38], М. Е. Певзнер [91], В. Г. Зотеев [43, 44], И. П. Иванов [45], Г. Л. Фисенко [123], Ю. В. Кириченко [49], О. Ю. Крячко [60], Н. Н. Розанов [104] и др. Вопросы напряженно-деформированного состояния массивов, сложенных техногенными породами, изучались путём натуральных наблюдений и лабораторных исследований Г. Л. Фисенко [123], А. М. Гальпериным [29, 31, 32], Ю. И. Кутеповым, Н. А. Кутеповой [34, 62, 64], П. С. Шпаковым [132], В. В. Ческидовым [127].

В результате анализа опубликованных работ перечисленных авторов были сформулированы характерные инженерно-геологические особенности техногенных пород насыпей и отвалов [54]. К таким особенностям относятся:

- Возникновение нарушенной структуры вследствие разрыхления при выемке, транспортировке и проведении отвальных работ. Это обуславливает снижение прочности по сравнению с естественным залеганием;
- Естественное фракционирование пород по вертикали, происходящее при отсыпке, вследствие чего возникает сложное распределение свойств, определить которые не всегда является возможным;

- Изменение во времени параметров прочности в связи с уплотнением и изменением влажности. Недоуплотненность, водонасыщенность и, как следствие, способность к большой сжимаемости приводит к длительному периоду естественного уплотнения – 10-20 лет;

- Различие моделей поведения пород разных видов. Так, породам в отвалах свойственно набухание и уменьшение параметров прочности по истечении 20 лет после отсыпки вследствие непрочных структурных связей, в то время как для зольных и шлаковых частиц характерно возникновение цементирующих связей;

- Мгновенные трансформации свойств пород в рамках геологического времени;

- Возникновение в водонасыщенных глинистых породах порового давления, являющегося существенным фактором развития оползней различных типов.

- Влияние процесса термовлагопереноса на физико-механические свойства пород.

Упомянутые выше свойства свидетельствуют о том, что физико-механические свойства отходов горного производства значительно отличаются от свойств пород естественного сложения.

Подробное исследование свойств отходов углеобогащения было опубликовано в 1985 году, направленное на изучение возможности использования отходов при строительстве плотин и ограждающих дамб [104]. В работе изложены результаты исследования отходов углеобогащения, образованных при добыче угля в нескольких бассейнах. Приводятся результаты петрографического и минералогического анализа, а также результаты изучения прочностных и деформационных свойств (таблица 1.6, таблица 1.7).

Таблица 1.6 – Результаты лабораторных исследований свойств отходов углеобогащения [104]

Граница текучести, WL	Граница раскатывания, WP	Число пластичности, IL	Молекулярная влагоемкость	Плотность частиц, г
доли ед.				г/см ³
0,35	0,24	0,11	0,17	2,44

В результате проведённых Н. Н. Розановым исследований установлено, что сопротивление сдвигу отходов углеобогащения изменяется в широких пределах в зависимости от гранулометрического состава и водонасыщения: воздушно-сухие отходы имеют высокие показатели прочностных свойств, в водонасыщенном состоянии сопротивление сдвигу резко уменьшается (уменьшения угла внутреннего трения до 10°) [104]. Для отходов энергетических каменных углей осредненный угол внутреннего трения был описан уравнением (1.1, 1.2):

$$\varphi_{\text{сух}} = 39,7 - 4,1 \cdot \lg \sigma_3 \quad (1.1)$$

$$\varphi_{\text{вод}} = 30,2 - 6,2 \cdot \lg \sigma_3 \quad (1.2)$$

Также в работе Н. Н. Розанова доказываются изменения прочностных свойств отходов в зависимости от состояния (разрушенности) материала. Приведённая выше публикация имеет большое значение, так как в ней дана подробная характеристика строительных свойств отходов углеобогащения, в том числе предприятия Печорского бассейна. Однако несмотря на то, что Н. Н. Розановым представлены результаты исследования материала схожего литологического состава и генезиса с объектом исследования – отходами ЦОФ «Печорская», работа, проведённая в 80-х годах, подразумевает под отходами углеобогащения только негорелые и горелые крупнообломочные щебнистые продукты гравитационного обогащения, которые могут быть пригодны для строительства плотин. Основываясь в том числе и на выводах Н. Н. Розанова о значительной изменчивости свойств отходов, зависящей от их состояния, можно сделать вывод о недостаточной изученности свойств отходов флотационного обогащения, отличающихся по характеристикам от отходов грохочения, что будет показано далее.

Начиная с 50-х годов XX века основным методом складирования отходов, в частности, углеобогащения, являлся гидронамыв. Соответственно, большинство исследований было направлено на изучение отходов, складированных в гидротехнических сооружениях. Однако в настоящее время по большей части применяется метод «сухого» селективного складирования. В таблице 1.7

приведены результаты исследований свойств отходов угольной промышленности, проведённых на различных объектах исследования.

Таблица 1.7 – Результаты изучения физико-механических свойств отходов добычи и обогащения угля, опубликованные в открытых источниках

Объект исследования	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, градусы	Плотность, г/см ³
Отходы обогатительной фабрики «Вахрушевская», разрез «Краснобродский угольный разрез», Кузбасс [24]	25	19	1,50
Отходы обогатительной фабрики «Коксовая» филиала «Бачатский угольный разрез», Кузбасс [24]	30	25	1,12
Отходы флотации ЦОФ «Беловская», Кузбасс [63]	16-30	30-37	1,2-1,55
Шламы флотации Днепродзержинского завода [70]	11-16	30-34	1,41-2,05
Отходы гравитационного обогащения ГОФ «Капитальная», Инта [102]	80	21	1,65
Отходы угледобывающего предприятия в каменноугольном бассейне Боуэн, Австралия, Квинсленд [149]	0-20	18-25	1,80-2,00

Исходя из анализа вышеупомянутых работ, отходы угледобычи и обогащения угля представляют собой сложные полиминеральные системы, состоящие из частиц разнообразной формы и крупности.

Плотность укладки техногенных пород зависит в большой степени от их влажности, так как с увеличением влажности объёмная масса скелета грунта также увеличивается [70]. Однако для техногенных пород характерна неоднородность по плотности, увеличивающаяся с глубиной, что является следствием уплотнения нижележащих пород при нагружении. Эту тему в своих работах подробно рассматривает А. М. Гальперин [28, 29]. Скорость уплотнения зависит от литологического состава и способа формирования отвалов, наиболее активно протекает в течение 1,5-2 лет после складирования. Теоретическая оценка

процессов уплотнения отвальных насыпей дана Ф. Шлоссером [30]. Обобщение накопленных знаний в области возведения намывных и насыпных сооружений сделано А. М. Гальпериним, Ю. И. Кутеповым и Ю. В. Кириченко в монографии [31]. Вопросом складирования отходов в режиме управляемого деформирования посвящены работы В. Г. Зотеева, который также предлагал новые технологии для складирования и формулировал принципы проектирования накопителей [43]. Уплотнение слабоструктурных водонасыщенных пород происходит за счёт отжатия воды из пор, что увеличивает величину сопротивления сдвигу. Следовательно, дренажные мероприятия и регулирование процесса отсыпки в целом позволяет контролировать величину порового давления для обеспечения необходимых показателей устойчивости массива [47].

Таким образом, для характеристики деформационных свойств и устойчивости массива среди технологических параметров определяющее значение имеют высота и другие пространственные характеристики сооружения, темпы отсыпки, играющие наибольшую роль при формировании порового давления, конструктивные особенности и распределение различного типа отложений в массиве.

Начало изучений свойств техногенных пород с инженерно-геологической точки зрения началось в 50-х годах с создания в институте ВНИМИ лаборатории устойчивости бортов карьеров под руководством Г. Л. Фисенко. Сотрудниками лаборатории был подготовлен ряд документов для угольной отрасли СССР, которые используются и в настоящее время. Специалистами были разработаны методики изучения намывных массивов, описаны механизмы их консолидации во времени и физико-механические свойства, также большой объем знаний накоплен по теме оценки и прогноза геомеханических процессов в массиве. Однако в большинстве исследований рассматривались только намывные сооружения и отвалы высотой до 50 м. Работ, посвященных изучению отвалов высотой более 50 м, практически нет. Основные методические указания, используемые при проектировании отвальных сооружений и управлении их состоянием:

- Методические указания по определению параметров угольных разрезов [73];
- Рекомендации по инженерно-геологическому обоснованию параметров сухих пород, отсыпаемых на гидроотвалах [102];
- Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях [120, 121];
- Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов [2].

В то же время на практике часто используются табличные значения для расчётов параметров отвала, что свидетельствует о формальном отношении к отвалам как инженерно-геологическим сооружениям. Также в случае с отвалами техногенных пород необходимо говорить о проявлении «масштабного эффекта», связанного с неоднородностью состава и длительным периодом формирования сооружения. В связи с этим возникает необходимость не только в проведении достаточных лабораторных испытаний, но и создании численной модели массива для оценки его поведения в целом.

Как правило, в расчётах массив рассматривается как однородная среда, обладающая гомогенными прочностными и деформационными свойствами, вследствие чего расчёты по устойчивости сооружения, в которых применяется такой подход, могут оказаться некорректными. Так, исследования показывают существенное отличие значений прочностных и деформационных свойств материалов, полученных в результате статистической обработки данных лабораторных исследований, от значений, полученных в ходе проведения статического зондирования [92]. Решение вопроса о неоднородности свойств техногенных пород может заключаться в создании моделей, учитывающих различия в значениях угла внутреннего трения и сцепления в теле отвала, на основе которых в массиве могут быть выделены отдельные инженерно-геологические элементы [92]. В связи с этим можно сделать вывод, что для получения достоверных результатов анализа прочностных параметров массива должна решаться задача о пространственном распределении свойств техногенных

отложений, слагающих отвал, что в данный момент представляет определённую сложность.

Физико-механические свойства пород, содержащих воду, зависят от температурного и водного режима среды. Фундаментальные исследования в области изучения влагосодержащих пород показали, что прочность является функцией температуры [142, 143]. Так, по результатам, полученным благодаря использованию метода центробежного моделирования, было доказано, что при понижении температуры происходит увеличение значений прочностных характеристик. Однако при повышении температур прочность породы, содержащей лёд, может быть значительно ниже, чем прочность той же породы при положительных температурах (в отсутствие льда). Эти выводы показывают, насколько большую роль на практике в каждом конкретном случае может играть проведение термометрических испытаний пород. Тем не менее, температурные условия зачастую не учитываются в ходе проведения инженерно-геологических исследований.

На данном этапе развития знания можно говорить о значительном объёме исследований, однако недостаточном развитии области прогнозирования поведения массива и изменения свойств складированного материала во времени, что является первоочередной задачей для современной промышленности.

1.5 Выводы к главе 1

Для угольной промышленности проблема накопления и складирования отходов является актуальной в связи с ежегодным увеличением объёмов отходов. Перспективным методом обращения с отходами углеобогащения является их частичное обезвоживание и совместное складирование в отвалах. К настоящему времени отходы углеобогащения, складированные таким способом, характеризуются слабой изученностью, что может приводить к развитию неблагоприятных процессов и явлений в массиве.

Несмотря на то, что сейчас существует тенденция к развитию оригинальных методов исследований, многие авторы отмечают отсутствие комплексного подхода

и недостаточную реализацию идей на практике, в том числе отсутствие данных мониторинговых наблюдений на подобных объектах и анализа трансформации складированных техногенных пород в массиве.

На основании вышесказанного была определена цель работы: разработка инженерно-геологического обоснования совместного размещения отходов углеобогащения в отвалах для повышения их промышленной безопасности на примере центральной обогатительной фабрики «Печорская».

Были сформулированы следующие задачи исследования:

- Проведение анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации
- Выявление факторов формирования физико-механических свойств отходов углеобогащения.
- Лабораторные исследования вещественного и гранулометрического состава и физико-механических свойств отходов углеобогащения.
- Разработка рекомендаций по инженерно-геологическому обеспечению безопасного и технологически эффективного складирования отходов углеобогащения в отвалах на основе полученных результатов исследования.

ГЛАВА 2 ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

2.1 Общие представления о моделях формирования свойств дисперсных пород

Необходимость применения историко-геологического подхода для изучения свойств дисперсных пород и их инженерно-геологической оценки, заключающегося в определяющем значении генезиса исследуемых пород, была обоснована ещё в 1938 году М. М. Филатовым [109]. При этом под генезисом понимается не только седиментация и литификация, но и все дальнейшие преобразования материала. До постулирования данной теоретической позиции породы и их свойства рассматривались как постоянная система, характеризующаяся константами, не зависящими от физико-химических процессов. Вклад в развитие данного методологического подхода внесли, в первую очередь, Е. М. Сергеев, В. Д. Ломтадзе [69, 108]. В результате накопления информации по данному вопросу был сформулирован закон грунтоведения, приведённый в работах В. Т. Трофимова: «состав, строение, состояние и свойства грунтов определяются их генезисом, характером постгенетических процессов и современным пространственным положением» [115]. Этот закон объясняет не только многообразие пород, но и многообразие методик и методов их изучения, которые появляются вследствие многочисленных теоретических и практических задач, встающих перед исследователем. При этом в инженерной геологии распространён термин «генезис свойств», под которым понимается механизм формирования состава, строения, свойств и состояния [56]. Механизм этот имеет как сингенетический (происходящий одновременно с преобразованием осадка в породу), так и эпигенетический (в ходе последующих изменений породы) характер. Для техногенных пород, сформированных и перемещённых на новое место залегания, состав является сингенетическим параметром. Состояние, описываемое через влажность, степень уплотнения, степень выветривания и трещиноватость, а также физические и механические свойства дисперсных пород являются для них

же эпигенетическим показателем [115]. Таким образом, становится понятно, что состав, свойства, состояние пород формируются на протяжении всего периода существования техногенных пород, определяются как их генезисом, так и протекающими постгенетическими процессами. Кроме того, в случае техногенных отложений важным фактором, определяющим их характеристики, является время, а возраст пород, соответственно, является характеристикой, влияющей на их инженерно-геологические особенности: как правило, ранее сформировавшиеся породы имеют более высокие значения прочностных характеристик.

Вопрос об изучении и изменении свойств пород под влиянием инженерно-хозяйственной деятельности человека как один из основных в инженерной геологии был сформулирован ещё в 1970-х годах [69]. Преобразование и появление новых типов пород, связанное с деятельностью человека, относится к глобальному процессу литогенеза и было определено А. Е. Ферсманом как техногенез. Теорию техногенеза значительно развил Страхов Н. М., на работах которого основываются все последующие авторы, рассматривающие вопрос формирования техногенных отложений [31].

Чаповский Е. Г. разработал схему, отражающую стадии петрогенеза и влияние различных процессов, характерных для каждой из стадий, на свойства пород. В эту схему была включена инженерная деятельность человека как одна из стадий процесса формирования горных пород [126]. В работах автора также описаны факторы направленного изменения человеком свойств пород для улучшения их строительных свойств. Таким образом, антропогенная деятельность изменяет естественный цикл формирования осадочных горных пород (седиментогенез – диагенез – катагенез – выветривание), являясь частью природного процесса литогенеза.

Каздым А. А. определял техногенный литогенез как «новый, современный, негеологический, особый тип литогенеза, связанный исключительно (прямо или косвенно) с техногенной деятельностью человека, процесс формирования любых искусственных геологических образований». Результатом техногенеза автор называет формирование техногенных отложений, которые разделяет на формации

и фации в зависимости от генезиса. Отходы складирования пород в ходе горнодобывающей и горноперерабатывающей деятельности относятся к «геотехногенной» фации, при этом характер и интенсивность взаимодействия человека и литосферы зависит как от ряда природных факторов, так и характера и длительности техногенного воздействия, в результате чего формируется специфическая структура техногенных отложений.

В техногенезе так же, как и в природном литогенезе, выделяют этапы разрушения, перемещения и седиментации материала, однако помимо природных факторов и условий среды, определяющих протекание процесса, большую роль играют технологические факторы. Так, в частности, состав отходов углеобогащения зависит от петрохимического состава материнской породы. С другой стороны – состав зависит от применяемой на предприятии технологии обогащения. Изучение взаимосвязи природных и антропогенных факторов, определяющих процесс формирования состава и свойств техногенных пород, представленных отходами углеобогащения, положено в основу данной главы. На основании анализа геологической информации об объекте исследования, а также изучения природных условий и реализуемых технологических процессов на центральной обогатительной фабрике «Печорская» была оценена степень влияния различных факторов на формирование свойств исследуемых пород и разработана схема преобразования отходов углеобогащения, складировуемых селективным способом.

В инженерной геологии на теоретическом уровне для решения морфологических, ретроспективных и прогнозных задач распространен подход создания словесных и графических моделей объекта изучения. В. Т. Трофимов и Д. А. Спиридонов предложили использовать теоретико-графические модели формирования и изменения инженерно-геологических условий и дали определение модели формирования свойств материала как «абстрактной модели, описывающей тем или иным способом с той или иной степенью схематизации способ (процесс, механизм) становления данного показателя грунта» [117].

Под моделью понимают образ (изображение, схема, чертёж, график, план, карта) или образец объекта. Основной целью создания модели является объяснение способа формирования определённых свойств пород, а также прогнозирование их изменения в зависимости от воздействующих на них факторов. В наибольшей степени в инженерной геологии и грунтоведении используются логико-графические модели, как, например, модели просадочности различных типов грунтов, впервые предложенные Н. Я. Денисовым [117]. Значительно развил теорию о моделях, отражающих закономерности формирования свойств пород, В. Д. Ломтадзе: в качестве моделируемого процесса уже рассматривалось не конкретное свойство пород (как, например, просадочность), а сами породы, претерпевающие изменения на различных этапах литогенеза. На схемах В. Д. Ломтадзе отражён процесс литификации отложений, выделены стадии процесса и изменение свойств породы в зависимости от стадии [69]. Параметры модели и её содержание определяются двумя аспектами. Во-первых, количеством знаний об изучаемом объекте, известной геологической информацией о нем. И, во-вторых, ключевыми параметрами объекта, которые необходимо отразить в модели с наибольшей детальностью.

Наиболее распространённая логико-графическая модель, предложенная Н. Я. Денисовым и уточнённая путём физического моделирования В. Т. Трофимовым, отражает свойство недоуплотнённого пылеватого грунта к уплотнению и просадочности под природной нагрузкой (рисунок 2.1). Данная модель описывает гипотезу о различии процесса уплотнения водонасыщенных грунтов (кривая а-0) и маловлажных упрочнённых пород (кривая а-е).

В первом случае уплотнение эффективно и совпадает с кривой нормального уплотнения. Во втором случае, когда до достижения уплотнённого состояния происходит смена условий и дегидратация грунтов, уплотнение происходит значительно медленнее, а вследствие уменьшения нагрузки возникает недоуплотненность, ведущая к развитию просадочности. Соответственно, вторая модель показывает зависимость, проявляющуюся в увеличении степени недоуплотненности при уменьшении влажности пород [117].

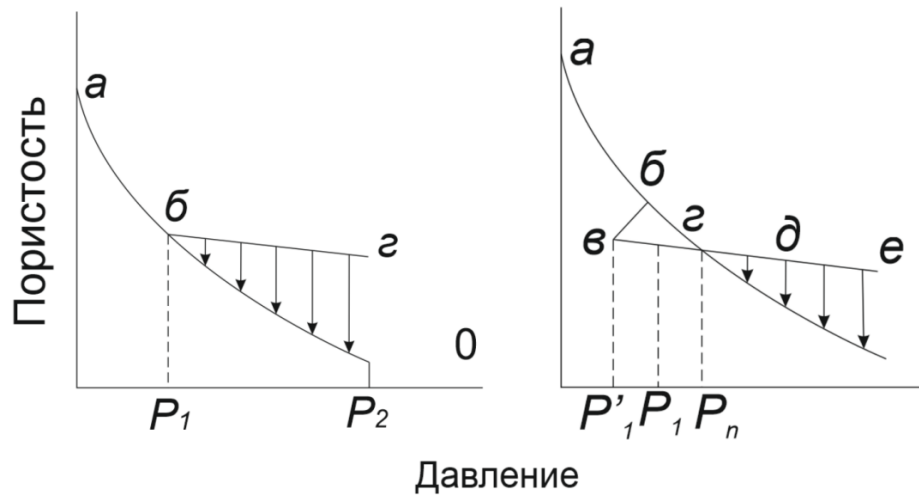


Рисунок 2.1 – Логико-графическая модель уплотнения и просадочности грунтов, разработанная Н.Я Денисовым (слева) и В.Т. Трофимовым (справа).

Величина просадочности показана стрелками [117]

Одним из ключевых свойств массива техногенных пород, который должна отражать логико-графическая модель, является дискретность этого массива. Даже состоящий из однородных по составу пород массив представляет собой сочетание элементарных слоёв, различающихся в вертикальном направлении по свойствам вследствие как различного нагружения, так и проявления гипергенных процессов, обуславливающих различное разрушение и разуплотнение в зависимости от глубины залегания [92].

Тем не менее, любая модель, теория или эксперимент – это упрощение в реальности происходящего процесса и приближенное его описание. К недостаткам логико-графических моделей относят отсутствие шкалы времени, а также значительную схематизацию и генерализацию процессов, а также наличие масштабного эффекта. Более того, на данный момент считается, что решение теоретических задач, связанных с изменением свойств пород, происходящих во времени без получения реальных данных, а путём построения модели, невозможно. Разработка теории и методики построения моделей поведения дисперсных пород, в принципе, находится на начальном этапе своего формирования. В. Т. Трофимов причислял к ключевым задачам в данной области разработку логико-графических моделей формирования свойств пород разных генетических типов применительно

к разным инженерно-геологическим структурам. Создание подобных моделей – составная часть решения общей проблемы формирования свойств скальных, дисперсных, мёрзлых и техногенных пород. Таким образом, основой для решения теоретических задач в целом и создания моделей подобного типа в частности являются реальные данные о закономерностях формирования и трансформации свойств исследуемых пород.

2.2 Инженерно-геологические условия, определяющие состав и свойства отходов углеобогащения

Первый этап технолитогенеза пород, формирующихся из отходов углеобогащения, связан с мобилизацией вещества, а именно угля и углевмещающих пород. При добыче угля мобилизация вещества происходит при разрушении материнской породы в ходе буровзрывных пород, выемки, перегрузов и последующих механизированных процессов обогащения. В результате на начальном этапе технолитогенеза формируется исходный состав техногенных отложений, который определяется природными особенностями вмещающих пород и углей. Обладая информацией о генезисе горных пород, можно сделать вывод о гранулометрическом, химико-минералогическом составе, а также характере связей [117]. Так, песчаные отложения морского, аллювиального и эолового генезиса, несмотря на их дисперсность, различаются по составу, степени окатанности и однородности, а также содержанию карбонатов. Таким образом, генетическая характеристика породы, дополненная петрографической характеристикой, позволяет сделать выводы о её инженерно-геологических особенностях. В связи с этим, обязательной частью исследования является изучение генезиса пород, т.е. геологического строения разрабатываемого месторождения и петрографических признаков материнской (по отношению к изучаемым техногенным отложениям) породы.

Объектом исследования являются техногенные породы, образующиеся в ходе переработки угля на Центральной обогатительной фабрике «Печорская» производственного объединения «Воркутауголь», которое входит в холдинг ПАО

«Северсталь». Предприятие осваивает угольные месторождения Воркутинского промышленного района, являющегося наиболее важной частью Печорского угленосного бассейна. Добыча угля ведётся на Воркутинском, Воргашорском и Юньягинском месторождениях (рисунок 2.2).

На фабрику поступает сырьё, добываемое в 4 шахтах (шахты «Заполярная», «Воркутинская», «Воргашорская», «Комсомольская») и на угольном разрезе «Юньягинский». Важно отметить, что Печорский угольный бассейн является самым крупным по запасам в европейской части России и самым крупным, находящимся в арктической зоне. Запасы перечисленных месторождений Воркутинского района оцениваются в 302,7 млн тонн [39].

Объёмы добычи угля на предприятии в последнее десятилетие составляют 6-9 млн т в год (таблица 2.1). В 2017 году наблюдалось заметное падение добычи, которое связано с аварией на шахте «Северная». Основным потребителем производимых углей является Череповецкий горно-металлургический комбинат.

Таблица 2.1 – Динамика добычи угля в Воркутинском районе, млн т [61]

Месторождение	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Воркутинское	4,98	4,74	5,59	3,76	3,11	3,48	3,77	3,36	
Воргашорское	3,17	2,55	2,71	2,12	2,11	2,27	2,88	3,15	
Юньягинское	0,57	0,63	0,52	0,53	0,49	0,53	0,44	0,22	
Всего	8,71	7,92	8,82	6,41	5,62	6,28	7,09	6,73	8,79
в т.ч. коксующегося	8,71	7,92	6,12	4,28	3,59	4,01	5,85	6,73	8,79

Геологическое строение и состав слагающих продуктивные толщи пород хорошо изучены и описаны во множестве источников [80, 99]. В геотектоническом отношении исследуемая территория находится в пределах Печорской синеклизы, представляющей собой крупную отрицательную структуру площадью около 300 тыс км², ограниченную складчатыми комплексами Урала и Тимана. Нижний структурный этаж синеклизы образуют палеозойские отложения, завершают который породы поздней перми и триаса, с которыми и связана промышленная угленосность. Угленосные породы залегают на глубине от нескольких метров до 200 м. Мощность угленосной толщи колеблется от 1900 до 5500 м.

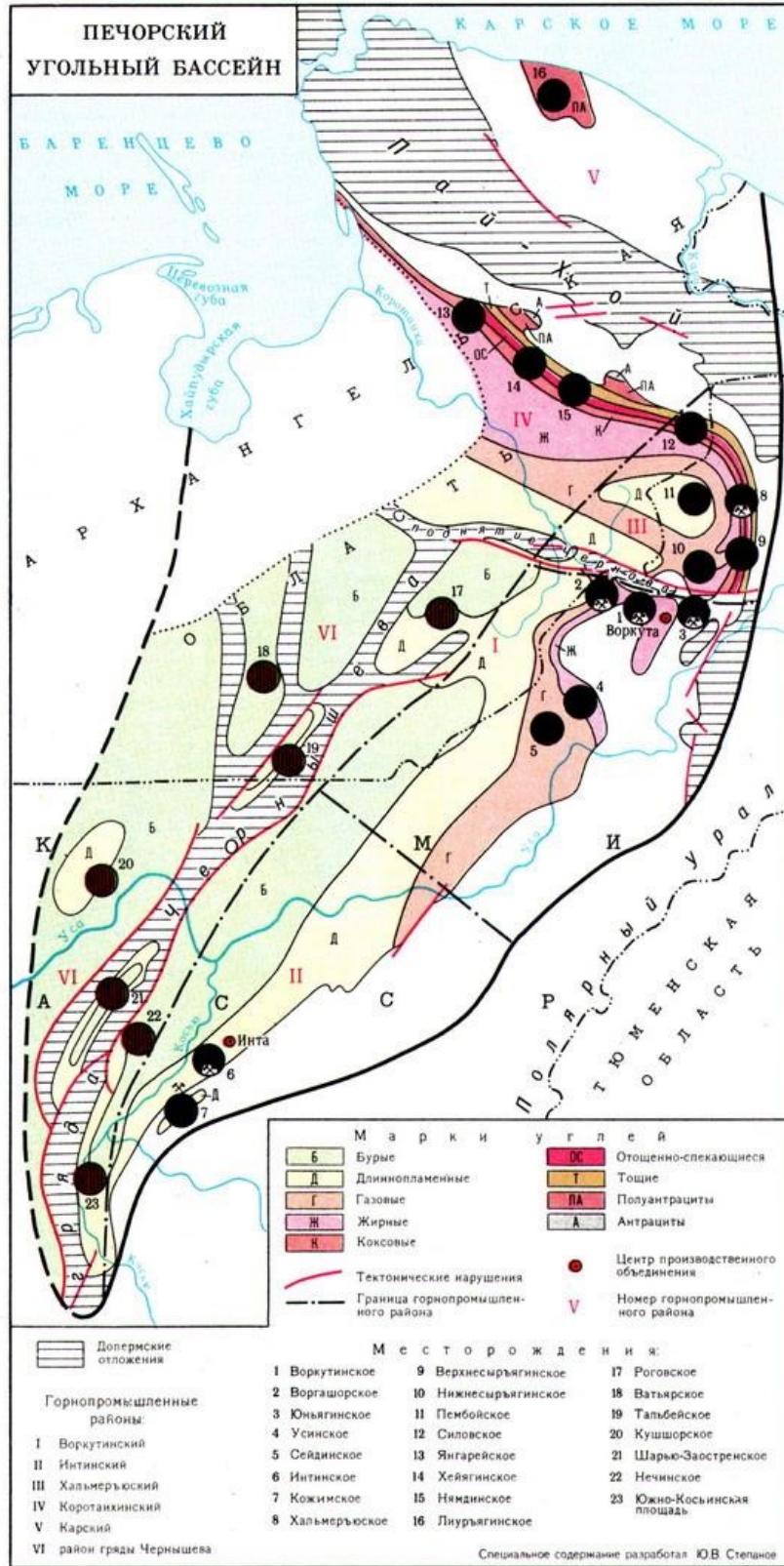


Рисунок 2.2 – Горнопромышленные районы и месторождения Печорского угольного бассейна [93]

Промышленная угленосность связана с отложениями пермского возраста. Угленосны воркутская (мощность 500-2400 м) и печорская (мощность 2000-3600

м) серии, относящиеся к верхней перми. Угленосная формация представлена циклами в составе терригенных прибрежно-морских отложений и пластов углей. Отчётливо выражено циклическое строение разрезов с мощностью циклов 10-30, реже 50 и более метров, где наблюдается ритмическое чередование полимиктовых песчаников, алевролитов, аргиллитов и угольных пластов. Средняя мощность угольного слоя 0,44-0,53 м. Коэффициенты угленосности – от 1,7 до 3,6 [80].

Залегающий выше структурный этаж сложен породами терригенной лагунно-морской формации юрско-мелового возраста. Формация мощностью 400-700 м сложена песчаниками с подчинёнными прослоями глин и алевролитов.

Верхний структурный этаж сложен морскими и континентальными осадками позднего плиоцена – голоцена, образующими 150-200-метровую толщу. Ледниковые, ледниково-морские и ледово-морские отложения средне-позднеплейстоценового возраста образуют пространственно единую толщу, сменяя друг друга с юга на север. Суммарная мощность отложений изменяется и достигает 100 м в зависимости от рельефа. Представлены отложения преимущественно глинистыми породами мореноподобного облика, содержащими мелкую гальку и гравий.

Следует отметить, что геологическое строение месторождений Воркутинского промышленного района однотипно – породы кровли и внутрипластовых слоёв представлены песчаниками, аргиллитами и алевролитами. По петрографическому составу перечисленные разности близки между собой и отличаются размерами зёрен. В целом же, среди всех вопросов, связанных с геологией месторождения, для изучения свойств отходов углеобогащения значение имеет только петрографический состав, и, соответственно, характеристика органического и минерального вещества углей и вмещающих пород.

Исходный углистый материал на 85% состоит из органической части угля, 12% составляют силикаты, представленные кварцем, встречающимся в виде окатанных или реже угловатых зёрен размером до 0,4 мм. Глинистое вещество – одна из преобладающих примесей в углях, составляющая 11%, состоит, в основном, из каолинита и иллита, дисперсно-рассеянными в органической массе

либо находящимися в свободном виде. Карбонаты составляют 2%, представлены кальцитом и доломитом, заполняющими эндотрещины в витрините или формирующимися в зерна размером от 0,02x0,05 мм до 0,3x0,6 мм. Также минеральная часть представлена сульфидами железа (пиритом) >1%, встречающимся в виде плёнок и дисперсно рассеянных зёрен (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Химический состав углевмещающих пород Печорского угольного бассейна [80]

Литотип	Минеральный состав $\frac{\text{от-до}}{\text{среднее}}$, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO
Аргиллиты	53,0 – 70,5	14,8 – 20,0	0,8 – 4,1	0,8 – 6,6	0,2 – 2,0	0,4 – 4,6	0,05 – 0,2
	57,5	18,5	2,0	3,1	1,2	1,8	0,06
Алевролиты	60 – 70	13 – 18	0,3 – 0,8	2,7 – 4,5	0,5 – 1,4	0,4 – 1,5	0,07 – 0,1
	58	16,1	0,6	3,3	1,0	1,0	0,1
Песчаники	53,0 – 80,9	8,0 – 17,4	1,4 – 1,8	0,7 – 3,7	1,6 – 6,5	0,9 – 4,0	0,1 – 0,2
	73,1	11,0	1,6	1,45	2,8	2,0	0,17
Литотип	Минеральный состав $\frac{\text{от-до}}{\text{среднее}}$, %						
	CO ₂	C _{орг}	S _{общ}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	
Аргиллиты	0,1 – 3,5	1,0 – 8,0	0 – 1,4	0,05 – 0,2	2,0 – 2,65	1,2 – 2,0	
	0,8	1,5	0,45	0,15	2,2	1,5	
Алевролиты	1,4 – 2,4	0,3 – 0,8	0,09 – 0,3	0,1 – 0,3	1,9 – 2,3	1,5 – 2,0	
	1,9	0,7	0,2	0,2	2,1	1,75	
Песчаники	4,5 – 8,5	0,1 – 0,2	0,07 – 0,15	0,1 – 0,3	1,9 – 2,5	1,5 – 2,2	
	5,0	0,15	0,10	0,2	2,2	1,9	

Аргиллиты – тёмно-серые, средней крепости, слоистые за счет растительных остатков по наслоениям до 1-3 мм, трещиноватые, трещины пустые, реже заполненные кальцитом.

Алевролиты – мелко- и крупнозернистые, обычно полосчатые с прослойками аргиллитов и песчаников мощностью до 10 мм, с редкими растительными остатками по наслоения, в большинстве массивные, плотные, средней и выше средней крепости с включениями линз и прослоев железисто-карбонатных конкреций, трещиноватые.

Песчаники – мелкозернистые, большей частью неслоистые, реже волнисто-слоистые за счёт растительного шлама, крепкие, иногда с прослойками алевролита.

Органическая масса угля почти на три четверти состоит из витринита, чуть более одной пятой составляет инертинит и 5% – семивитринит. Классификация угля по группам основана на содержании микрокомпонентов и петрографических признаках. В зависимости от содержания в углях полициклических соединений, являющихся трудноокисляемыми, и функциональных (быстроокисляющихся) групп определяется скорость и характер окисления углей, а также их гидрофильность и гидрофобность. При окислении на поверхности органических угольных частиц образуются угле-кислородные комплексы, в дальнейшем разрушающиеся и образующие кислородосодержащие группы. В менее устойчивых к химическому выветриванию углях уменьшается содержание водорода и кислорода, возрастает зольность и влажность, ухудшается коксующесть. По качеству добываемые угли представлены коксующимися углями марок 1Ж, 2Ж, ГЖО и в малой степени К. Угли подобной средней степени углефикации характеризуются наименьшим количеством функциональных групп на поверхности частиц, следовательно, стойки к окислению и неактивно поглощают кислород из воздуха.

Устойчивость к окислению влияет непосредственно и на способность к самовозгоранию, что является одной из ключевых характеристик промышленных углей [66, 139]. Несмотря на то, что в отвальной породной массе Печорской ЦОФ может содержаться до 20% остаточного угля и 12% сернистых соединений, характеризующие углесодержащие породы относятся к несклонным к самовозгоранию. Во-первых, вследствие их устойчивости к окислению, и, во-вторых, преобладания низких температур воздуха в районе расположения отвала и низких температур пород основания.

По содержанию серы целевые пласты относятся к малосернистым (менее 1,0%). По содержанию фосфора большей частью угли низко- среднефосфористые (0,01-0,03%). В результате обогащения на предприятии формируется концентрат и отходы обогащения. Согласно технологической схеме, зольность концентрата колеблется от 6,9 до 9,7%.

По соотношению классов крупности концентрата, он характеризуется значительной частью мелких классов, что свидетельствует о низкой крепости угля (0,4-0,6). Содержание крупного класса не превышает 70%. Хрупкость углей обусловлена их эндогенной трещиноватостью.

Путём проведения рентгенофазового анализа был определён минералогический состав поступающего с фабрики в отвалы материала. Отходы углеобогащения по своему химическому составу близки к химическому составу золы угольных пластов (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Вещественный состав углевмещающих пород Воркутинского месторождения [80]

Вещественный состав вмещающих пород	Содержание $\frac{\text{от-до}}{\text{среднее}}$, %		
	песчаник	алеврит	аргиллит
Кремниевые породы	$\frac{20 - 80}{50}$	$\frac{20 - 80}{50}$	-
Сланцы	$\frac{20 - 80}{50}$	$\frac{20 - 80}{50}$	-
Кварц	$\frac{20 - 80}{50}$	$\frac{20 - 80}{50}$	-
Полевой шпат	$\frac{20 - 80}{50}$	$\frac{20 - 80}{50}$	-
Органическое вещество	< 2	< 2	$\frac{1 - 4}{2}$
Карбонаты	$\frac{4 - 39}{15}$	$\frac{1 - 30}{12}$	$\frac{5 - 30}{19}$
Глинистое вещество	$\frac{3 - 13}{4}$	$\frac{3 - 18}{10}$	$\frac{50 - 85}{70}$

Таким образом, на первом этапе технолитогенеза, связанном с мобилизацией исходного материала, определяется химический состав отходов углеобогащения. Состав определяется, в первую очередь, природными особенностями углей и вмещающих пород. В отходах углеобогащения выделяется три группы компонентов: органическая и органо-минеральная части, определяющие активность протекания физико-химических процессов, и минеральная часть, свойства которой определяются содержанием породообразующих компонентов: кварца и полевого шпата в легкой фракции и гидрослюды в глинистой. В

отношении отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом, вода не присутствует в таком количестве, как в намывных отложениях и, следовательно, не играет первоочередную роль в формировании свойств и процессе фракционирования материала.

На последующей стадии технолитогенеза, связанной с диагенетическими преобразованиями, важную роль в формировании свойств пород в отвале играют процессы физико-химического уплотнения. Высокая активность частиц, возросшая вследствие измельчения породы, а также наличие жидкой фазы, обуславливают активную коагуляцию и агрегацию частиц. Система становится более устойчивой за счет разрушения крупных рыхлых элементов, их переформирования в более компактные элементы, выноса или привноса мелкой фракции, а также отжатия воды.

Помимо диагенетических процессов уплотнения, важную роль в формировании состава и свойств пород играют процессы выветривания (регрессивного литогенеза или гипергенеза). В результате проявления гипергенеза в массиве формируется кора выветривания, с инженерно-геологической точки зрения представляющая собой серию инженерно-геологических элементов. Соответственно, одинаковые по составу и строению породы приобретают отличные друг от друга характеристики. В то же время породы различного генезиса могут приобретать с течением времени общие особенности. Таким образом, условия внешней природной среды, климатические в первую очередь, могут объяснять некоторые особенности состава и свойств пород, несмотря на ведущую роль генезиса.

2.3 Техногенные факторы, определяющие состав и свойства отходов углеобогащения

В ходе исследования были выявлены и описаны техногенные факторы, оказывающие влияние на свойства складированного материала, являющимся отходами Печорской ЦОФ. В целом, схему обращения с отходами на данной фабрике можно считать общепринятой, поэтому и выполненный анализ можно

считать релевантным и для других объектов, на которых применяется схема совместного складирования отходов углеобогащения насыпным способом.

Добыча угля, обогащаемого на Печорской ЦОФ, происходит на четырёх шахтах и одном разрезе:

1. Шахта Заполярная и шахта Воркутинская, в настоящее время объединенные в комплекс шахта Заполярная-2. Глубина разработки 780 м. Добывается 1,8 млн тонн угля в год.

2. Шахта Комсомольская. Самая глубокая угольная шахта России – глубина разработки 1100 м.

3. Шахта Воргашорская. Самая производительная шахта в Европе, добывающая 4,2 млн т/год. Глубина 780 м.

Все шахты относятся к сверхкатегорийным по газу (метану), опасным по внезапным выбросам и горным ударам. В настоящее время добыча угля на шахтах ведётся системой разработки длинными столбами с управлением кровлей полным обрушением [48].

1. Разрез Юньягинский. Разрез начал работу в 2000 году и стал первым в мире и единственным предприятием, добывающим уголь открытым способом в условиях Заполярья, что считают сложными условиями для разработки. Объёмы добычи на Юньягинском разрезе – 0,6 млн т/год [68]. Климатические условия и наклонное, до крутого, залегание слоёв делают условия разработки данного месторождения сложными. Глубина горной выработки – 55 м, коэффициент вскрыши – 19 м³/т.

В случае, если материнская порода угольных пластов представлена крепкими сцементированными горными породами, добыча предполагает проведение буровзрывных работ. Характеристики самой породы являются определяющими для результатов буровзрывных работ. Тем не менее, важными факторами являются выбор геометрии взрыва, тип взрывчатого вещества и интервал задержки. Конечным результатом взрывных работ является разрушение массива на месте взрыва, размер фрагментов при этом варьируется от крупных валунов до

глинистых частиц. Этот процесс является первым этапом цикла добычи угля, который влияет на характеристики отходов углеобогащения.

В сравнительно более редких случаях для сильно выветрелых массивов буровзрывные работы могут не потребоваться. Это может быть экономически эффективно с точки зрения экономии затрат на буровзрывные работы, однако слабые, плохо уплотнённые породы, как правило, характеризуются меньшими показателями прочности, высокой проницаемостью, что менее благоприятно для разработки.

Выемка углевмещающих пород обычно происходит с помощью экскаватора или погрузчика, после которой материал транспортируется на обогатительную фабрику авто- или железнодорожным транспортом, где товарный уголь отделяется от нежелательных примесей. Таким образом, способы добычи и транспортировки угля важны при определении как физических свойств угольного концентрата, так и свойств отходов, образующихся как побочный продукт переработки.

Определяющее значение в формировании состава техногенных пород из отходов обогащения имеют ряд технологических операций, происходящих на обогатительной фабрике. Так, на фабрике происходит разделение углей по классам крупности для максимальной эффективности обогащения. Общераспространенная схема обогащения угля предусматривает обогащение в различных средах минимум трех классов. Традиционно процесс обогащения подразделяется на три основных этапа: подготовительный (операции дробления, грохочения и классификации), основной (сухое и мокрое обогащение) и заключительный (сушка продуктов и отходов обогащения) [13].

ЦОФ «Печорская» введена в эксплуатацию в 1994 году, с 2010 года происходила реконструкция производства, итогом которой стало увеличение проектной мощности переработки 9,5 млн т горной массы в год. На ПЦОФ происходит обогащение коксующихся углей марок 2Ж и ГЖО трудной и очень трудной обогатимости четырех классов:

– класс крупностью >13 мм обогащается в тяжелосредних колёсных сепараторах;

- класс крупностью 1,5-13 мм обогащается в тяжелосредних гидроциклонах;
- класс крупностью 0,2-1,5 мм обогащается в винтовых сепараторах;
- шлам (крупность <0,2 мм) обогащается методом флотации [86].

В результате всех технологических процессов образуется концентрат, промежуточные продукты и отходы.

На ЦОФ «Печорская» схема обогащения, в целом, традиционна и показана на рисунке 2.3. Порода поступает на фабрику железнодорожным транспортом. Дерево и большие куски видимой породы выбираются с помощью барабанного грохота, ферромагнитные предметы – с помощью металлодетекторов. Внутри обогатительной фабрики материал транспортируется с помощью конвейеров.

Порода поступает на грохот и молотковую дробилку. После классификации по крупности 13 мм надрешётный материал поступает в тяжелосредний сепаратор СКВП-20, где происходит разделение по плотности 1450 кг/м^3 , а подрешетный материал классифицируется по крупности 1,5 мм. После тяжелосреднего сепаратора концентрат и отходы поступают на грохот для обезвоживания и сброса магнетитовой суспензии, участвующей в тяжелосреднем обогащении и возвращаемой в цикл после регенерации. Класс крупностью $>1,5 \text{ мм}$ направляется в тяжелосредний трехпродуктовый гидроциклон ГТ-710/500, где разделение происходит по плотности 1515 кг/м^3 на первой ступени и 1870 кг/м^3 – на второй ступени. Класс крупностью $<1,5 \text{ мм}$ направляется в гидроциклон ГЦ-508 для классификации по крупности 0,2 мм. Далее класс $>0,2 \text{ мм}$ обогащается с помощью спиральных сепараторов [13]. Несмотря на высокую производительность и дешевизну, качество разделения в гидроциклонах варьируется от 40 до 80% в зависимости от качества угля и содержания примесей. Соответственно, для обогащения мелких фракций применяются другие методы.

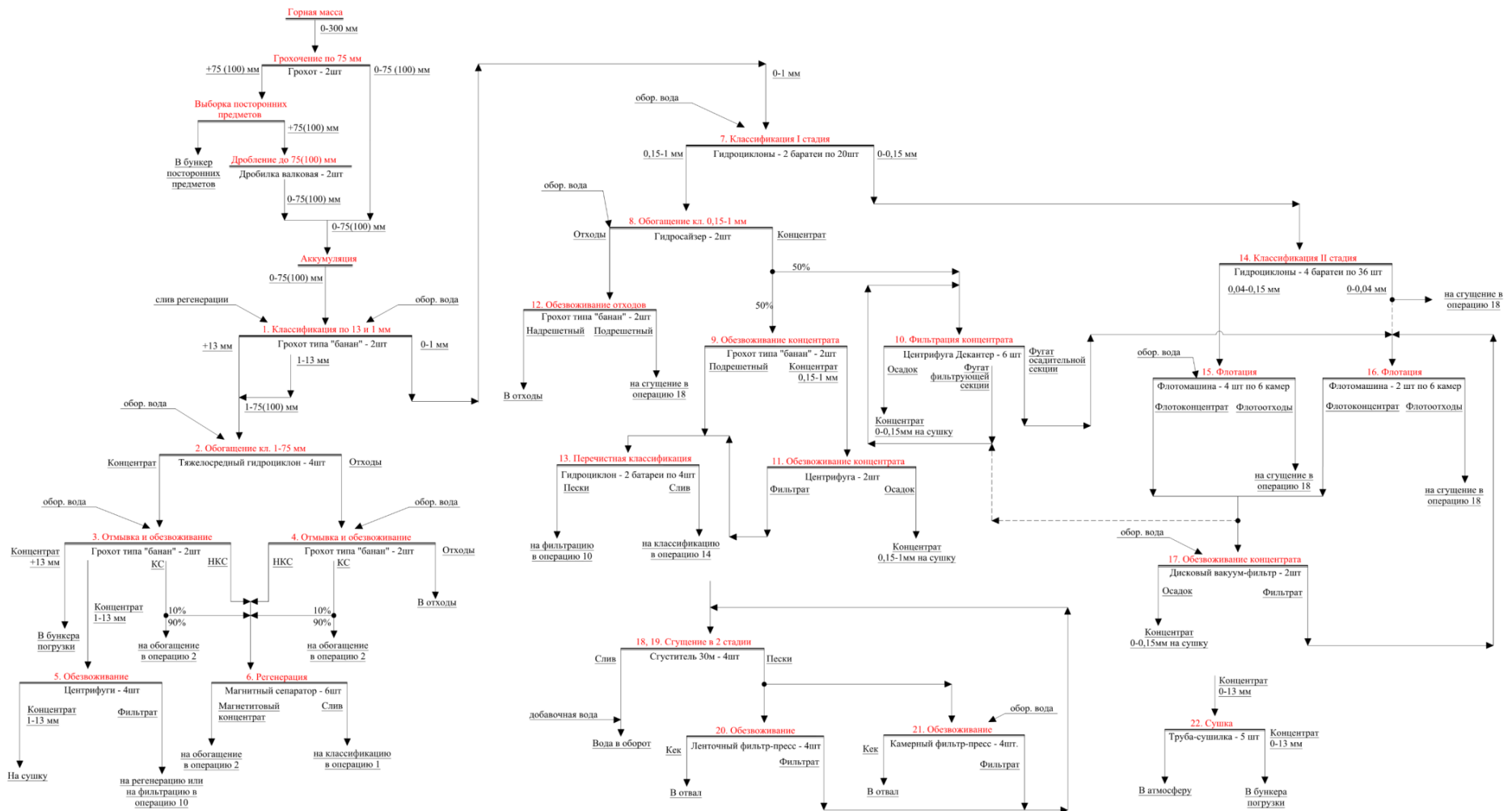


Рисунок 2.3 – Схема процесса обогащения, реализуемая на ЦОФ «Печорская»

В результате формируется три продукта: концентрат, промежуточный продукт и шлам. Каждый из продуктов поступает на дуговое сито для сброса магнетитовой суспензии, затем на грохот, промывку и обезвоживание. Концентрат после термической сушки отгружается с фабрики, промежуточный продукт используется для нужд фабрики, отходы транспортируются в отвал.

Шлам крупностью $<0,2$ мм обогащается флотационным методом. Слив гидроциклона, подрешётный продукт дугового сита, шламовые воды поступают на флотацию в виде суспензии. В аппарате кондиционирования пульпы шлам смешивается с флотационными реагентами (дизельным топливом и пенообразователем «Кэтгол») и поступает во флотационную машину. В результате флотации формируется концентрат и отходы.

Отходы содержат большое количество воды, которую разделяют на гравитационную, капиллярную, плёночную и гигроскопическую. Гравитационная вода, содержащаяся в суспензиях, удаляется под действием сил тяжести. Капиллярная вода во влажных (мокрых) отходах удаляется с помощью внешних сил, вода удерживается силами капиллярного давления. Пленочная вода, содержащаяся в воздушно-сухих отходах, удерживается за счет молекулярного притяжения. Гигроскопическая вода в сухих продуктах удерживается за счёт адсорбционных сил поверхности частиц.

Отходы флотации, первоначально являющиеся суспензией с содержанием твёрдого $15-25$ кг/м³, подвергаются сгущению до $300-400$ кг/м³, то есть до пастообразного состояния. Технология сгущения все чаще применяется на проектируемых и действующих фабриках, конструкции сгустителей подвергаются изменениям с целью стабилизировать процесс и достичь постоянства по плотности. Управление процессом происходит путём изменения скорости разгрузки продукта, добавления реагентов. В качестве реагентов широко применяют коагулянты-электролиты (щелочи, кислоты, соли железа и алюмокалиевые квасцы, являющиеся флокулянтами), реагенты-гидрофобизаторы (ксантогенаты, амины, олеаты, алкилсульфаты и другие реагенты-собиратели), синтетические флокулянты (полиакриламид).

Механическое обезвоживание происходит на гравитационном столе и в ленточном фильтр-прессе. После фильтр-пресса отход влажностью 35-45% транспортируется в отвал.

Таким образом, исходя из представленного выше описания схемы обогащения угля на ЦОФ «Печорская», можно сделать вывод о непосредственном участии в формировании отходов обогащения таких операций, как разделение горной массы и отходов по классам крупности, флотации, сгущения и сушки отходов.

Разделение по крупности происходит стадийно мокрым способом при участии воды. При этом углесодержащая порода, как правило, представлена сильно размокаемыми глинистыми породами – аргиллитами и алевролитами. В то же время песчаники и песчаные алевролиты характеризуются низкой размокаемостью. Отходы флотации, наиболее мелкий по крупности класс отходов, образуется в результате обогащения фракции $<0,2$ мм. Метод заключается в интенсивном смешивании твёрдой части с водой и реагентами, в результате чего суспензия обогащается пузырьками воздуха, которые создают границу раздела вода воздух. Несмачивающиеся водой частицы угля закрепляются на этой границе, образуя флотоконцентрат, удаляющийся из флотомшины как полезный компонент. Параметры флотационного процесса выбираются в зависимости от характеристик угля, петрографического состава минеральной части и её распределения в органической массе. Известно, что наилучшими показателями для флотации обладают блестящие не окисленные угли средней углефикации. Главным параметром является крупность частиц, поэтому во флотомашину подаются частицы угля крупностью $<0,2$ мм [96, 97].

Кроме того, неотъемлемой составляющей отходов флотации являются реагенты, применяемые для интенсификации процесса разделения фаз. Необходимыми являются реагенты, увеличивающие гидрофобность угля (собиратели), создающие устойчивую пену (пенообразователи) и подавляющие флотиремость определенных минералов (депрессоры). Выбор реагентов в промышленной флотации консервативен: как правило, используют кубовые

остатки производства бутиловых спиртов, продукты переработки нефти и др. При обработке флокулянтами происходит образование гелеобразных структур, которые трудно поддаются обезвоживанию [124].

Отмечается, что действие флокулянтов (полиакриламида) на минеральный и угольный компоненты различно: минеральные частицы, в первую очередь глинистые, с отрицательно заряженной поверхностью, флокулируют в большей степени, чем гидрофобные угольные [20]. В то же время частицы размером более 0,05 мм не образуют флокулы [63]. Флокулы считаются неустойчивыми соединениями, так как при интенсивном перемешивании осадка или изменении температуры наблюдается их разрушение, в результате чего наиболее крупные агрегаты разрушаются. Таким образом, после добавления к обогащаемому материалу флокулянтов материал, поступающий в отвалы, состоит из агрегатов первичной структуры (минеральные, органоминеральные и угольные частицы) и лишь отдельных прочных агрегатов, образуемых с помощью флокулянтов.

Таким образом, отходы обогатительной фабрики представлены крупной и мелкой породой, отходами флотации после фильтр-прессового отделения и шлаком с бункеров сушки. Отходы обогащения вывозятся на породный отвал. Транспортирование отходов до отвала, их отсыпка и распределение внутри сооружения составляют второй этап технолитогенеза, определяющее значение имеют технология складирования, параметры возводимого сооружения, способов отсыпки и интенсивность нагружения.

В углеобогатительной отрасли применяют различные техники складирования отходов, различающихся по степени их смешивания разного типа отходов (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Сравнение степени однородности складываемых отходов углеобогащения при использовании различных техник складирования

Совместное складирование. Однородная смесь тонкодисперсного и крупнообломочного материала	<p>Гомогенная смесь</p>  <p>Раздельное складирование</p>
Складирование намывным способом с помощью выпуска пульпы. Хорошо смешанный с некоторой сегрегацией частиц материал	
Совместное складирование. Смешивание происходит во время отсыпки путем попеременной отгрузки материалов	
Ярусное складирование отходов флотации на крупнообломочных отложениях, создание секций. Ограниченное смешивание тонкодисперсного и крупнообломочного материала	
Крупнообломочный материал добавляется к складированным намывным способом отходам	
Крупнообломочные и тонкодисперсные отходы размещаются в пределах одной территории	
Раздельное размещение: крупнообломочный материал – в отвалах, отходы флотации – в намывных хвостохранилищах	

В проектируемом отвале ЦОФ «Печорская» предусматривается разместить 36 860,7 тыс. т отходов, из которых 28 929,3 тыс. т крупнообломочный материал, 7 742,2 тыс. т отходов флотации и 189,3 тыс. т шлака. Площадь отвала составляет 142 га [39]. Выбранная технология складирования отходов предусматривает раздельное складирование крупнообломочных и тонкодисперсных отходов путём формирования секций и заполнение секций отходов флотации (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4.a – ЦОФ Печорская и земельный отвод, занимаемый отвалами



Рисунок 2.4.б – Формирование и заполнение секций второго яруса отвала

Формирование секции сводится к отсыпке по периметру будущей секции транспортного вала высотой, соответствующей высоте яруса (до 30 м на первом ярусе и 15 м на втором ярусе). Транспортный вал – насыпь из крупнообломочных отходов, которая ограничивает по периметру формируемые секции для размещения отходов флотации и обеспечивает транспортную связь между секциями. Ширина

транспортного вала принимается – 35 м. Для обеспечения устойчивости по периметру первого яруса отвала ширина транспортного вала принимается 50 м. Угол откоса породы при формировании транспортных валов принят соответствующим естественному – 35°. Ширина бермы безопасности между ярусами отвала составляет 30 м.

На начальном этапе заполнение секции отходами флотации осуществляется с поверхности транспортных валов. После заполнения секции её поверхность пересыпается слоем породы мощностью 2 м, «запечатывая» ёмкость сверху, и уплотняется бульдозером и транспортными средствами. По мере заполнения ёмкости и пересыпкой её поверхности породой, фронт отвальных работ смещается к центру секции.

По контуру секции, в которую выгружаются отходы флотации, формируется предохранительный вал (бровка) высотой не менее 0,5 диаметра колеса автосамосвала наибольшей грузоподъёмности. Заполнение пространства секции производится путём выгрузки отходов под откос внутрь ёмкости.

Таким образом, технология формирования породного отвала ЦОФ «Печорская» предусматривает следующие этапы:

- формирование из отходов грохочения транспортных валов для ограничения по периметру секций, в которых размещают отходы флотации (рисунок 2.5.а), а также предохранительных валов (рисунок 2.5.б);
- заполнение секции отходами грохочения и флотации путём разгрузки автосамосвалов под откос (рисунок 2.5.в);
- пересыпка заполненной секции слоем шлака мощностью 2 м и уплотнение бульдозером (рисунок 2.5.г).

Высота первого яруса 30 м, второго - 15 м (рисунок 2.6).

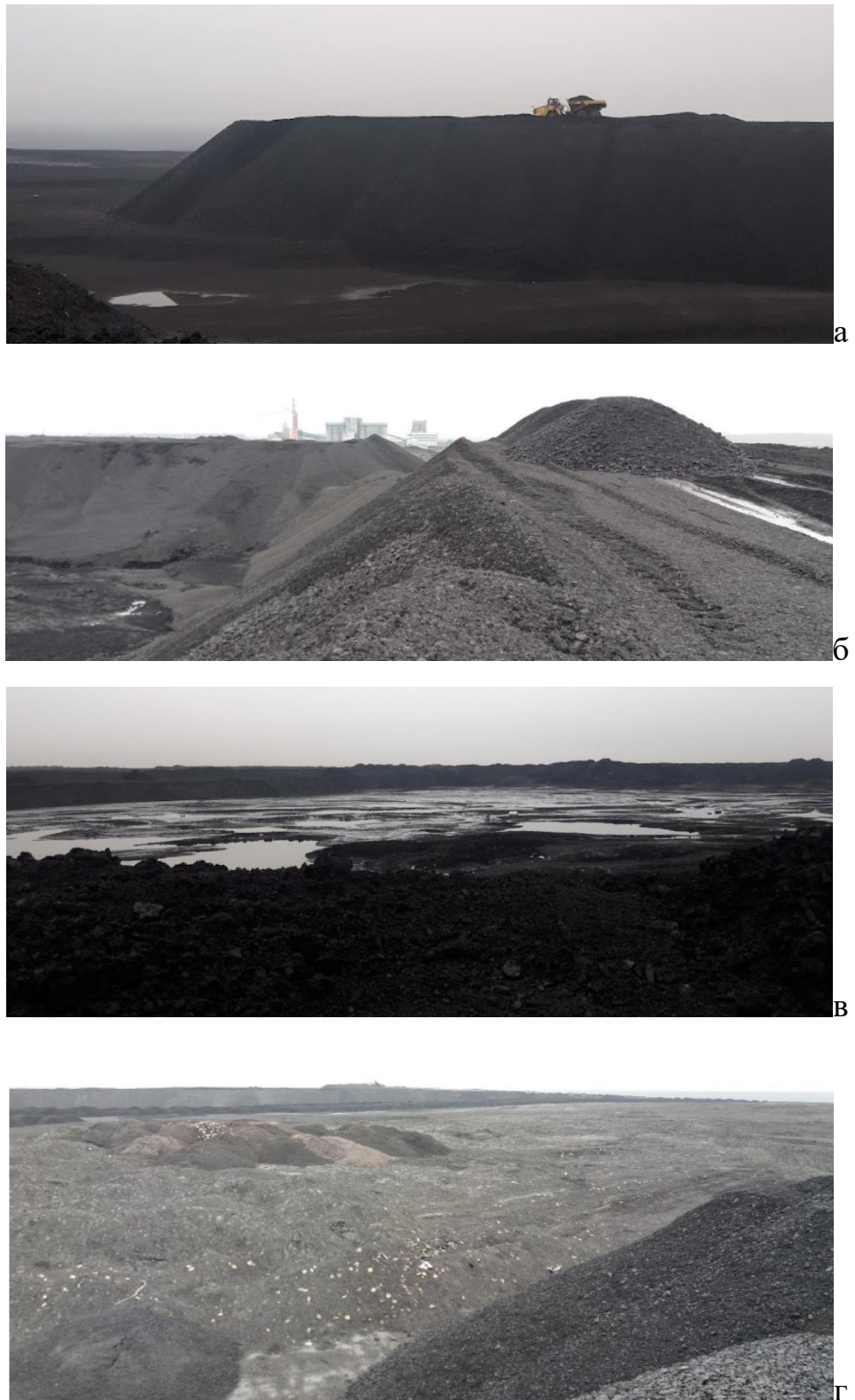


Рисунок 2.5 – Процесс складирования отходов углеобогащения а – формирование транспортного вала; б – формирование секций с предохранительным валом; в – заполненная отходами флотации секция; г – заполненная отходами флотации секция и пересыпанная породным слоем

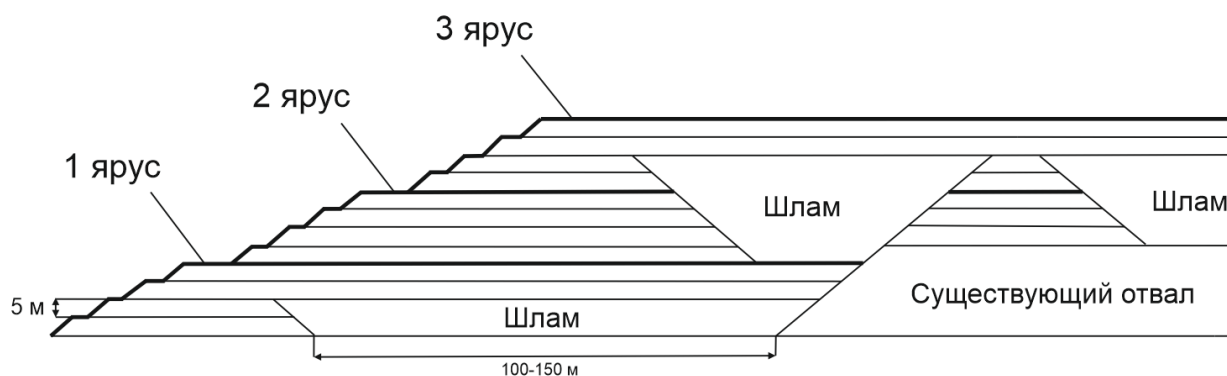


Рисунок 2.6 – Схема отвалообразования отходов углеобогащения (поперечный разрез)

Материал транспортируется в отвалы с помощью самосвалов, которые выгружают его путём опрокидывания кузова, формируя транспортные валы и предохранительные бровки.

Массивы, сложенные техногенными породами, неоднородны в отношении распределения частиц по размерам. Когда материал перемещается в отвал, может наблюдаться фракционирование по склону, где более крупные частицы располагаются ближе к подошве слоя. Это явление в отвалах угольных предприятий хорошо описано в работах Ричардса [169], Симмонса и Макмануса [172]. Основываясь на результатах испытаний, Николс предполагает, что метод отвалообразования оказывает наибольшее влияние на фракционирование, а выгрузка путём опрокидывания кузова приводит к наибольшему фракционированию, при этом длина склона и распределение частиц по размерам мало влияют на разделение по фракциям [163]. Считается, однако, что фракционирование более выражено, если высота отвалов составляет 20 м и более. Тем не менее в работе Васильевой А. Д. доказывалось, что на распределение частиц по крупности в отвале большее влияние оказывает разрушение обломков, возникающее с увеличением нагрузки от вышележащих пород, что приводит к изменению гранулометрического состава и фракционированию по вертикали [24].

В дополнение к фракционированию, неоднородность в теле отвала также обуславливается вариативностью характеристик складированных пород. Стратификация наблюдается при исследовании «старых отвалов», где

прослеживаются слои от 0,1 до 2 м толщиной с заметными различиями в размере зёрен, текстуре, цвете и составе [137]. Также были описаны случаи, когда прослой тонкозернистого материала служили поверхностью ослабления внутри массива, в результате чего формировались поверхности скольжения и развивалось избыточное поровое давление [144].

Исследования, основанные на данных статического зондирования, показывают, что для отвалов, даже сложенных техногенными породами, относящихся к одному инженерно-геологическому элементу, свойственна неоднородность, выражающаяся, прежде всего, в распределении прочностных свойств [92]. Кроме того, наблюдается разница гранулометрического состава свежих техногенных пород и пород, складированных в отвал ранее.

Основным фактором изменения свойств складированных отходов является гравитационное давление, увеличивающееся в процессе отсыпки и замещающее физико-химическое уплотнение. Под воздействием вышележащих пород происходит отжатие воды, уменьшение пористости, породы, соответственно, приобретают более плотное сложение. Тем не менее, в породах не образуется прочных цементационных связей, что свойственно для пород естественного сложения.

Под влиянием вышележащих отложений в теле массива, сложенного отходами углеобогащения, создаются условия для формирования избыточного порового давления, которое препятствует уплотнению отложений и снижает скорость диагенетических преобразований. Основными факторами для его возникновения являются интенсивность нагружения, компрессионно-фильтрационные условия среды, параметры консолидации.

2.4 Схема техногенеза отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом, на примере ПЦОФ

В отношении отходов углеобогащения, представленных намывными отложениями гидроотвалов и хвостохранилищ, закономерности технолитогенеза были рассмотрены в работах Н. А. Кутеповой. Автором была определена роль и

взаимосвязь природных и технологических факторов на различных этапах формирования техногенных пород из отходов углеобогащения. Так, для формирования намывных пород наибольшее значение имеет процесс фракционирования материала, происходящего при распределении пульпы по карте намыва. Кроме того, на стадии седиментогенеза проявлены процессы коагуляции дисперсных частиц, агрегирования и других процессов, протекающих при участии жидкой фазы [65].

Необходимость отдельного изучения процесса техногенеза «сухих» пород обусловлена спецификой материалов, слагающих намывные и насыпные сооружения, особенно проявляющейся на ранних стадиях техногенеза. Анализ работ Н. М. Страхова, А. М. Гальперина, В. Т. Трофимова, Н. А. Кутеповой и др. позволил разработать схему преобразования отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом. Несмотря на их схожесть в технологических приёмах и составе с намывными отложениями, схема технолитогенеза исследуемых материалов обладает своей спецификой. В связи с этим были рассмотрены этапы преобразования отходов углеобогащения Печорской центральной обогатительной фабрики и описаны основные факторы диагенетических преобразований техногенных отложений данного типа.

В техногенезе отходов углеобогащения, образующихся на фабрике, так же, как и в природном литогенезе осадочных пород, выделяется три этапа: разрушение исходного материала, перемещение материала и преобразование материала. Протекание каждого этапа определяют природные и антропогенные факторы, которые будут рассмотрены далее. На каждом этапе под воздействием физико-химических процессов изменяются состояние и свойства формирующихся техногенных пород.

Первый этап техногенеза заключается в мобилизации исходного материала, а именно угля и углевмещающих пород, в результате чего определяется исходный минералогический состав отходов. Дезинтеграция вещества также происходит на обогатительной фабрике при дроблении, грохочении, флотационном и гравитационном обогащении и сушке. Также определяется начальная влажность

материала, который в дальнейшем поступает в отвал. Характеристика органического вещества углей и минеральных примесей, а также петрографический состав вмещающих пород, определяют не только выбор наиболее эффективных технологических процессов добычи и обогащения, но и свойства и поведение формирующихся из отходов обогащения техногенных пород.

В отвал материал попадает в деструктурированном виде, с большим содержанием глинистой фракции и относительно высокой влажности. Второй этап технолитогенеза связан с транспортировкой отходов в отвал и их отсыпкой. На данном этапе определяющим параметром для формирования состава и свойств пород является выбор технологии складирования, конструктивные особенности отвала и интенсивность нагружения. В отличие от намывных отходов обогащения, складированных в сильно гидратированном виде (соотношение твёрдой и жидкой компоненты 1 к 10), процесс минерального фракционирования не проявлен в той же степени в отвалах «сухих» отходов углеобогащения, как и процесс седиментогенеза с образованием первичных коагуляционных структур.

Третий этап связан с диагенетическими преобразованиями, то есть уплотнением и консолидацией, происходящими вследствие ряда физико-химических процессов в теле отвала. После отсыпки происходит структурная перестройка отложений с разрушением крупных структурных элементов и агрегированием более плотных, изменение влажности, окисление углей и т.д. Конечной стадией как природного диагенеза, так и техногенеза, является литификация вещества, однако образование ближних цементационных связей происходит в течение несоизмеримо большего временного периода, чем рассматриваемый.

Изложенная последовательность формирования состава представлена в виде схемы техногенеза отходов углеобогащения (рисунок 2.7). Из схемы очевидно, что протекание процессов техногенеза определяется взаимосвязанными природным и антропогенным процессами, изучение которых позволяет понять особенности свойств и поведения изучаемых техногенных пород.

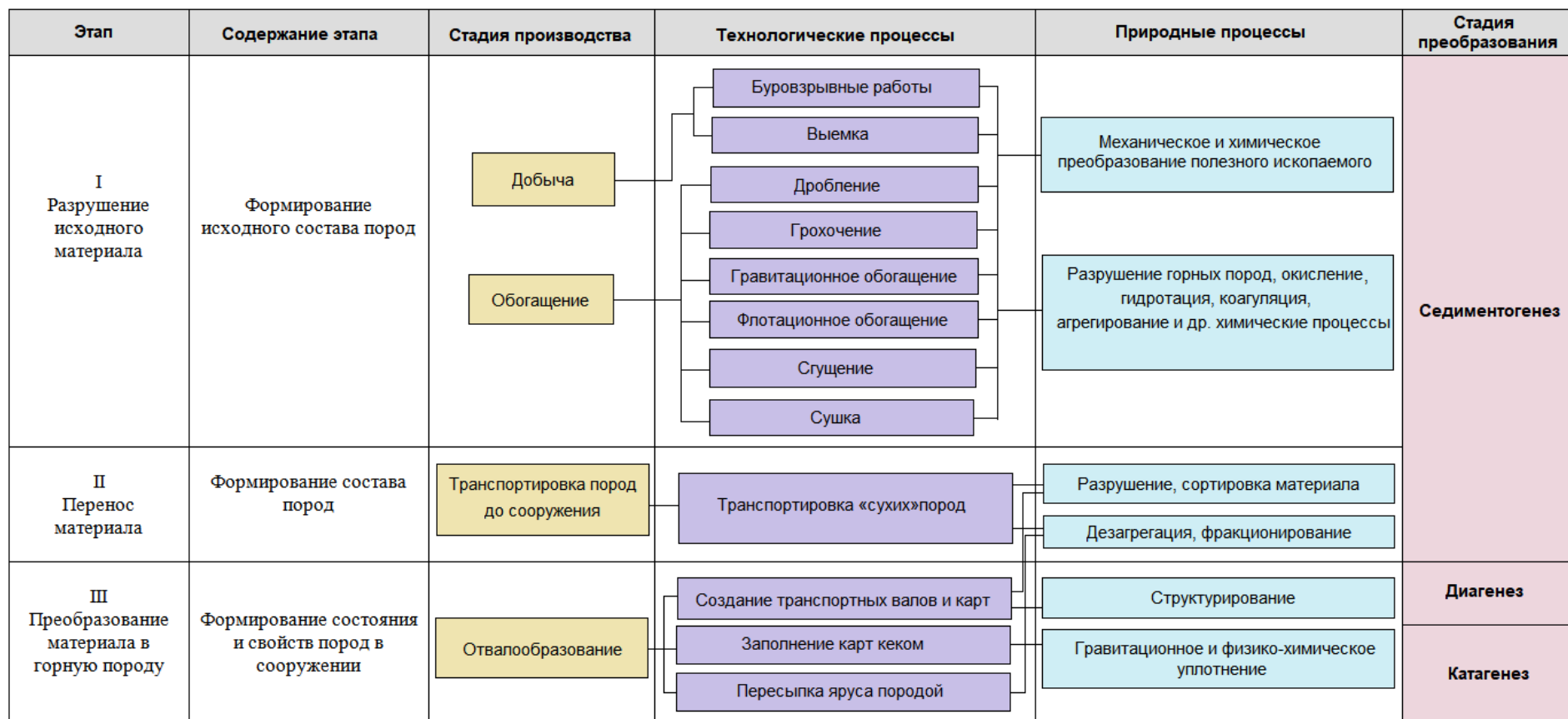


Рисунок 2.7 – Схема техногенеза отходов углеобогащения Печорской ЦОФ, складированных «сухим» способом

2.5 Выводы к главе 2

1. В тексте главы обосновано, что эффективным методом решения теоретических задач в области инженерной геологии является создание словесных и графических моделей и схем, объясняющих способ формирования определённых свойств дисперсных горных пород, а также прогнозирующих их изменения в зависимости от воздействующих на породы факторы.

2. Были выявлены и описаны природные и антропогенные процессы, влияющие на процесс формирования техногенных пород из отходов углеобогащения, на основании чего была разработана схема техногенеза отходов углеобогащения, складированных «сухим» способом.

3. Разработанная схема техногенеза отходов углеобогащения позволила определить и исследовать факторы влияния на процесс формирования техногенных пород, формирующихся из отходов углеобогащения, главными из которых являются начальный химический и минералогический состав обогащаемой породы, применяемая схема обогащения, конструктивные особенности отвала, а также время.

4. Установлено, что несмотря на отличия в начальных составах и характеристиках отходов различных предприятий, техногенные породы обладают рядом общих признаков и являются закономерно сформированными, что отвечает теории техногенеза. Следовательно, процесс технолитогенеза рассматривается как тип природного литогенеза, в результате которого формируются осадочные породы из мобилизованного, перемещённого и изменённого материала.

5. Было обосновано, что на этапе преобразований, происходящих до складирования отходов в отвал, происходит формирование состава и начальных свойств, которые, претерпевают изменения после складирования пород в отвал, где основным фактором преобразований материала, оказывающим влияние на их прочностные свойства, является давление, под действием которого изменяется их структура, пористость и влажность.

ГЛАВА 3 ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ ЦОФ «ПЕЧОРСКАЯ»

Для инженерно-геологического обоснования размещения отходов углеобогащения в отвалах требуется определённый объём исследований их состава и свойств. Основу методики составляют следующие этапы: выбор объекта исследования и метода пробоотбора, формирование перечня определяемых показателей и выбор способов их определения. В целом, комплексное исследование складированных отходов с целью обеспечения эффективности складирования подразумевает определение гранулометрического состава, зольности, влажности, литологического и минерального состава, а также комплекса прочностных и деформационных характеристик. Химико-технологические свойства отходов при этом не рассматриваются.

В отечественной практике накоплен обширный опыт по исследованию свойств крупнообломочных пород и их смесей, расположенных в гидротехнических сооружениях [103, 88, 134]. Однако в настоящее время активно развивается метод «сухого» совместного складирования, что объясняет необходимость проведения лабораторных испытаний исследуемых отходов углеобогащения.

Поведение дисперсных горных пород определяется множеством факторов, в том числе составом и свойствами самих пород. Основные физико-химические свойства пород, которые необходимо учитывать, описаны далее. Пластичность (деформирование без нарушения сплошности) определяется двумя показателями (влажность на границе раскатывания W_p и W_L) текучести, которые зависят от гранулометрического и минералогического состава. Набухание (увеличение объёма при смачивании) также зависит от гранулометрического и в большей степени минералогического состава, состава обменных катионов, влажности. Присутствие в составе глинистых минералов с подвижной кристаллической решёткой значительно увеличивает величину набухания. Усадка (уменьшение объёма при удалении воды), в результате которой происходит уплотнение породы

и увеличение сопротивления деформациям, зависит от дисперсности, минералогического состава, структуры, текстуры и влажности. Набухание и усадка проявляются в присутствии минералов группы монтмориллонита.

Из-за специфических условий формирования техногенных пород, образованных из отходов углеобогащения, помимо определения гранулометрического и минерального состава проведение испытаний по определению свойств материала часто осложнено. Гранулометрический состав и прочность породы могут отличаться в зависимости от параметров материнской породы и технологии складирования. В настоящее время обращение с отходами углеобогащения и их вторичное использование ограничено отсутствием методики расчёта их прочностных и деформационных характеристик. Для выполнения этих расчётов необходимо иметь надёжные данные по показателям прочности и деформируемости пород, слагающих массив.

На Печорской ЦОФ и отвале, в который поступает материал с фабрики, был отобран материал для исследования общей массой 0,5 т. Несмотря на то, что отходы углеобогащения отличаются наибольшим постоянством свойств в сравнении с шахтными и вскрышными отходами, характеристики отгружаемого с фабрики материала в разные периоды времени могут отличаться. В связи с этим для обеспечения представительности проб пробоотбор производился в течение трёх суток (трёх смен), интервал опробования составлял 1-1,5 часа. На фабрике пробы отбирались с отгружаемых породных бункеров сушки перед их транспортировкой в отвал. Для опробования отвалов применялся метод порционного опробования. Для этого были определены минимальная масса пробы и число точек отбора. Для оценки первого параметра целесообразно ориентироваться на рекомендации по отбору проб на ситовой анализ. Минимальная масса порции определяется по формуле (3.1):

$$G = 0,2D_{max} \quad (3.1)$$

где D_{max} – размер наибольшего фрагмента опробываемого материала. Количество точек отбора варьируется от 3 до 5 в зависимости от площади

опробываемой поверхности. Опробование глыбового и крупновалунного материала не происходило.

3.1 Изучение минералогического состава отходов углеобогащения

В соответствии с рекомендациями по проектированию шламонакопителей и хвостохранилищ, при проектировании и строительстве подобных инженерных сооружений необходимо обладать результатами исследований гранулометрического состава, плотности и пористости техногенных пород, а также значениями их прочностных и деформационных характеристик. Параметры использования отходов углеобогащения как вторичного сырья определяются на основании их зольности, влажности, содержании органического углерода, серы, азота, макро- и микроэлементов. В связи с этим в источниках можно найти опубликованные результаты исследований различных типов отходов обогатительных предприятий [25, 122].

Относительно отходов данного типа описаны трудности в определении их вещественного состава, связанного с наличием сростков вещества - прочно сцепленных минеральных и органических частиц. Измельчение может не дать результаты вследствие агрегации частиц в жидкой фазе [133]. Кроме того, оценка количества органической части в отходах не всегда корректна и может вызывать трудность в связи с протекающими процессами окисления в отходах, отсутствием методики измерения концентрации органики без изменения фазового состава и неточностью аналитических формул. Для материала, содержащего большое количество глинистых минералов, используют рентгенофазовый анализ, инфракрасную и электронную спектроскопию и петрографический анализ.

Для проведения анализа с целью выявления вещественного (минерального) состава в лаборатории минералогических методов анализа были проанализированы пробы крупнообломочных отходов грохочения и отходов флотации. Отходы флотации представлены влажной, пластичной, тонкозернистой массой чёрного цвета. Исследованные пробы высушивались и отмучивались в дистиллированной воде для извлечения фракции менее 0,002 мм. Изготавливались как

дезориентированный валовый препарат пробы, так и ориентированный препарат из фракции менее 0,002 мм.

Съёмка дезориентированного и ориентированного препаратов пробы производилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6, оснащённом рентгеновской трубкой с медным анодом, с длиной волны $\lambda \approx 1,540598 \text{ \AA}$, при напряжении 35 кВ и силе тока 25 мА.

Так как при содержании большого количества органического вещества в образце (т. е. аморфной фазы) можно получить нечёткую дифрактограмму, для диагностики групп монтмориллонита, иллита и смешанно-слоистых минералов и выявления набухающей и ненабухающей составляющей ориентированный препарат пробы насыщался этиленгликолем.

Обработка дифрактограмм велась при помощи программного пакета PDWin-4 и международной картотеки JCPDS. Количественное определение фаз в дезориентированном препарате производилось «Методом Ритвельда», а полуколичественное определение глинистых минералов производилось по методике Ю.С. Дьяконова, согласно методическим рекомендациям [73]. Дифрактограммы исследования приведены на рисунках 3.1, 3.2, 3.3 и в таблицах 3.1, 3.2, 3.3.

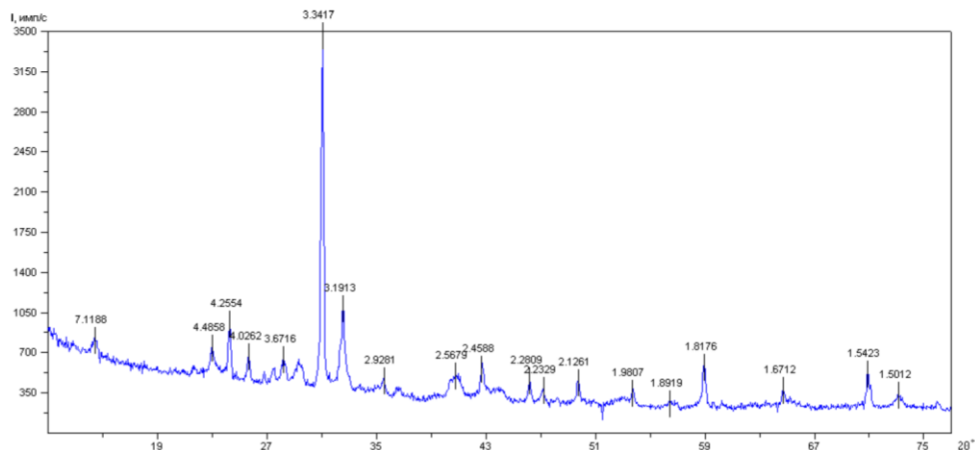


Рисунок 3.1 – Дифрактограмма дезориентированного (валового) препарата пробы крупнообломочных отходов грохочения [84]

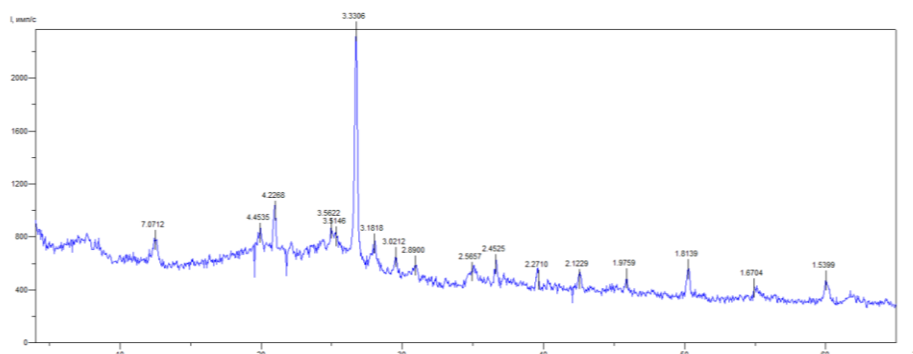


Рисунок 3.2 – Дифрактограмма дезориентированного (валового) препарата
пробы отходов флотации

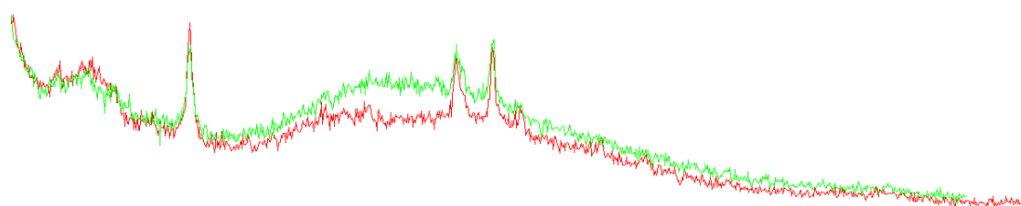


Рисунок 3.3 – Дифрактограммы ориентированного препарата глинистой фракции
менее 0.002 мм пробы отходов флотации (красная – воздушно-сухой препарат;
зелёная – препарат, насыщенный этиленгликолем)

Таблица 3.1 – Результаты количественного рентгенофазового анализа валовой
пробы крупнообломочных отходов грохочения [84]

Минерал	Содержание (масс.%)
Кварц	58±3%
Иллит	16±4%
Хлорит	9±4%
Альбит	17±3%

Таблица 3.2 – Результаты количественного рентгенофазового анализа валовой
пробы отходов флотации

Минерал	Содержание (масс.%)
Кварц	27±3%
Полевой шпат	19±3%
Иллит	38±4%
Кальцит	5±2%
Доломит	4±2%
Каолинит	3±2%
Хлорит	5±3%

Таблица 3.3 – Результаты полуколичественного рентгенофазового анализа глинистой фракции менее 0,002 мм пробы отходов флотации по методике Ю. С. Дьяконова

Минерал	Содержание (отн.%)
Иллит	56%
Каолинит	22%
Хлорит	20%
Рентгеноаморфная фаза	10%
Кварц	≈2%

Минералогический анализ отходов углеобогащения свидетельствует, что в них преобладают глинистые минералы, представленные иллитом, каолинитом и хлоритом. Из обладающих способностью к набуханию минералов в образцах присутствует только хлорит в незначительном количестве, на основании чего отходы флотации можно охарактеризовать как отложения, несклонные к набуханию. Для крупных фракций преобладающими минералами в составе являются кварц и полевой шпат. Незначительную часть составляют карбонаты. Они входят в карбонатные породы, цемент алевролитов и песчаников. Рентгеноаморфная фаза может быть классифицирована как органоминеральные сростки и чистый уголь, присутствующий в небогатимых отходах. В целом, свойства отходов во многом определяются содержанием глинистых минералов. Изучаемые отходы относятся к низкоглинистым, что соответствует средней степени метаморфизации углей месторождения.

Таким образом, исследуемые углеотходы содержат в своём составе минералы, подверженные вторичным изменениям. После складирования в отвал под действием факторов химического и физического выветривания их состав может существенно измениться, а степень изменений зависит от минералого-петрографического состава, условий и времени складирования в сооружении.

3.2 Петрографические исследования отходов флотации

С помощью прямого микроскопа ВХ-51 Olympus было получено оптическое изображение отходов флотации, поступающего с фабрики в отвалы (рисунок 3.4.а).

Анализ образца свидетельствует о высоком содержании неокатанных остроугольных частиц. Среди вещественных компонентов преобладающей является минеральная часть. Очевидна также полиминеральность вещественной части (рисунок 3.4.б). Предел крупности – 0,1 мм. Специфическая форма частиц обуславливает слипание и агрегирование тонкодисперсных частиц (рисунок 3.4.в).

Определить под микроскопом содержание органического вещества в чистом виде затруднительно из-за его высокой дисперсности и малого содержания, так как большая часть органического вещества заключена в органо-минеральные сростки. Минеральных частиц без примесей органического вещества содержится около 70%, оставшуюся часть составляют органо-минеральные сростки и в меньшей степени (3-12%) органическое вещество.

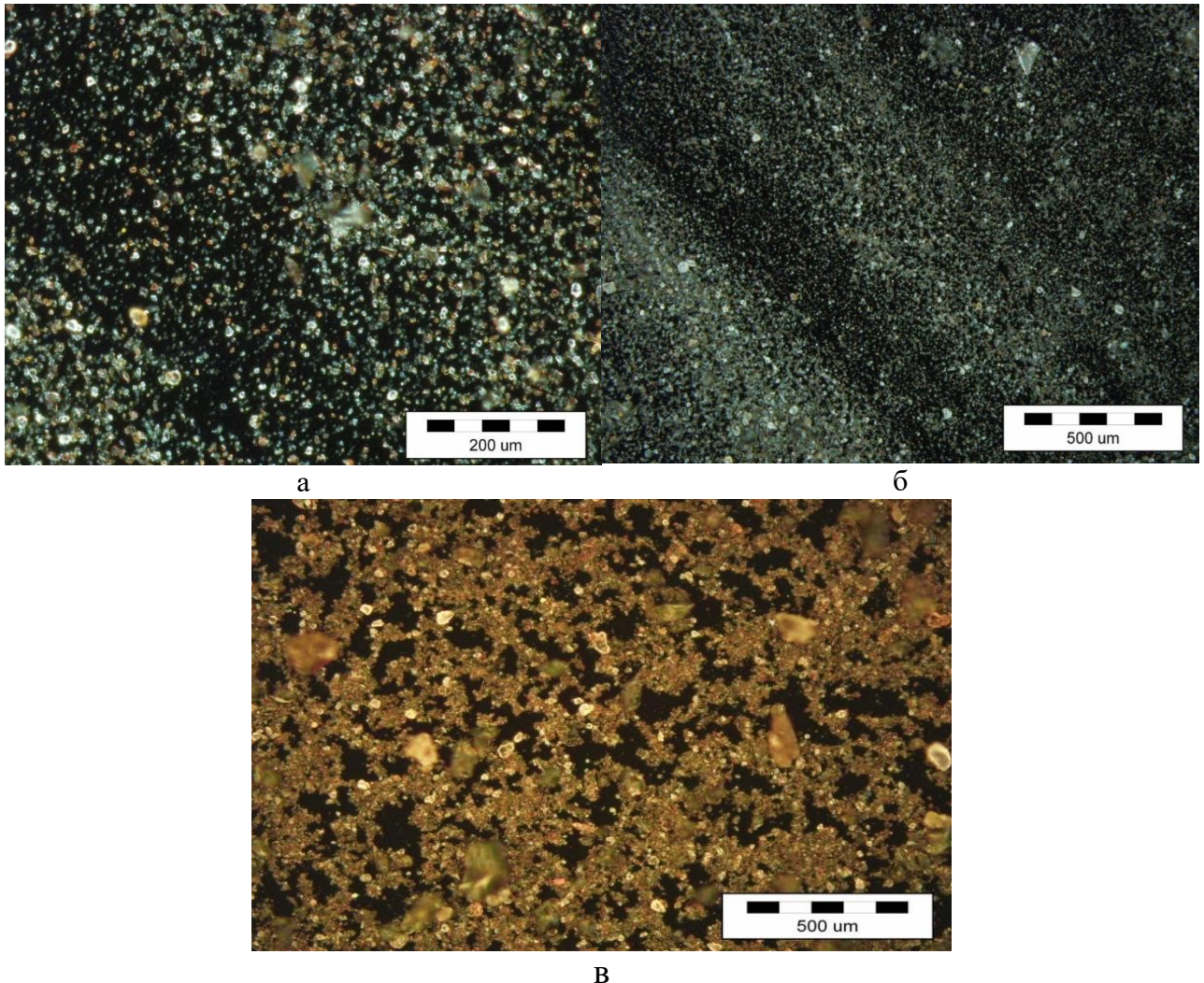


Рисунок 3.4 – Оптическое изображение отходов флотации, произведённого на ЦОФ «Печорская», в тёмном световом поле прямого микроскопа

Был проведён литолого-петрографический анализ пробы отходов флотации стандартным кристаллооптическим методом под поляризационным микроскопом в шлифах с описанием текстурно-структурных особенностей, гранулометрического состава, минерального состава пластического материала, включая фотодокументирование шлифов (рисунок 3.5). Исследования направлены на уточнение литологического состава и микроструктуры.

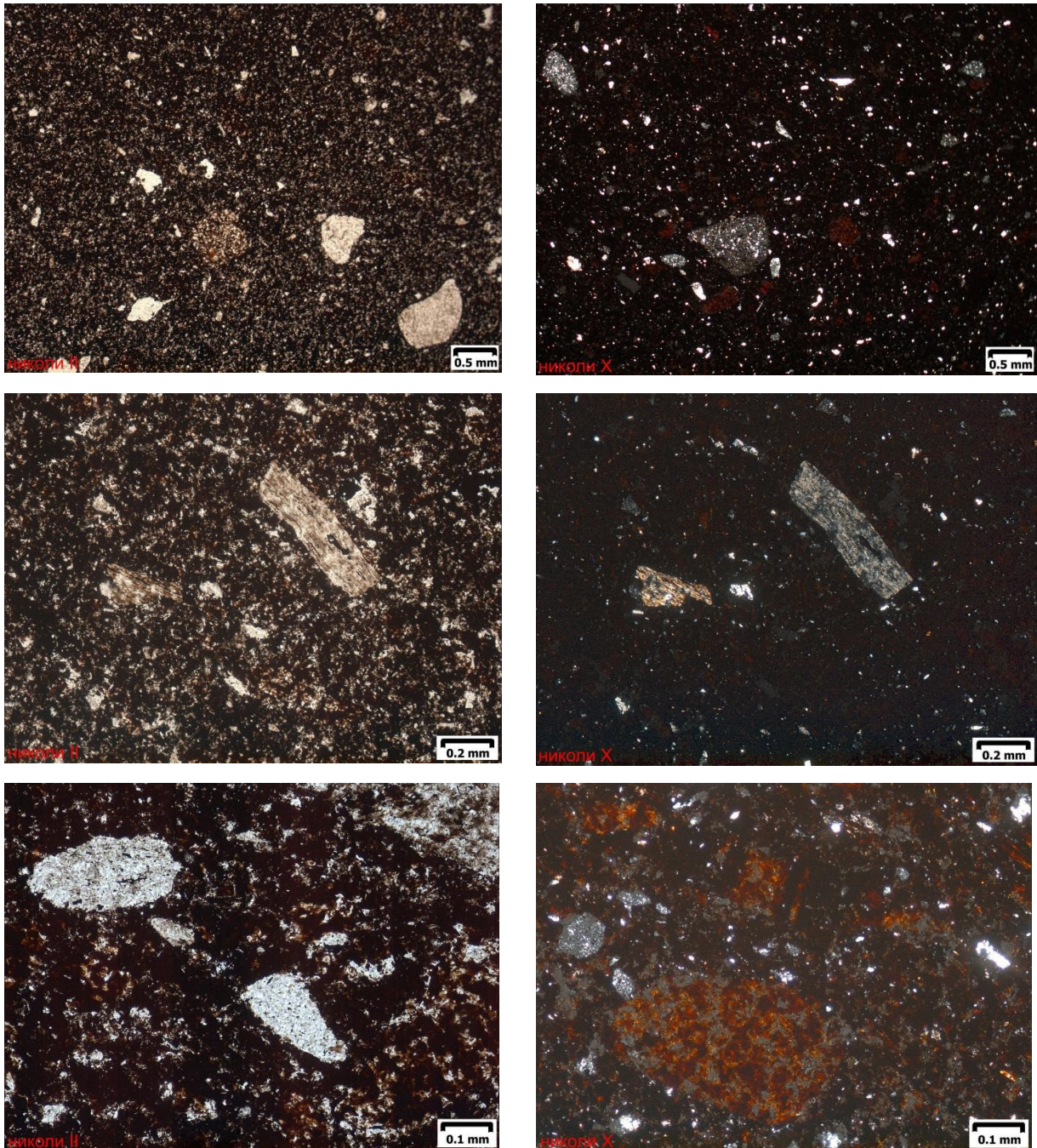


Рисунок 3.5 – Фотодокументирование шлифов отходов флотации в поляризационном микроскопе

По изученным шлифам материал можно охарактеризовать как высокоуглеродистый терригенный углистый аргиллит с большим содержанием привнесенных минеральных компонентов. Черный цвет материала обусловлен значительным содержанием угольного вещества. Под микроскопом структура аргиллита алевропелитовая, текстура беспорядочная вследствие нарушенности. Трудноопределяемое в виду дисперсности органическое вещество присутствует в смеси с глинистым веществом, диагностируется по красновато-коричневому цвету.

Анализируя данные минералого-петрографических исследований, можно говорить о том, что отходы фабрики представляют собой смесь осадочных горных пород и высокозольных угольно-минеральных сростков за исключением горелых пород с фабрики, которые уже не рассматриваются как органо-минеральная смесь. В отходах фабрики преобладают глинистые породы, в различных соотношениях содержащие угольное вещество. Качественная характеристика отходов углеобогащения определяется свойствами глинистых пород. В минералогическом отношении глинистые минералы представлены каолинитом, иллитом, хлоритами и минералами не глинистого ряда (обломочными зёрнами кварца, полевых шпатов) и аутогенными минералами (пиритом, карбонатами).

3.3 Изучение гранулометрического состава отходов углеобогащения

Для отобранных образцов отходов углеобогащения был проведён анализ гранулометрического состава твёрдой фазы. Анализ позволяет классифицировать исследуемые породы по крупности частиц, рассчитать средний диаметр частиц и оценить величину неоднородности. Средневзвешенный диаметр частиц рассчитывался по формуле (3.2):

$$d_{50} = \frac{\sum x_i \cdot d_i}{100}, \quad (3.2)$$

где x_i – массовая доля частиц i -го класса, %; d_i – диаметр частиц класса, мм.

Среднее распределение фракций по результатам анализа гранулометрического состава исследованных материалов ситовым и ареометрическим методами представлено на рисунке 3.6.

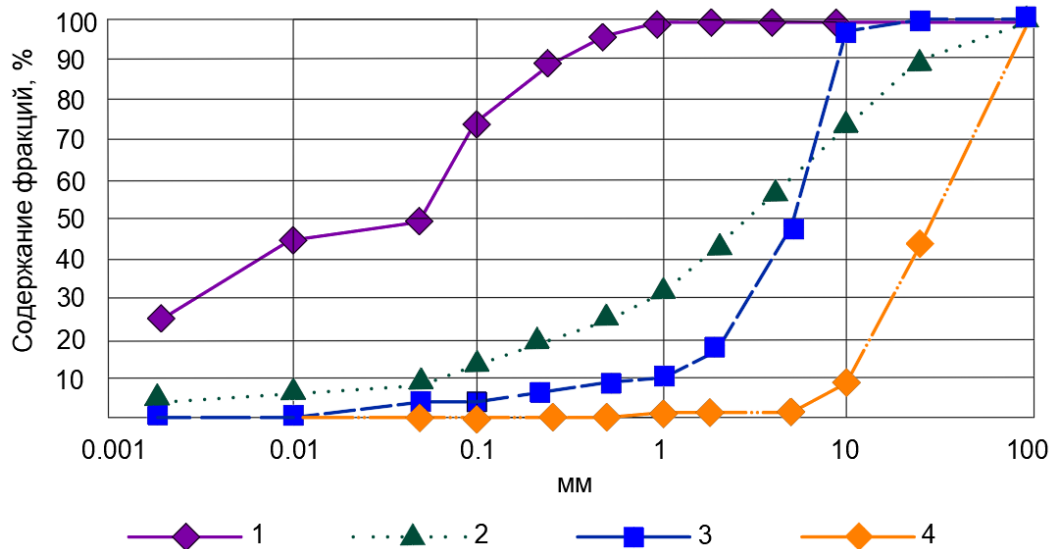


Рисунок 3.6 – Кривые гранулометрического состава отходов углеобогащения (1 – отходы флотации, 2 – отходы грохочения, 3 – шлак, 4 – материал из породного отвала)

Среди исследованных материалов по содержанию мелких фракций сильно выделяются отходы флотации, представляющий собой глинисто-угольный тонкодисперсный материал, средний диаметр частиц которого $d_{50}=0,05$ мм, в то время как для остальных материалов он больше 2 мм. Следует также отметить, что гранулометрический состав породы с фабрики и из существующего породного отвала сильно отличается, что можно объяснить физическим выветриванием складированной в отвал породы с фабрики, приводящим к дезинтеграции крупных кусков, а также действием вышележащих отходов при наращивании отвала. Следовательно, в процессе транспортирования и укладки отходов в отвал и в дальнейшем под действием различных факторов их зерновой состав может существенно изменяться. Степень изменения зависит от минералого-петрографического состава, условий и времени хранения отходов в сооружении.

3.4 Изучение физико-механических свойств отходов углеобогащения

3.4.1 Программа и задачи исследований

Методика как лабораторных, так и полевых испытаний для пород естественного сложения разработана и хорошо обоснована [5, 6, 7]. Однако техногенные породы характеризуются следующими особенностями, которые необходимо учитывать:

1. Физико-механические свойства техногенных пород изменяются в зависимости от применяемой технологии обогащения, транспортировки и методе складирования.

2. Влажность и пористость техногенно образованных пород отличается от пород естественного сложения.

3. Зависимость изменений гранулометрического состава и напряженного состояния пород от времени.

Для тех образцов, где это было возможно, были проведены следующие определения показателей физико-механических свойств: естественная влажность, влажность на границе текучести, влажность на границе раскатывания, число пластичности, показатель текучести, плотность, плотность скелета грунта, плотность частиц грунта, угол внутреннего трения и сцепление методом одноплоскостного среза.

Плотность ρ и плотность частиц грунта ρ_s определялись пикнометрическим методом. Пластические свойства отходов флотации и пород, отобранных в отвале (влажность на границе раскатывания W_P и текучести W_L) определялись с помощью лабораторных испытаний, регламентированных ГОСТ 5180–2015.

Естественная объёмная влажность W_o вычислялась по формуле (3.3):

$$W_{o=} \frac{W \cdot \rho_{\text{сух}}}{\rho_{\text{воды}}} \quad (3.3)$$

Коэффициент пористости e , д.е. (3.4):

$$e = \frac{n}{1 - n}, \quad (3.4)$$

коэффициент водонасыщения S_r , д.е. (3.5):

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{воды}} \cdot e}, \quad (3.5)$$

Формула для расчёта полной влагоемкости W_{sat} , д.е. (3.6):

$$W_{\text{sat}} = \frac{e \cdot \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{грунта}}}, \quad (3.6)$$

Плотность скелета грунта ρ_d , г/см³ (3.7):

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}, \quad (3.7)$$

Показатель текучести (консистенции) I_L , д.е. (3.8):

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}, \quad (3.8)$$

Число пластичности I_p , д.е. (3.9):

$$I_p = W_L - W_p, \quad (3.9)$$

Механические свойства определялись методами одноплоскостного среза и методом трёхосного сжатия. Для всех видов проб были проведены серии из шести одноплоскостных срезов по консолидированно-дренированной схеме «под водой» (при полном водонасыщении, производимой в процессе уплотнения образцов на стадии консолидации). Также для породы, отобранной в отвале, и смеси пород были выполнены серии из шести одноплоскостных срезов по консолидированно-дренированной схеме при естественной влажности. Количество испытаний обусловлено минимальными требованиями ГОСТ 20522–2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний», по результатам которых можно определить расчётные значения прочностных параметров. Испытания для породы с фабрики и образцов с породного отвала проводились на отсеке -5 мм, содержание которого в исходном материале превышало 30%.

Дополнительно были проведены испытания отходов флотации на нагрузках ниже, указанных в техническом задании, для определения параметров прочности данного вида техногенных пород в нестабилизированном состоянии по схеме быстрого среза. Также определялись деформационные параметры отходов

флотации с помощью компрессионных испытаний согласно ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

3.4.2 Исследование физических свойств отходов углеобогащения

Значения физико-механических свойств техногенных пород являются наиболее важным параметром для оценки устойчивости массива [150]. Было обосновано, что на формирование свойств оказывают влияние и природные, и техногенные факторы. Также было доказано, что породы и, соответственно, их свойства претерпевают изменения в ходе всех процессов, составляющих технологический процесс углеобогащения и отвалообразования. Результаты определения характеристик физических свойств представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Физические свойства материалов.

Параметр	Единицы измерения	Материал			
		Отходы флотации	Отходы грохочения	Шлак	Отвал
Естественная влажность, W	доли ед.	0,29	0,04	0,28	0,06
Влажность на границе текучести, W_L	доли ед.	0,29			0,22
Влажность на границе раскатывания, W_P	доли ед.	0,21			0,16
Число пластичности, I_P	доли ед.	0,08			0,06
Показатель текучести, I_L	доли ед.	1,00			-1,67
Плотность грунта, ρ	г/см ³	1,43			2,06
Плотность скелета, ρ_d	г/см ³	1,11			1,94
Плотность частиц грунта, ρ_s	г/см ³	1,63	2,30	1,87	2,38
Коэффициент пористости, e	доли ед.	0,47			0,23
Коэффициент водонасыщения, S_r	доли ед.	1,00			0,64
Полная влагоёмкость, W_{sat}	доли ед.	0,29			0,09

Представленные результаты лабораторных испытаний (по параметру I_P) позволяют классифицировать отходы флотации, образующийся на Печорской ЦОФ, как суглинок $0,07 < I_P < 0,17$. Для этих отложений были выполнены

определения коэффициента фильтрации, который в среднем составил 0,02 м/сут, что объясняется гранулометрическим составом материала, который близок к суглинистым породам природного происхождения. Такие значения коэффициента фильтрации означают, что в данном материале может возникать избыточное поровое давление, которое может не успевать рассеиваться за период нагружения массива при интенсивном наращивании высоты отвала.

Основные выводы по качеству отходов углеобогащения сводятся к следующим характеристикам:

– По содержанию серы большей частью отходы углеобогащения относятся к малосернистым (менее 1,0%), по содержанию фосфора – низко- и среднефосфористые (0,01-0,03%), по содержанию железа – среднежелезистые (6-8%), по содержанию алюминия – среднеглиноземистые (21-23%) (согласно инженерно-геологической классификации отходов углеобогащения классификации Н. Н. Розанова [104];

– Исследуемые отходы обогащения относятся к низкоглинистым (<60% глинистых минералов в составе);

– Отходы являются весьма устойчивыми к окислению [98];

– Отходы обогащения углей Печорского угольного бассейна можно отнести к несклонным к самовозгоранию.

3.4.3 Исследование прочностных свойств отходов углеобогащения

Параметры деформационных свойств складированных в отвалы пород и их структурной прочности определяют значения эффективных напряжений в массиве, гравитационного уплотнения, изменения пористости и характер развития порового давления, что было доказано в работах Н. А. Кутеповой на примере намывных массивов отходов углеобогащения [65]. Был описан сложный характер происходящих при уплотнении глинистых пород процессов. Очевидно, что для решения задачи о поведении массива, сложенного техногенными породами, первоочередным является изучение прочностных свойств пород.

Для косвенной оценки прочностных свойств в водонасыщенном состоянии и оценки возможности оплывания проба отходов флотации исследовалась в приборе для определения угла естественного откоса. Высушенная и растёртая проба засыпалась в прибор для определения угла естественного откоса, после чего происходило водонасыщение шлама. После испытания проба была оставлена в приборе на сутки. Замеренный угол естественного откоса равен 44° (рисунок 3.7). Влажность шлама после испытания составила 39,6%. Несмотря на высокое значение угла естественного откоса, обусловленного как силами трения, так и зацепления угловатых частиц материала, следует отметить, что материал увеличил свою влажность на 10% по отношению к исходной.



Рисунок 3.7 – Испытание отходов флотации в приборе для определения угла естественного откоса

Все виды отходов с фабрики испытывались методом одноплоскостного среза. Метод одноплоскостного среза является широко распространённым для определения параметров сопротивления сдвигу. Испытание характеризуется простой методологией, быстрым исполнением и доступной приборной базой. Однако ряд недостатков метода не позволяет считать его универсальным и достаточным для анализа исследуемых материалов. Так, упрощение модели, предполагающее, что поверхность среза является и поверхностью ослабления в образце, не позволяет корректно оценить напряжённое состояние в образце, а не

только в плоскости сдвига. Также метод не позволяет провести опыт при полном водонасыщении мелкозернистых образцов и оценить величину порового давления в образце.

Сдвиги на приборах одноплоскостного среза производят при разных значениях нормальных напряжений (σ) и по полученным значениям срезающих касательных напряжений (τ) строят диаграммы сдвига $\tau = f(\sigma)$. Выделяют две основные схемы испытаний: неконсолидированный сдвиг и консолидированный сдвиг. Сдвиг по первой схеме выполняется без предварительного уплотнения образцов с сохранением естественной влажности и плотности в ходе опыта. Консолидированный сдвиг производят после предварительного уплотнения образцов до их полной стабилизации.

Были исследованы прочностные характеристики отходов флотации в исходном состоянии, крупнообломочных отходов грохочения, шлака и материала, отобранного на отвале в отсеке -5 мм в приборе одноплоскостного среза GCTS RDS-200 с площадью испытательной камеры 177 см^2 (рисунок 3.8). При этом материалы, кроме отходов флотации, исследовались в диапазоне 200-1600 кПа, а отходы флотации в диапазоне 200-800 кПа, поскольку при большей нагрузке материал выдавливалось в зазор сдвиговой коробки.

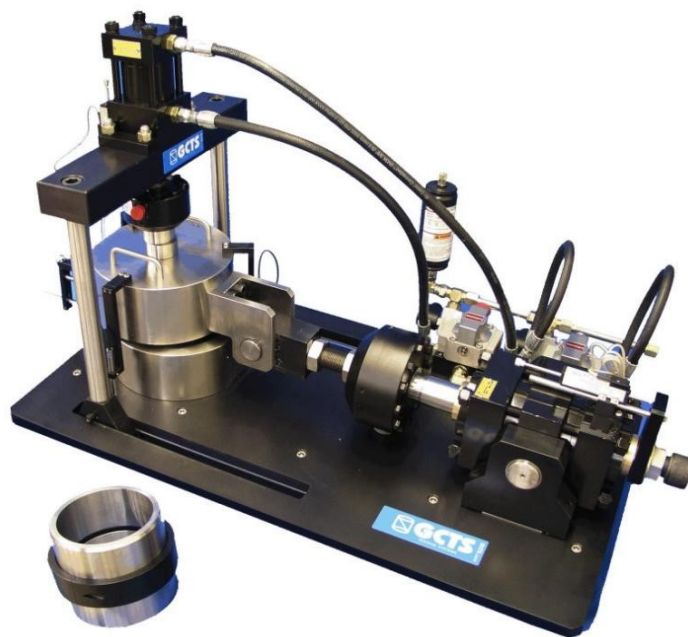


Рисунок 3.8. Прибор одноплоскостного среза GCTS RDS-200

Результаты испытаний представлены в таблице 3.5. График испытаний для отходов флотации представлен на рисунке 3.9.

Таблица 3.5 – Прочностные параметры отходов флотации, крупнообломочных отходов и шлака в водонасыщенном состоянии по результатам испытаний на одноплоскостной срез.

Показатель	Материал			
	Отходы флотации	Отходы грохочения	Шлак	Отвал
Сцепление, кПа	28	47	51	60
Угол внутреннего трения, °	31	30	32	30

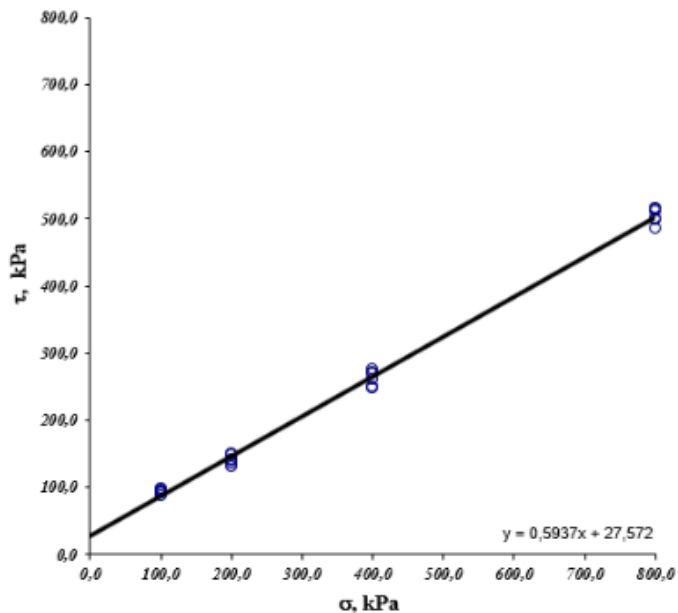


Рисунок 3.9 – Результаты испытаний отходов флотации на одноплоскостной срез при дренированных условиях

Дополнительно для отходов флотации были выполнены испытания на одноплоскостной срез при недренированных условиях. Значения прочности в этом случае составили: сцепление – 4 кПа, угол внутреннего трения – 23°. График испытаний для отходов флотации представлен на рисунке 3.10. При этом сами испытания были произведены при нагрузках до 150 кПа, поскольку при больших давлениях материал выдавливался в зазор.

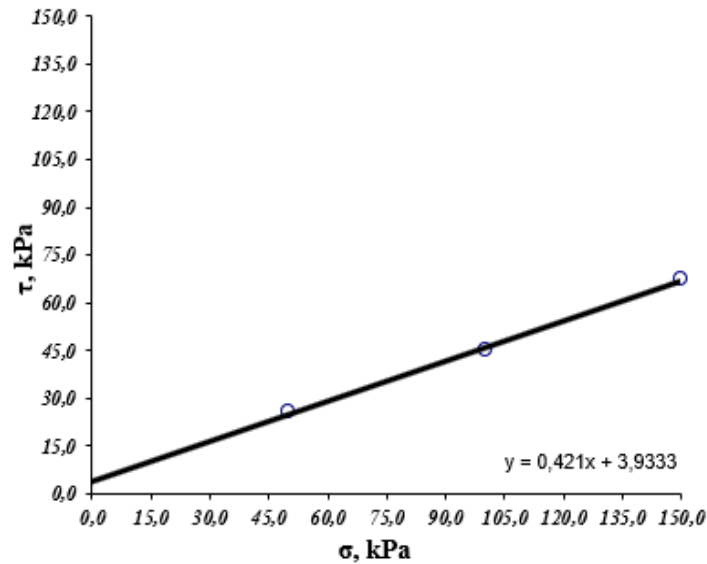


Рисунок 3.10 – Результаты испытаний отходов флотации на одноплоскостной срез при недренированных условиях

Также были выполнены исследования прочностных свойств смесей отходов, что необходимо для обоснования проектных решений по складированию отходов флотации: отдельно или в смесях с другими отходами. Формирование состава материала в смесях проходило следующим образом. Сначала в равных долях смешивались крупнообломочные отходы грохочения и шлак, а затем к этому объёму добавлялись отходы флотации. В итоге были получены для варианта смеси: 1) отходы грохочения+шлак – 70%, отходов флотации – 30%; 2) отходы грохочения+шлак – 50%, отходов флотации – 50%. Результаты испытаний представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Прочностные свойства смесей отходов

Показатель	Смесь отходов	
	70/30	50/50
Сцепление, кПа	49	57
Угол внутреннего трения, градусы	29	29

3.4.4 Исследование деформационных свойств отходов углеобогащения

Основным методом исследования деформационных свойств дисперсных пород в лабораторных условиях является проведение опытов в компрессионных

приборах и на приборе трёхосного сжатия [7]. Суть компрессионных испытаний заключается в том, что породу подвергают уплотнению путём приложения нагрузки ступенями в рабочем кольце прибора и наблюдают за изменением пористости. Проведённые ранее опыты показывают, что в компрессионном приборе осадка образца нелинейно зависит от нагрузки, причём с увеличением давления на образец происходит его упрочнение, а коэффициент бокового давления величина постоянная [88, 155, 158].

Для образцов отходов флотации, отобранных на Печорской ЦОФ, проводились компрессионные испытания для оценки их деформационных характеристик. Результатом компрессионных испытаний является зависимость коэффициента пористости e от величины уплотняющей нагрузки P , представляемая в виде компрессионной кривой. Уравнение компрессионной кривой (3.10) имеет вид:

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta h}{h} \cdot (1 + e_0), \quad (3.10)$$

где e_i – коэффициент пористости при давлении P_i , h – высота образца, Δh – изменение высоты образца после приложения нагрузки.

По компрессионной кривой графически определяется коэффициент сжимаемости m_0 (3.11):

$$tga = m_0 = \frac{e_1 - e_2}{P_{max} - P_{min}}, \quad (3.11)$$

где e_1 и e_2 – значения коэффициентов пористости при минимальной и максимальной нагрузках P_{min} и P_{max} . В соответствии с полученным коэффициентом сжимаемости дисперсные породы относят к одному из трёх типов (таблица 3.7)

Таблица 3.7 – Характеристика дисперсных пород в зависимости от коэффициента сжимаемости m_0

Коэффициент сжимаемости	Характеристика пород
$m_0 < 0,005$	Малосжимаемые
$0,005 < m_0 < 0,05$	Среднесжимаемые
$m_0 > 0,05$	Сильносжимаемые

Испытания отходов флотации показали следующий их разброс в диапазоне нормальных напряжений 0,1-0,2 МПа: коэффициент сжимаемости – 0,180-0,194 МПа⁻¹; одометрический модуль деформации – 7,5-8,2 МПа; компрессионный модуль деформации – 4,5-4,9 МПа. Данные значения позволяют считать отходы флотации сильносжимаемым материалом. Пример компрессионной кривой для отходов флотации приведён на рисунке 3.11.

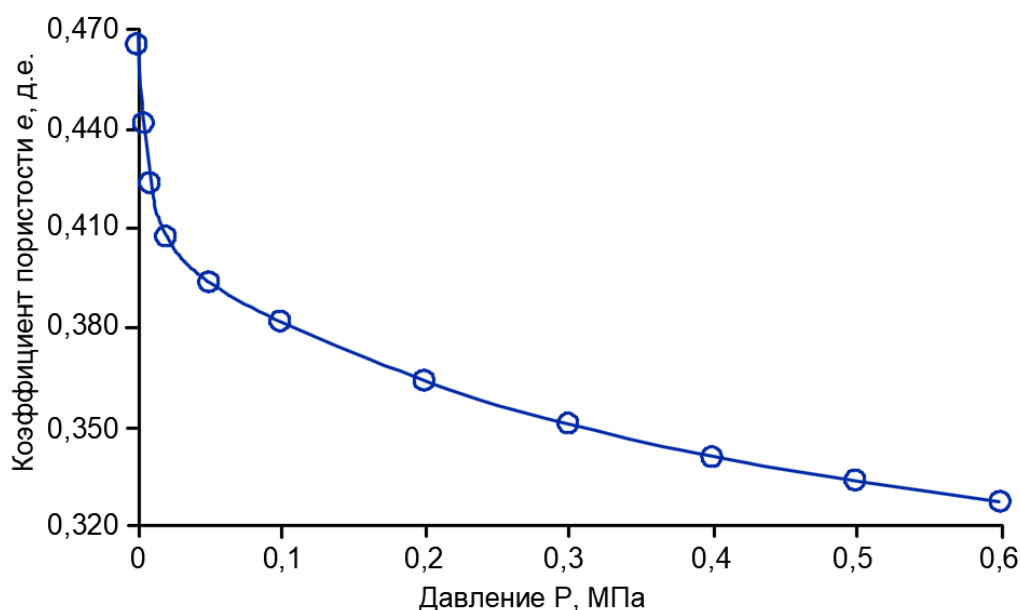


Рисунок 3.11 – Компрессионная кривая по результатам испытаний отходов флотации

Контроль условий дренирования образца и учёт порового давления позволяет осуществить метод трёхосного сжатия, являющийся основным методом исследования деформационных свойств дисперсных пород в лабораторных условиях. Применение метода дает возможность оценить влияние порового давления на параметры прочности исследуемых техногенных пород. К недостаткам метода относят длительность испытаний. Для верификации результатов испытаний на одноплоскостной срез были проведены исследования отходов флотации методом трёхосного сжатия.

Метод подразумевает применение трёх схем испытания:

– консолидированно-дренированные (схема «КД») испытания проводятся после стабилизации образца под заданным нормальным давлением. Испытания

проводят по схеме медленного сдвига, со скоростью, позволяющей системе прийти в равновесное состояние за счёт отжатия воды. Показатели прочности выше, чем при использовании других схем;

– неконсолидированно-недренированные (схема «НН») испытания проводят в закрытой системе без предварительного уплотнения образцов по схеме быстрого сдвига, обеспечивающей постоянные значения влажности и пористости. Показатели прочности здесь минимальные вследствие возникающего в образце порового давления;

– консолидированно-недренированные (схема «КН») испытания проводятся после стабилизации образца под нормальным напряжением. Разрушение проводят по схеме быстрого сдвига при постоянных пористости и влажности. Схема позволяет получить промежуточные между схемами «НН» и «КД» показатели прочности.

Использование какой-либо из схем позволяет смоделировать состояние пород в массиве и их поведение при приложении нагрузки. В зависимости от схемы испытаний результаты, которыми являются показатели прочности сцепление и угол внутреннего трения, изменяются в широких пределах, что особенно характерно для мелкодисперсных глинистых пород, для которых свойственно возникновение избыточного порового давления.

Методика компрессионных испытаний подразумевает проведение серии опытов при различном соотношении главных напряжений, при этом необходимо провести испытания как минимум трёх образцов при различных средних эффективных напряжениях. Образец представляет собой материал либо естественной влажности, либо с заданными значениями пористости и влажности.

Исследования методом трёхосного сжатия были проведены по схемам «КД» и «КН» [7]. Программа испытаний составлялась с учётом максимально возможного эффективного напряжения в теле отвала (до 500 кПа), сложенного отходами флотации. Эффективные всесторонние напряжения консолидации приняты, соответственно 100, 300 и 500 кПа. Обработку результатов экспериментов

проводили методом наименьших квадратов в соответствии с п.9 ГОСТ 12248.3-2020:

$$N = \frac{n\Sigma(\sigma'_1\sigma'_2) - \Sigma\sigma'_1\Sigma\sigma'_2}{n\Sigma(\sigma'_3)^2 - (\Sigma\sigma'_3)^2}; \quad (3.12)$$

$$M = \frac{\Sigma\sigma'_1\Sigma(\sigma'_3)^2 - \Sigma(\sigma'_1\sigma'_3)\Sigma\sigma'_3}{n\Sigma(\sigma'_3)^2 - (\Sigma\sigma'_3)^2}; \quad (3.13)$$

$$\varphi' = \arctg\left(\frac{N-1}{2\sqrt{N}}\right); \quad (3.14)$$

$$c' = \frac{M}{2\sqrt{N}}, \quad (3.15)$$

где φ' - угол внутреннего трения в эффективных напряжениях, σ'_1 и σ'_3 - эффективные наибольшее и наименьшее главное напряжение в предельном состоянии, c' - удельное сцепление в эффективных напряжениях, n - число испытаний, а M и N - вспомогательные коэффициенты. В качестве параметров сопротивления сдвигу определяли постоянные во всём диапазоне исследованных напряжений угол внутреннего трения и удельное сцепление c (сопротивление сдвигу описывается уравнением Кулона $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi + c$).

В результате испытаний по обеим схемам в эффективных напряжениях параметры прочности получились практически идентичными (рисунок 3.12):

- 1) по схеме «КД» сцепление – 33 кПа, угол внутреннего трения – 31°;
- 2) по схеме «КН» сцепление – 22 кПа, угол внутреннего трения – 32°.

По КН схеме в полных напряжениях параметры прочности составили: сцепление – 0 кПа, угол внутреннего трения – 15°.

Более низкие значения прочности при недренированных трехосных испытаниях объясняются тем, что при одноплоскостном срезе, даже при больших скоростях среза, существует возможность отжатия воды по поверхности среза и боковой поверхности образца. Поэтому требуется учитывать величину порового давления, что обуславливает необходимость проведения трёхосных испытаний для подобных материалов. Параметры прочности, соответственно, зависят от схемы испытания, напряженно-деформированного состояния образцов и величины

порового давления. Увеличение порового давления и изменение напряжённого состояния приводит к уменьшению сцепления, значение угла внутреннего трения при этом не изменяется.

На рисунке 3.12 изображены усредненные значения траекторий нагружения испытуемых образцов по консолидировано-дренированной и консолидировано-недренированной схемам испытаний в осях эффективные средние напряжения – интенсивность нормальных напряжений ($p' - q$). Расчет эффективных средних напряжений (3.16) и интенсивности нормальных напряжений (3.17) производился следующим образом:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}; \quad (3.16)$$

$$q = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}. \quad (3.17)$$

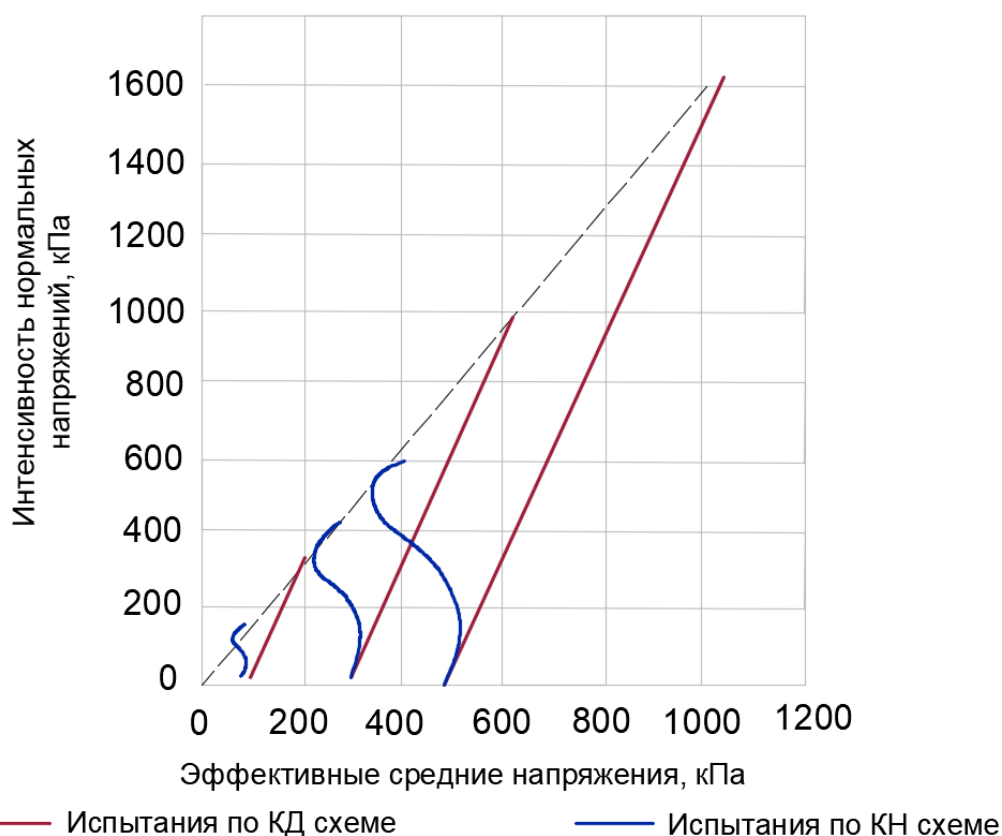


Рисунок 3.12 – Зависимость интенсивности нормальных напряжений от средних эффективных напряжений по результатам испытаний отходов флотации методом трёхосного сжатия по КН и КД схемам

На графике видно, что пики графиков «КД» испытаний и конечные линейные участки графиков «КН» испытаний достаточно хорошо ложатся на единую линию предельного состояния (пунктир на рисунке 3.12), что говорит о достаточной сходимости проведённых испытаний и правильности выбранной программы лабораторных трёхосных исследований.

3.5 Типизация отходов углеобогащения как техногенных пород

Техногенные породы разнообразны по своему происхождению, условиям формирования, преобразования, химико-минеральному составу, строению, состоянию и свойствам. С инженерно-геологической точки зрения для техногенных пород характерны значительная изменчивость вещественного состава, неоднородность строения, преобладание дисперсных разностей, невысокие показатели плотности и прочности, сжимаемость и т.д. Исходя из этого, можно сделать вывод, что они требуют детального изучения для решения вопросов складирования и дальнейшего использования.

На основе информации, изложенной в разделе 1.3, был проведён анализ факторов, оказывающих влияние на свойства техногенных пород и являющихся основными для деления пород по таксонам. Также исследуемые породы были проанализированы с точки зрения общих и частных классификаций, разработанных для решения инженерно-геологических задач.

Прежде всего, структурные особенности техногенных пород определяются их гранулометрическим составом. Тем не менее, породы природного и техногенного происхождения одного гранулометрического состава обладают различными свойствами. Следовательно, структурные особенности техногенных пород не идентичны параметрам пород естественного происхождения аналогичного гранулометрического состава, и такие породы не могут относиться к той же классификационной единице, что и схожие по составу породы природного генезиса. Более того, некоторые типы техногенных пород не имеют аналогов в природе, как, например, отходы углеобогащения.

Во-вторых, структурные особенности могут быть описаны в петрографических понятиях, отражающих размер, форму, характер поверхности частиц, характер взаимосвязи между ними. Также важными свойствами, влияющими на свойства пород и требующими изучения, являются особенности минералогического состава, степень уплотнения и влажность.

В-третьих, различия в физико-механических свойствах во многом определяются способностью к уплотнению при изменении напряжённого состояния. Для техногенных пород срок уплотнения и консолидации может достигать 20 лет. Определив наличие у пород реологических свойств и типизировав их согласно этому признаку, можно оценить изменение состояния массива во времени, сложенного данным типом пород.

Более того, в других работах Огородниковой Е. Н. и Николаевой С. К. отмечаются специфические особенности техногенных пород, что, по нашему мнению, также является ключевым аспектом [81, 82]. Так, авторы утверждают, что «некоторые пылеватые хвосты нельзя классифицировать как природные грунты, так как наблюдается несоответствие между гранулометрическим составом и отсутствием пластичности, свойственной для природных грунтов подобного гранулометрического состава».

Таким образом, приведённые выше характеристики могут считаться ключевыми при описании инженерно-геологических особенностей различных видов техногенных пород.

Описание изучаемых техногенных пород можно выполнить путём их классификации по инженерно-геологическим особенностям. Основой для изложения материала далее является общая генетическая классификация грунтов, приведённая в ГОСТ 25100–2020 и составленная на основе работ Вознесенского Е. А., а также частная классификация отходов углеобогащения, составленная М. Я. Шпиртом. Данные классификации являются наиболее полными и характеризуют породы как по генезису, так и по структурно-текстурным особенностям.

ГОСТ 25100–2020 включает инженерно-геологическую типизацию техногенных грунтов, которая указывает только на генезис материала. Согласно ей,

все отходы углеобогащения, складываемые в отвалах, классифицируются как отходы производств и относятся к типу антропогенно образованных грунтов. Однако, согласно стандарту, техногенные грунты допускается разделять на те же разности, что и природные грунты. В этом контексте отходы, образуемые на Печорской ЦОФ, относятся к дисперсным несвязным органо-минеральным (отходы грохочения), дисперсным несвязным минеральным (шлаки) и дисперсным связным органо-минеральным (отходы флотации) грунтам. Как можно видеть, подобное классифицирование техногенных пород не информативно и не упрощает задачу выбора оптимальных направлений складирования и утилизации.

Для решения этой проблемы предложены параметры классификации отходов, которые можно разделить на следующие группы [133]:

- источник образования и крупность отходов

Разделение по источнику образования позволяет оценить стабильность состава, влажность, дисперсность. Отходы обогащения отличаются наибольшей стабильностью состава и свойств среди всех углеотходов. Граничные значения параметра крупности обычно выбираются согласно машинным классам обогащения: 1 мм и 13 мм. По источнику образования все углеотходы разделяют на вскрышные породы, шахтные породы, отходы обогащения, отходов флотации, породы терриконов и золошлаковые отходы.

- литолого-минералогический состав

Отходы добычи и обогащения углей представляют собой алевроито-песчаные или глинисто-карбонатные породы. Подробное деление на большое количество классификационных групп не информативно. Анализ имеющихся сведений о литологическом составе углеотходов позволяет сделать вывод о целесообразности разделения на глинистые (более 50% глин), песчаные (более 40% песчаника и кварца) и карбонатные (более 20% карбонатов). С целью описания склонности пород к набуханию отходы углеобогащения разделяются на каолинит-кварцевые (более 50% минералов каолинитовой группы при их суммарном содержании с кварцем более 70%), гидрослюдистые и монтмориллонитовые.

- характеристика органического вещества

Содержание органического вещества является важной особенностью углеотходов по сравнению с другими видами сырья. Показатель важен для вторичного использования отходов как в качестве топлива, так и в качестве конструкционного материала. Склонность к самовозгоранию может определять конструктивные особенности объектов складирования отходов.

- состав минерального вещества

От содержания золообразующих компонентов зависит направление дальнейшего использования отходов. По содержанию микроэлементов оценивается возможность получения концентратов редких и рассеянных элементов.

- физико-механические свойства

Из полного комплекса физико-механических свойств отходов ограничительным является только пластичность, которая определяет возможность использования отходов в качестве строительного материала.

Таким образом, отходы обогащения, формирующиеся на Печорской ЦОФ, можно классифицировать как техногенные породы по вышеизложенным классификационным показателям. Отходы, складываемые в отвалы, разделяются на крупнообломочные органо-минеральные песчаные непластичные породы (отходы гравитационного обогащения), глинистые гидрослюдистые отходы флотации, органо-минеральные по составу и непластичные, а также крупнообломочные шлаки, являющиеся минеральными непластичными породами.

3.6 Закономерности формирования состава, состояния и свойств техногенных пород, сформированных из «сухих» отходов углеобогащения

По результатам лабораторных исследований установлено, что отходы углеобогащения, складываемые в отвал, являются техногенными породами и обладают специфическими свойствами, обусловленными технологией их получения. Изменение свойств техногенных пород происходит весь срок формирования отвального сооружения и продолжается после складирования.

Поэтому большое значение имеет контроль состояния техногенных массивов, которые они формируют.

Существует связь между свойствами материнской породы и вторичных материалов. Обобщённая характеристика механических свойств углей на Воркутинском месторождении по данным ВНИИГИС и ПечорНИИпроект показала, что угол внутреннего трения углей составляет 37° , а сцепление 4,5 МПа [99]. Следовательно, для техногенных пород, полученных при разрушении углей, угол внутреннего трения будет близок к значениям материнской породы, а сцепление должно практически отсутствовать. Это подтверждают результаты исследований в ходе текущей работы, а также характеристика свойств отходов флотации Ю. М. Лычко, который приводит сведения, что угол внутреннего трения у таких пород может достигать $30-34^\circ$ [70].

При отдельном складировании отходов углеобогащения и обосновании оптимальных параметров отвалов следует учитывать, что под действием давления от последующих этапов наращивания сооружения в отходах флотации может возникать избыточное поровое давление. Поэтому необходимо рассчитывать интенсивность их нагружения с учетом его диссипации до безопасных для устойчивости отвала значений. Для контроля этого процесса необходимо предусматривать установку датчиков порового давления. Также необходимо производить складирование отходов флотации не только обваловывая их породой и шлаком, но имея в качестве дренажного слоя породу с шлаком в основании карт для размещения отходов флотации.

3.7 Выводы к главе 3

1. В ходе исследования проанализированы состав и свойства отходов углеобогащения трех типов, планируемые к совместному складированию в отвалах: отходов грохочения, отходов флотации и шлака, а также их смесей. Отходы флотации являются наименее изученным материалом и представлен пылеватыми отложениями, полиминеральными по составу и содержащими 30% глинистых частиц.

2. Исследования тонкодисперсных пород методом трёхосного сжатия по консолидированно-дренированной схеме показали, что существует связь между свойствами материнской породы, т.е. углей, и отходами их обогащения, выражающаяся в высоком показателе угла внутреннего трения (больше 30°). При этом в недренированных условиях параметры прочности отходов флотации в два раза ниже: сцепление – 0 кПа, угол внутреннего трения – 15° .

3. Полученные результаты свидетельствуют о том, что под действием давления от последующих этапов наращивания сооружения в отходах флотации может возникать избыточное поровое давление, которое необходимо учитывать при отдельном складировании отходов углеобогащения и выборе оптимальных параметров отвалов.

4. Полученные в лабораторных условиях результаты свидетельствуют о том, что длительный мониторинг состояния техногенных массивов имеет большое значение для обеспечения безопасной эксплуатации отвала, так как изменение свойств происходит весь срок формирования отвального сооружения и продолжается после прекращения складирования отходов.

ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ОТВАЛА ПРИ СОВМЕСТНОМ СКЛАДИРОВАНИИ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

4.1 Задачи мониторинга безопасности отвальных сооружений

Начало разработки теории мониторинга окружающей среды положено Ю. А. Израэлем. Под этим термином он подразумевал «систему наблюдений, позволяющую выделить изменения биосферы под влиянием человеческой деятельности (мониторинг антропогенных изменений окружающей среды)». Это самое широкое определение мониторинга, которое охватывает системы мониторинга разных типов и уровней. В дальнейшем развитием его идей, разработкой классификаций и классификационных признаков занимались Г. К. Бондарик и Л. А. Ярг [20], В. А. Мироненко [76], И. А. Парабучев [87]. В. Т. Трофимов и В. А. Королёв впервые ввели понятие инженерно-геологического мониторинга и мониторинга геологической среды, под которым подразумевали «систему постоянных наблюдений, оценки и прогноза и управления геологической средой или её частью, проводимую по заранее намеченной программе с целью обеспечения оптимальных экологических условий для человека в пределах рассматриваемой природно-технической системы» [114].

По В. Т. Трофимову, одной из ключевых характеристик мониторинга является его иерархичность, существование мониторинговых систем различного уровня, взаимосвязанных между собой. Так, основным и базовым для организации мониторинговых систем более высоких уровней является детальный мониторинг, реализуемый в пределах отдельных природно-техногенных систем (ПТС) масштаба горного предприятия [57]. Структура и содержание такого мониторинга определяется как природными геологическими и инженерно-геологическими особенностями объекта, так и характером и динамикой техногенного воздействия, оказываемого на среду. Целью такого мониторинга является управление и оптимизация управления ПТС путём создания прогнозных моделей развития изучаемой системы. В исследовании рассматривается детальный мониторинг,

объектом которого является инженерное сооружение – насыпной отвал отходов углеобогащения.

На основании целей и особенностей изучаемого объекта, согласно В. А. Королёву, можно выделить три основные типа мониторинга, относящихся к исследованию геологической среды:

- Мониторинг геологических систем, целью которого является изучение и оптимизация функционирования геологической системы;
- Мониторинг литотехнических систем, цель которого – прогноз и управление состоянием системы, представляющей собой часть геологической среды, являющейся средой обитания человека и подверженной техногенным изменениям;
- Мониторинг эколого-геологических систем, направленных на прогноз и управление состоянием таких систем, и контроль их экологического функционирования.

Наибольший вклад в развитие вопросов мониторинга состояния отвалов, инженерно-геологического, геомеханического и гидрогеологического обеспечения складирования горных пород внесли Бондарик Г. К., Бахаева С. П., Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Попов Н. В., Васильева А.Д.

За всю историю эксплуатации различных отвальных сооружений наблюдаются происходящие на отвалах неблагоприятные процессы и явления, причиняющие значительный экологический и экономический ущерб. Произошедшие аварии, как, например, проанализированные в разделе 1.2, показывают, что развитие геомеханических процессов в массиве может происходить вследствие изменений инженерно-геологических условий, что свидетельствует о недостаточном изучении состояния массива в течение срока эксплуатации. Основываясь на опыте произошедших аварий, можно сделать вывод о наиболее частых причинах возникновения нарушений:

- Недостаточное количество информации об инженерно-геологических условиях;
- Ошибки в расчётах, допущенные при проектировании;

- Несоответствие хода ведения отвальных работ проектным решениям, несоблюдение качества ведения работ;
- Нарушение работы дренажной системы, недостаточная изученность гидрогеологических условий;
- Изменение в ходе эксплуатации сооружения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на территории и, соответственно, изменение характеристик складированных пород, которые оказывают влияние на состояние массива (например, суффозионный вынос, подтопление);
- Отсутствие соответствующего контроля за состоянием сооружения и проявлением экзогенных процессов явлений, приводящих к нарушению устойчивости массива и, соответственно, к деформациям и смещениям.

Выбор оптимальных проектных решений базируется не только на принципах обеспечения безопасности объекта, но и на двух других аспектах. Во-первых, необходимо учитывать возможность эксплуатации отвального сооружения в качестве вторичного сырья в длительной перспективе. Во-вторых, реализовывать стратегию сокращения площади земельного отвода. Анализ наиболее вероятных причин возникновения аварий на конкретном объекте позволяет определить параметры, в наибольшей степени оказывающие влияние на состояние массива. К основным показателям состояния массива относятся пространственные характеристики отвала (высота и углы приоткосных зон уступов, результирующий угол откоса, ширина берм), количество и характер деформаций в массиве, уровни водоносных горизонтов (природных грунтовых и техногенных), физико-механические свойства пород; опасные экзогенные явления в пределах объекта исследования.

Перечисленные параметры массива и являются предметом объектного мониторинга безопасности. Главная задача мониторинга – наблюдение за отклонением показателей состояния отвала относительно проектных значений с целью предотвращения возникновения опасных геологических процессов и явлений [98]. Мониторинг проводится в соответствии с установленным для конкретного объекта регламентом.

Мониторинг имеет решающее значение для обеспечения безопасности объекта. На основании данных мониторинга существует возможность определения как ожидаемой осадки массива, так и объёмы разрушений, связанные со свойствами фундамента или неправильной отсыпкой отвала [132]. Мониторинг требуется не только во время возведения отвалов, но и при долгосрочной оценке законсервированных или рекультивированных отвалов в случае, если есть вероятность неблагоприятных последствий для горнодобывающих предприятий или общественной инфраструктуры.

Начало проведения мониторинга происходит одновременно с началом ведения работ на объекте. Во время ведения работ на объекте основной задачей мониторинга является обеспечение безопасности рабочего персонала. Во время отсыпки геотехнические условия могут быстро меняться, как и погодные условия, практически на всех отвалах фиксируются смещения. Качественный мониторинг позволяет предотвращать деформации откосов во время сооружения отвала путём оперативного изменения схемы отсыпки, сохраняя при этом эффективность процесса и сводя к минимуму дорогостоящие простои. Надлежащее проектирование и техническое обслуживание отвалов становятся все более важным не только по соображениям безопасности, но и для предотвращения сбоев, которые могут негативно повлиять на предприятие в глазах общественности, на его репутацию, и, соответственно, на инвестиционную привлекательность объекта [165].

Долгое время необходимость проведения мониторинговых исследований состояния отвалов определяется «Правилами обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах», разработанными ВНИМИ в 1998 году и несколькими документами, составленными в 70-х и 80-х годах XX века («Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости», «Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости», «Инструкция по производству маркшейдерских работ»). Однако в этих документах

регламентировались только общие требования по проектированию, строительству, эксплуатации, реконструкции, консервации и ликвидации отвалов. Управление состоянием сооружения происходило на основании коэффициента запаса устойчивости, надежное эксплуатационное состояние которого обеспечивалось коэффициентом $>1,20$. Конкретные требования по организации системы мониторинга отсутствовали, документы носили рекомендательный характер. При этом от исполнителя требовалось строгое следование данным документам, несмотря на неоднозначность и противоречия в них.

В 2020 году были опубликованы Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности – «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов», где были сведены все требования по обеспечению безопасности откосов, в том числе и по организации мониторинга, с учётом современных методов и технических средств. Коллективом авторов был выполнен подробный сравнительный анализ предыдущих и новых правил [162].

В Правилах приведены виды работ, которые необходимо реализовывать в рамках мониторинга, их минимальные объёмы и периодичность в зависимости от класса опасности объекта. Данный документ охватывает широкий спектр вопросов, поэтому детального описания ни одного из них не предусматривает. Более того, Правила устанавливают лишь минимальные требования к объёмам мониторинга, в то время как для каждого конкретного объекта показатели различаются. Тем не менее, ФНиП регламентируют индивидуальный подход по организации системы мониторинга для каждого месторождения, а также подразумевают возможность выбора методики в зависимости от используемого оборудования.

К аспектам, впервые изложенным в нормативно-правовой документации, относятся:

- Перечень обязательных и рекомендуемых испытаний физико-механических свойств пород в зависимости от этапа ведения работ; значение коэффициентов для различных пород и условий;

- Требования к инженерно-геологическому изучению пород, используемых в качестве основания отвалов, определяемые на основании их типа и категории сложности объекта;
- Необходимость создания геомеханической модели объекта, отражающей его структурные свойства;
- Необходимость геофильтрационного моделирования в случае сложного распределения напоров в массиве;
- Регламентируемые методы расчёта устойчивости откосов: аналогия, предельное равновесие, численное моделирование, вероятностные расчёты, физическое моделирование и т.д.;
- Объем бурения геомеханических скважин и объем работ по поверхностному картированию;
- Использование всех доступных современных технических средств мониторинга, а также риск-ориентированного подхода к оценке и мониторингу устойчивости.

Несмотря на своевременность введения в действие новых Правил, регулирующих широкий спектр вопросов, связанных с мониторингом устойчивости, в Правилах отсутствует методика по организации системы мониторинга для отвальных сооружений, характеризующихся сложными конструктивными особенностями. Так, согласно Правилам, «расчёт устойчивости уступов карьеров, разрезов должен выполняться для верхней части уступа (первые метры от верхней бровки) и на всю высоту» в соответствии с выбранной схемой деформирования [2]. На основании этого можно сделать следующие выводы:

1. ФНиП подразумевают, что состояние массива определяется состоянием откосов, что может не отвечать критериям безопасности в случае сложного строения массива.
2. Данные ФНиП не регламентируют мониторинг состояния отвалов, сложенных техногенными породами, а именно части, находящейся за верхней бровкой.

В данном документе также обосновывается необходимость анализа факторов, определяющих устойчивость откосов отвалов, на основании которых разрабатывается программа инженерно-геологических работ. Так, для массивов, сложенных дисперсными породами, к таким факторам относятся физико-механические и деформационные свойства, физико-географические условия среды, температурный режим и содержание органического вещества. Тем не менее, в ходе исследования было показано, что к таким факторам также относятся структура массива и избыточное поровое давление, развивающееся в отходах флотации. Степень влияния этих факторов на устойчивость массива можно оценить в ходе мониторинговых наблюдений при возведении отвального сооружения.

На основании анализа геомеханических процессов в проектируемом отвале ЦОФ «Печорская» была обоснована необходимость создания расширенной сети мониторинга. Для анализа были выполнены геомеханические расчёты устойчивости с учётом изменения НДС массива. Расчёты необходимы для решения двух задач. Во-первых, расчёты позволили выполнить оценку процессов консолидации пород, а именно отходов флотации, складированных в секциях, и влияние консолидации на параметры устойчивости. Во-вторых, была изучена возможность развития избыточного порового давления и особенности его формирования. По различным данным, до 15% оползней на отвалах вызвано возникновением избыточного порового давления в отсыпанных техногенных породах [32]. Измерение порового давления позволяет устанавливать закономерности протекания гидрогеомеханических процессов в массиве и производить оценку максимальной высоты сооружения и наиболее слабые участки. На основании результатов расчетов были сформулированы основные положения, требующие учёта и реализации при мониторинге объектов, подобных отвалам ЦОФ «Печорская».

4.2 Прогноз напряженно-деформированного состояния отвала при совместном размещении отходов углеобогащения

Для обоснования мероприятий по мониторингу состояния отвала на основании полученных результатов лабораторных исследований отходов углеобогащения, представленных в главе 3, был выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния массива. Прогноз должен основываться на результатах геомеханических расчётов устойчивости, выполняемых с учётом изменения НДС системы «отвал-основание» на базе инженерно-геологической модели исследуемой природно-техногенной системы, отражающей его структуру и свойства. В рамках исследования требовалось оценить влияние порового давления на устойчивость массива и спрогнозировать деформаций при уплотнении отвальной массы как на промежуточные, так и конечное положение. Для этого была построена численная модель прогноза НДС отвальной массы. Элементы модели обладают различным деформационным поведением и различными значениями характеристик физико-механических и фильтрационных свойств.

В рамках расчётной схемы был построен профиль отвала, в наибольшей степени отражающий инженерно-геологическое строение массива (рисунок 4.1), соответственно, задача решалась в плоской постановке. Отвал включает 1 ярус высотой 30 м и последующие ярусы высотой по 15 м. Угол откоса ярусов отвала принят равным 35° . Ширина бермы безопасности – 25 м. Было смоделировано три яруса отвала с подобными геометрическими параметрами. В основании отвала находятся суглинки пылеватые с относительно низкими прочностными характеристиками и подстилающие их пески от пылеватых до средней крупности, характерные для всей площадки строительства ЦОФ «Печорская».

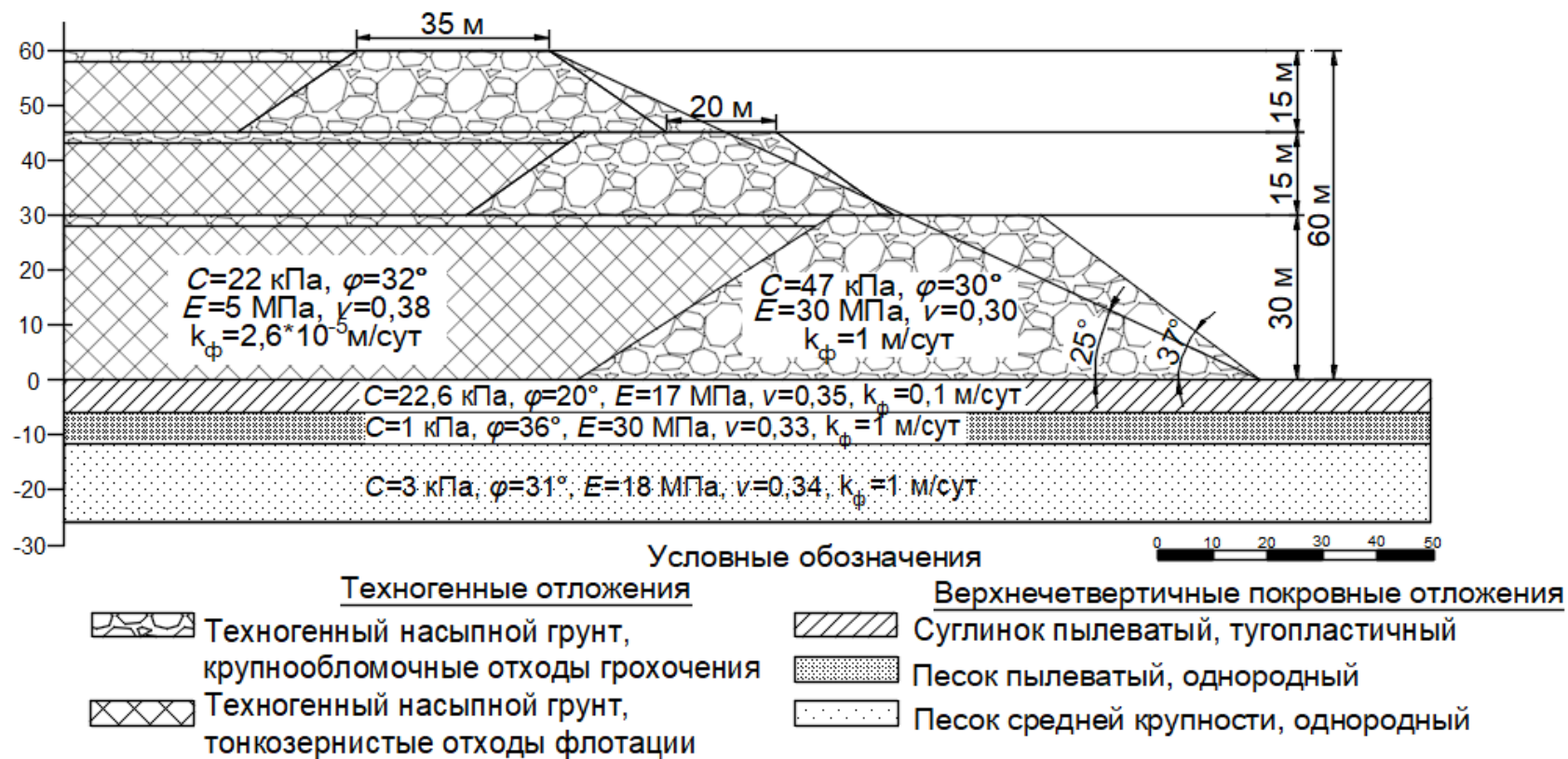


Рисунок 4.1 – Расчётная схема отвала на конец отсыпки

Для выполнения расчётов требовались следующие расчётные значения характеристик физико-механических свойств складированных пород и пород основания: удельный вес, сцепление, угол внутреннего трения, модуль общей деформации и коэффициент фильтрации. Также были определены сроки возведения сооружения и параметры нагружения ярусов.

В ходе изучения свойств отходов углеобогащения были получены значения их физико-механических свойств. Было выполнено сравнение расчётных значений и значений, приводящихся в справочной литературе для пород природного происхождения, представленное в таблице 4.1. Как видно из таблицы, значения прочностных характеристик отходов углеобогащения близки к значениям естественных пород за исключением угла внутреннего трения отходов флотации, что объясняется минералогическим составом, формой и размером частиц.

Таблица 4.1 – Сравнение значений расчетных характеристик физико-механических свойств отходов углеобогащения и пород природного происхождения

	Отходы флотации		Отходы грохочения	
	Результаты исследования	СП 22.13330.2016	Результаты исследования	СП 22.13330.2016
Угол внутреннего трения φ , градусы	32	19	30	31...34
Удельное сцепление C , кПа	22	25	47	41...45
Объемный вес γ , кН/м ³	14,6	17,6	17,5	17,1
Модуль общей деформации E_0 , МПа	5	17	-	33...44
Коэффициент поперечной деформации ν , д.е.	-	0,35...0,40	-	0,20...0,25
Коэффициент фильтрации k_f , м/сут	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	-	1-10

Помимо характеристик техногенных пород отвала, для расчёта требовались характеристики пород основания, которые были определены на основании результатов изысканий на площадке строительства отвала [112]. Расчётные

значения характеристик всех типов пород, которые описывает модель, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчётные характеристики пород для оценки устойчивости сооружения

Название материала	Объемный вес γ , кН/м ³	Модуль общей деформации E_0 , МПа	Коэффициент поперечной деформации ν , д.е.	Удельное сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения ϕ , градусы	Коэффициент фильтрации k_f , м/сут
Отходы флотации	14,6	5	0,38	22	32	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Отходы грохочения	17,5	30	0,30	47	30	1-10
Суглинок тяжелый, пылеватый, тугопластичный	20,2	17	0,35	22,6	20	0,1
Песок средней крупности, однородный	18,5	30	0,33	1	36	1
Песок пылеватый, однородный	18,9	18	0,34	3	31	1
Многолетнемерзлые породы	20	100	0,27	70	22	-

Температура пород отвала согласно термометрическим наблюдениям за отложениями первого яруса всегда выше 0° , соответственно, промерзание и наличие массивной криотекстуры в теле отвала исключалось [112].

На территории отсыпки отвала присутствует водоносный горизонт, приуроченный к четвертичным отложениям и являющийся надмерзлотными водами. Водовмещающими породами являются пески. Мощность обводнённых пород достигает 15 м, водоупором служит кровля многолетнемерзлых пород. На начало заполнения секции первого яруса гидростатический уровень был принят на высоте 0 м в относительных отметках, совпадающей с дневной поверхностью. Для расчета пьезометрической кривой на различных этапах моделирования граничные условия изменялись соразмерно с наращиванием высоты сооружения, а именно, пьезометрическая кривая совпадала с фактической высотой отсыпанных отходов флотации на текущем этапе. Транспортные валы, сложенные отходами грохочения,

рассматриваются как не обводненный массив – вода, попадающая в массив при отжатия из отходов флотации, быстро удаляется. Было принято допущение о полном водонасыщении отходов флотации, фильтрация происходит как в боковые оградительные валы, так и в основание.

На основании анализа серии космоснимков были определены темпы возведения транспортных валов и заполнения секций материалом. Отсыпка отвала ведётся зонально, т.е. после формирования нескольких секций происходит их заполнение отходами флотации, затем начинается формирование следующих секций текущего яруса. Возведение первого яруса происходило в течение первых 5 лет эксплуатации, однако эксплуатация одной зоны, включающей несколько карт, длится год. Время заполнения секций принимается равным 6 месяцам. После заполнения происходит пересыпка секции слоем шлака мощностью 2 м. Формирование транспортных валов 2-го яруса обычно начинается по прошествии нескольких лет после завершения формирования первого яруса. Участок транспортного вала 2-го яруса может быть отсыпан за 2 месяца. Далее происходит заполнение секции отходами флотации (6 месяцев).

На базе созданной расчётной модели в программном комплексе Plaxis 2D были выполнены расчёты устойчивости и консолидации методом конечных элементов. Данное программное обеспечение позволяет решать задачу оценки и прогноза изменений во времени НДС массива на различных этапах строительства сооружения с учетом вероятных деформаций [170].

Для определения устойчивости применялся метод снижения прочности. Коэффициент устойчивости k_y в соответствии с этим методом определяется как отношение реальной прочности к вычисленной минимальной прочности, обеспечивающей равновесное состояние. Принцип метода снижения прочности при анализе устойчивости состоит в том, чтобы понижать значения c и φ , применяя определенный коэффициент R , до момента потери устойчивости [170]. Прогноз потери устойчивости выполняется с одновременным понижением обоих показателей сдвиговой прочности (4.1, 4.2):

$$c_k = \frac{c}{R}; \quad (4.1)$$

$$tg\varphi_k = tg\varphi/R, \quad (4.2)$$

где R - коэффициент снижения прочности на сдвиг.

С учетом рекомендуемых значений коэффициента запаса устойчивости k_y для подобного типа сооружений, а также на основании проведенных расчетов было установлено, что устойчивость откосов отвала обеспечивается с коэффициентом запаса не ниже нормативного $k_y = 1,20$ [2].

Разработанная модель состоит из 8 расчетных шагов, приведенных в таблице 4.3, в ходе которых моделируется один из этапов отсыпки отвала. После каждого шага моделируется этап консолидации. За начальное состояние принимался отвал, состоящий из одного яруса с заполненными секциями. На втором расчетном шаге моделируется изменение НДС отвала при заполнении секций 1-го яруса и пересыпка её шлаком. На третьем – перерыв в отсыпке отвала на данном участке. Далее шаги по отсыпке транспортных валов и заполнению секций повторялись для 2-го и 3-го ярусов. После каждого шага консолидации оценивалась величина избыточного порового давления и выполнялся расчет k_y .

Таблица 4.3 – Расчетная схема длительности этапов отсыпки отвала

Номер расчетного шага	Содержание этапа	Длительность этапа
1	Отсыпка транспортных валов 1-го яруса	
2	Заполнение секции 1-го яруса отходами флотации	6 месяцев
3	Перерыв в отсыпке отвала	1 год
4	Отсыпка транспортных валов 2-го яруса	2 месяца
5	Заполнение секции 2-го яруса отходами флотации	6 месяцев
6	Перерыв в отсыпке отвала	1 год
7	Отсыпка транспортных валов 3-го яруса	2 месяца
8	Заполнение секции 3-го яруса отходами флотации	6 месяцев

Максимальные величины избыточного порового давления и коэффициенты запаса устойчивости на различных этапах отсыпки сооружения приведены в

таблице 4.4. На рисунке 4.2 представлены графики изменения величины избыточного порового давления и k_y по мере наращивания высоты отвала.

Таблица 4.4 – Результаты расчета значений избыточного порового давления и k_y на разных этапах отсыпки (* – k_y ниже нормативного, массив в предельном состоянии)

Этап отсыпки отвала		Относительная отметка высоты отвала, м	Максимальное значение избыточного порового давления, кПа	Коэффициент запаса устойчивости откоса отвала
1	Отсыпка транспортных валов 1-го яруса	30 м	0	1,50
2	Заполнение секции 1-го яруса отходами флотации		77	1,50
3	Перерыв в отсыпке отвала		56	1,50
4	Отсыпка транспортных валов 2-го яруса	45 м	220	1,20
5	Заполнение секции 2-го яруса отходами флотации		190	1,23
6	Перерыв в отсыпке отвала		100	1,27
7	Отсыпка транспортных валов 3-го яруса	60 м	280	1,03*
8	Заполнение секции 3-го яруса отходами флотации		240	1,05*

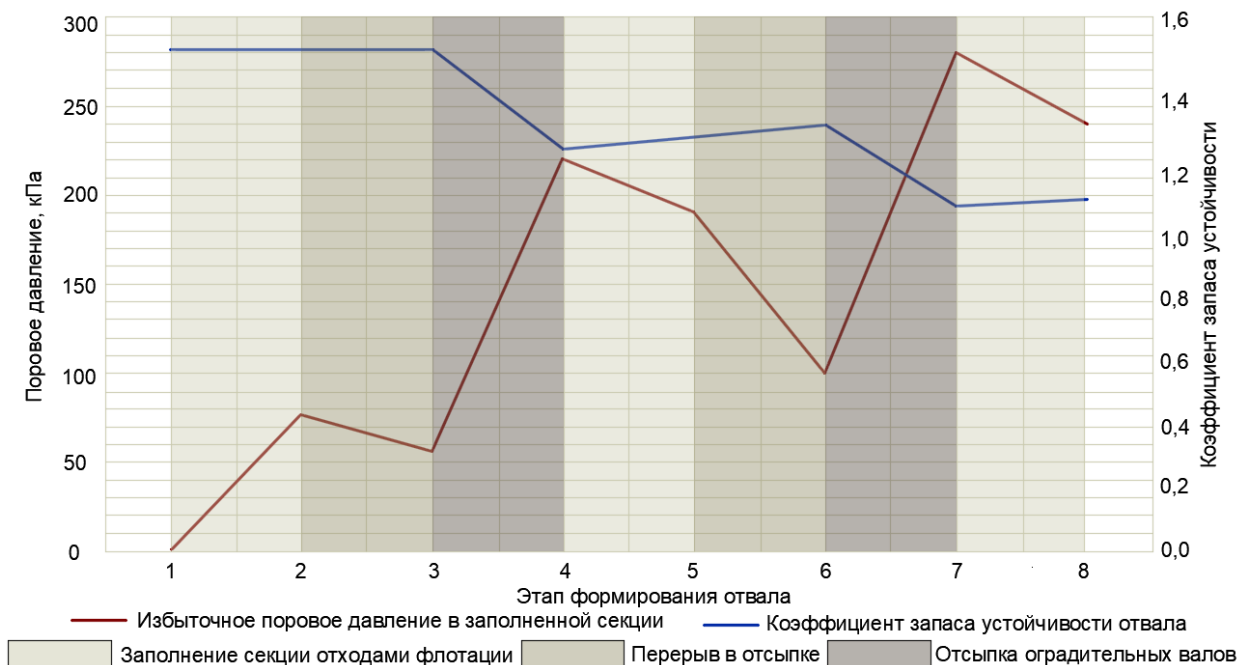


Рисунок 4.2 – Изменение значений коэффициента запаса устойчивости в зависимости от величины избыточного порового давления

Из приведённых значений видно, что k_y уменьшается при наращивании высоты сооружения. Так, на этапе формирования второго яруса отвала

устойчивость сооружения обеспечивается с k_y выше нормативного. После завершения отсыпки третьего яруса устойчивость не обеспечивается, $k_y < 1,20$. На рисунке 4.3 показано расположение наиболее вероятной поверхности скольжения на двух этапах. На рисунке видно, что деформации затрагивают значительную область массива, в том числе породы основания.

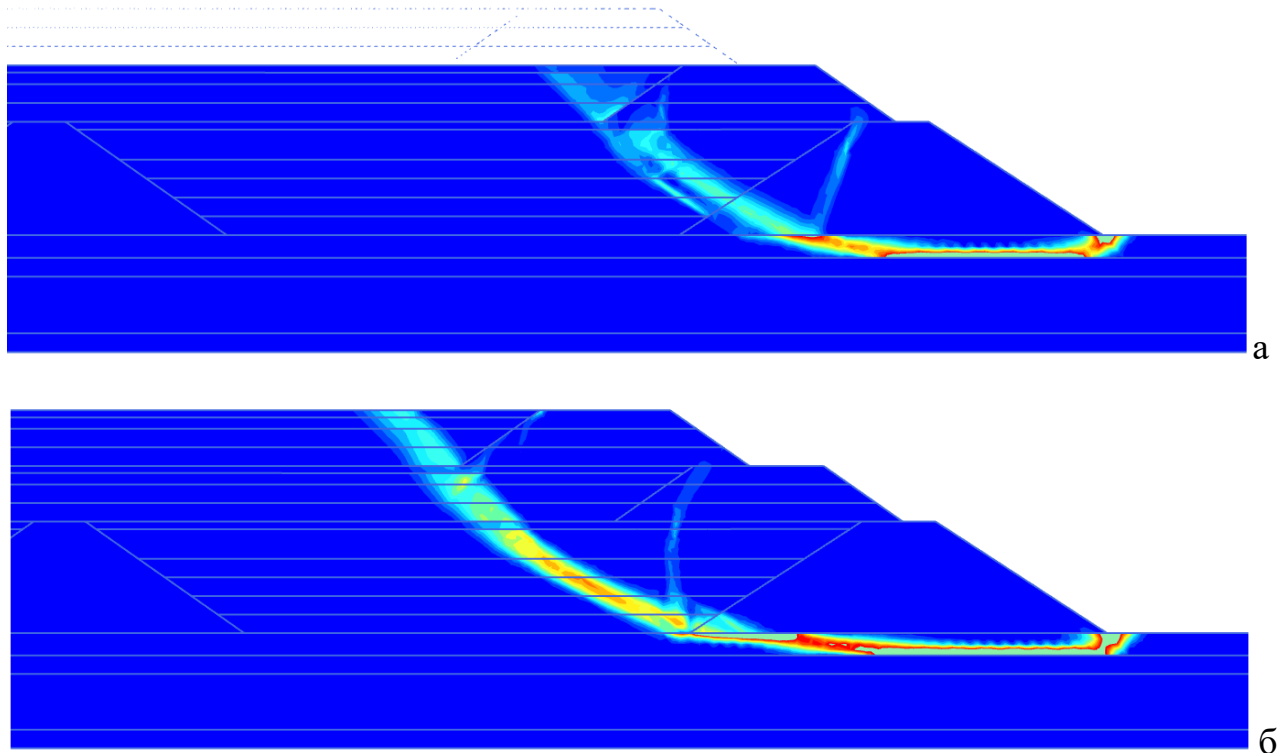


Рисунок 4.3а – Положение наиболее вероятной поверхности скольжения после отсыпки 2-го яруса при $k_y=1,23$ (а) и после отсыпки 3-го яруса при $k_y=1,03$ (б)

Результаты показывают, что в результате уплотнения массива после отсыпки третьего яруса максимальная величина вертикальных деформаций составит 2 м на участке оградительного вала верхнего яруса. При этом максимальные горизонтальные деформации, которые в большей степени связаны с устойчивостью массива, реализуются в верхней части ограждающего вала первого яруса и составляют 0,60 м (рисунок 4.4).

Соответственно, требуются наблюдения за состоянием этого участка массива посредством регистрации горизонтальных перемещений техногенных отложений в пределах призмы возможного оползания, по скорости развития которых можно выявить состояние, предшествующее нарушению устойчивости.

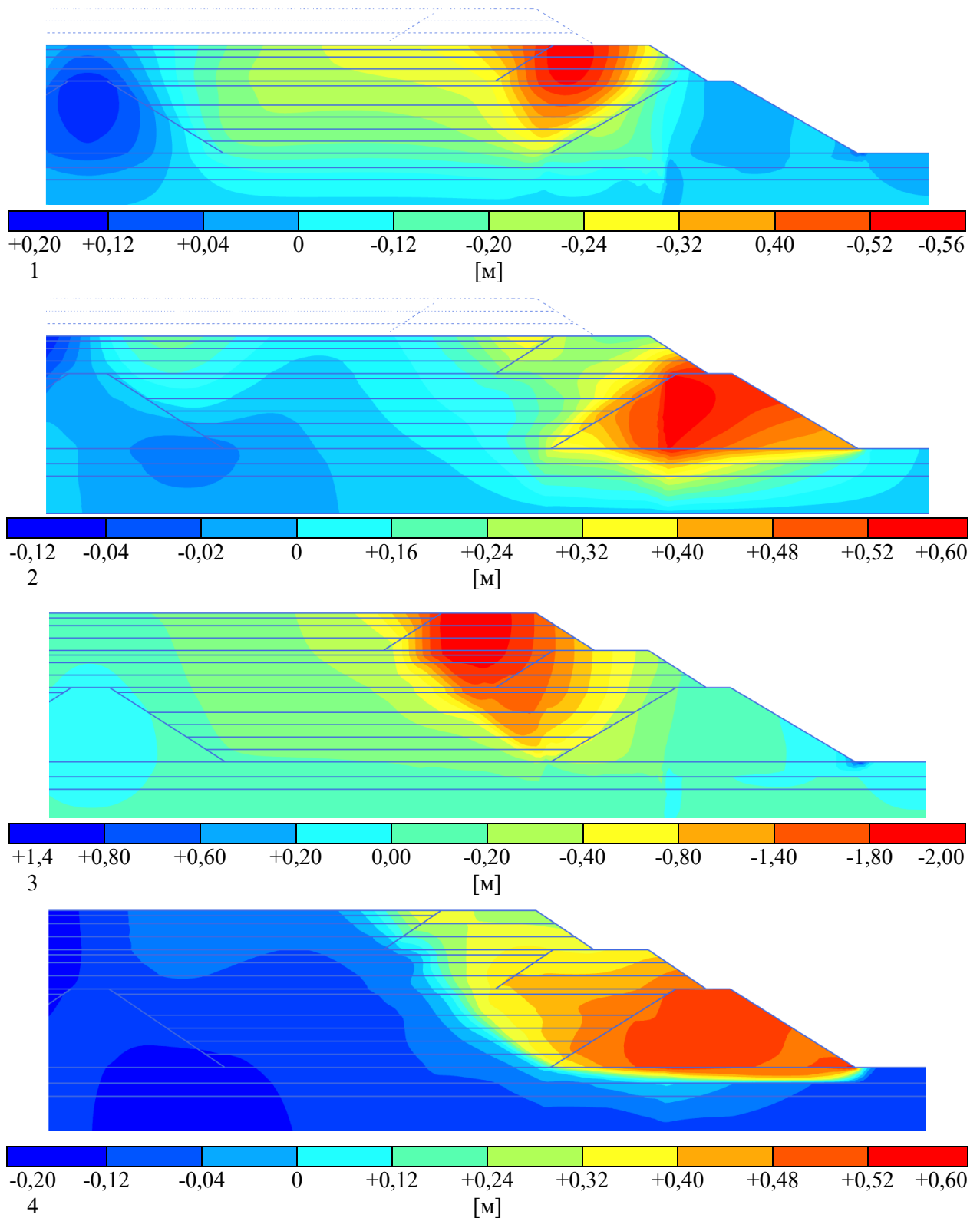


Рисунок 4.4 – Величина деформаций на различных этапах отсыпки отвала; 1– вертикальные деформации после отсыпки 2-го яруса; 2 – горизонтальные деформации после отсыпки 2-го яруса; 3 – вертикальные деформации после отсыпки 3-го яруса; 4 – горизонтальные деформации после отсыпки 3-го яруса

На рисунке 4.5 представлена эпюра распределения горизонтальных полных напряжений по глубине в том участке массива, где ожидается максимальное проявление горизонтальных деформаций, а именно в оградительном валу первого яруса на момент завершения отсыпки отвала. Из графика видны различия в характере деформаций техногенных пород и пород основания.

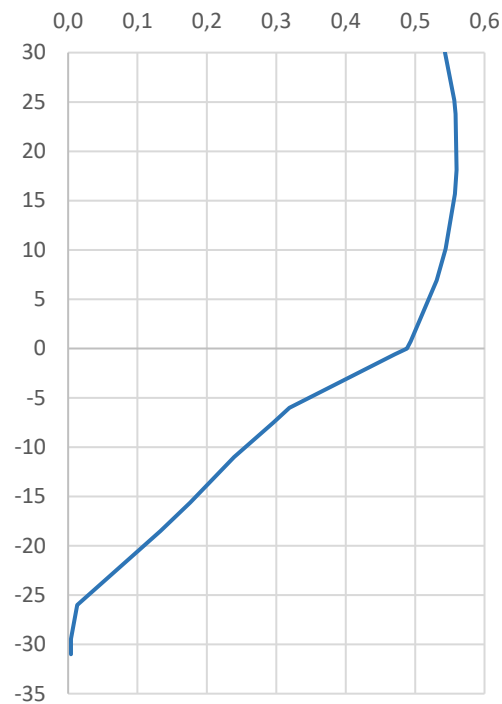


Рисунок 4.5 – Эпюра распределения вертикальных полных напряжений в оградительном валу первого яруса.

Наибольшее влияние на состояние массива, сложенного слабопроницаемыми водонасыщенными породами, оказывает избыточное поровое давление. Расчет устойчивости отвала с учетом процессов консолидации показывает, что при интенсивном наращивании высоты сооружения в слабопроницаемых отходах углеобогащения, находящихся в нижних частях отвала, может формироваться избыточное поровое давление, которое увеличивает время до завершения консолидации массива и оказывает влияние на его устойчивость. При этом, как видно из расчетов, представленных в таблице 4.4, наибольший рост избыточного порового давления и наиболее неустойчивое состояние характерно для этапа возведения транспортных валов.

Результаты исследования показывают, что после перерывов в отсыпке отвала длительностью год (расчетные шаги 3 и 6), избыточное поровое давление уменьшается на 28% и 48%. Из этого можно сделать вывод о значительном влиянии схемы отсыпки и интенсивности наращивания высоты отвала на состояние массива. Влияние избыточного порового давления доказывает локализация его максимальных значений в первом ярусе отвала внутри призмы возможного оползания после завершения отсыпки отвала, что видно из расчетных схем (рисунок 4.6).

Рассеивание порового давления происходит путем отжатия воды как в горизонтальном направлении через ограждающие валы, так и через слой крупнообломочного шлака, разделяющий ярусы и ячейки. Следовательно, благодаря такой конструкции отвала и пересыпке ярусов шлаковым материалом рассеивание порового давления происходит интенсивнее.

Согласно расчетам, на момент завершения строительства отвала максимальная достигнутая величина избыточного порового давления составляет 240 кПа и локализована в секции первого яруса. На рисунке 4.3 (в) показано, что данная зона связана с горизонтальной проекцией транспортных валов 2 и 3 ярусов. Следующим этапом моделирования стала оценка диссипации избыточного порового давления в этой зоне после завершения отсыпки отвала. За начальное состояние был принят момент завершения отсыпки третьего яруса. Расчеты показали, что сформированное в ходе отсыпки избыточное поровое давление полностью рассеивается в течение 7 лет, при этом k_y пропорционально увеличивается и достигает нормативных значений (рисунок 4.7).

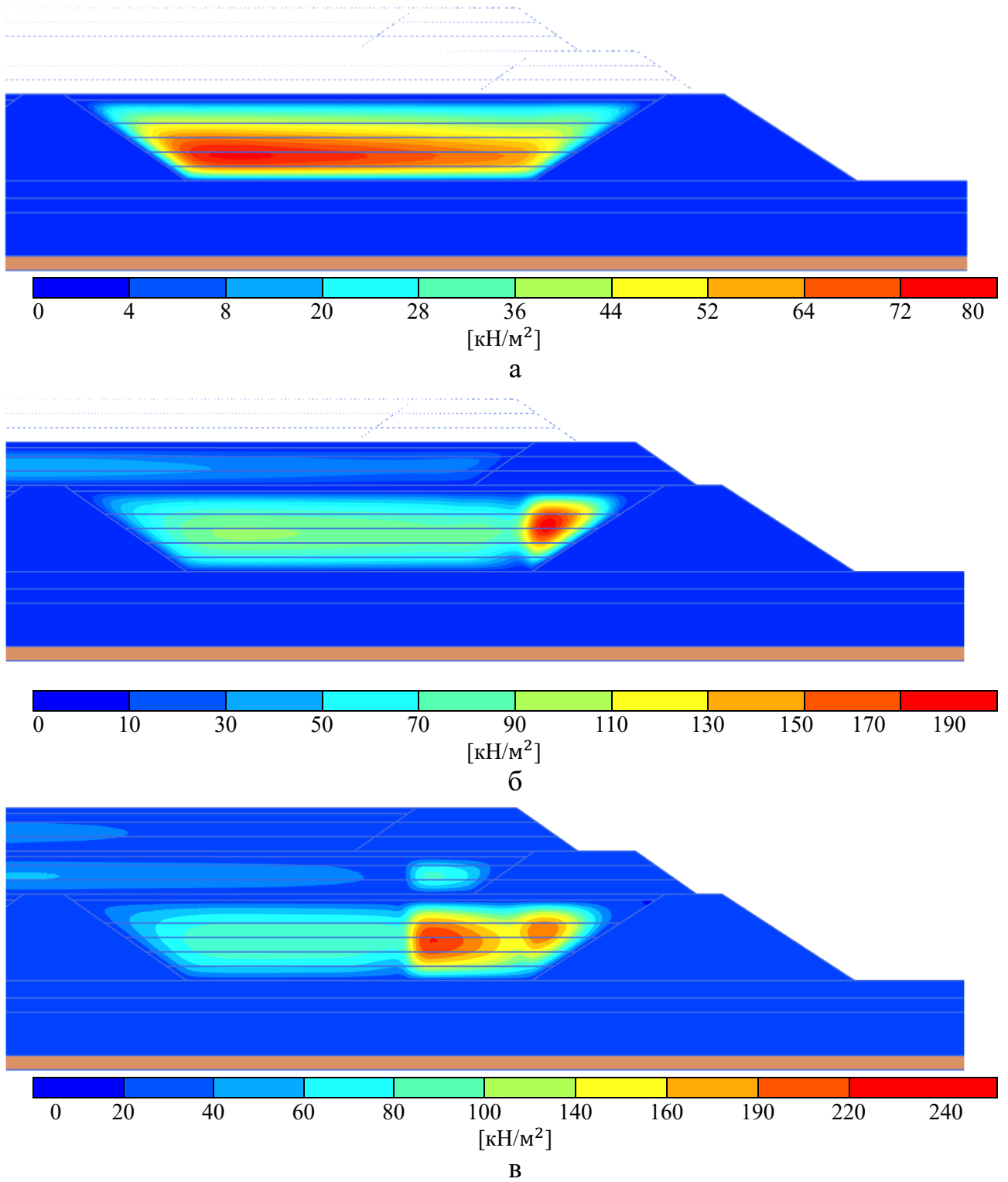


Рисунок 4.6 – Распределение избыточного порового давления в теле отвала в ходе формирования первого (а), второго (б) и третьего (в) ярусов

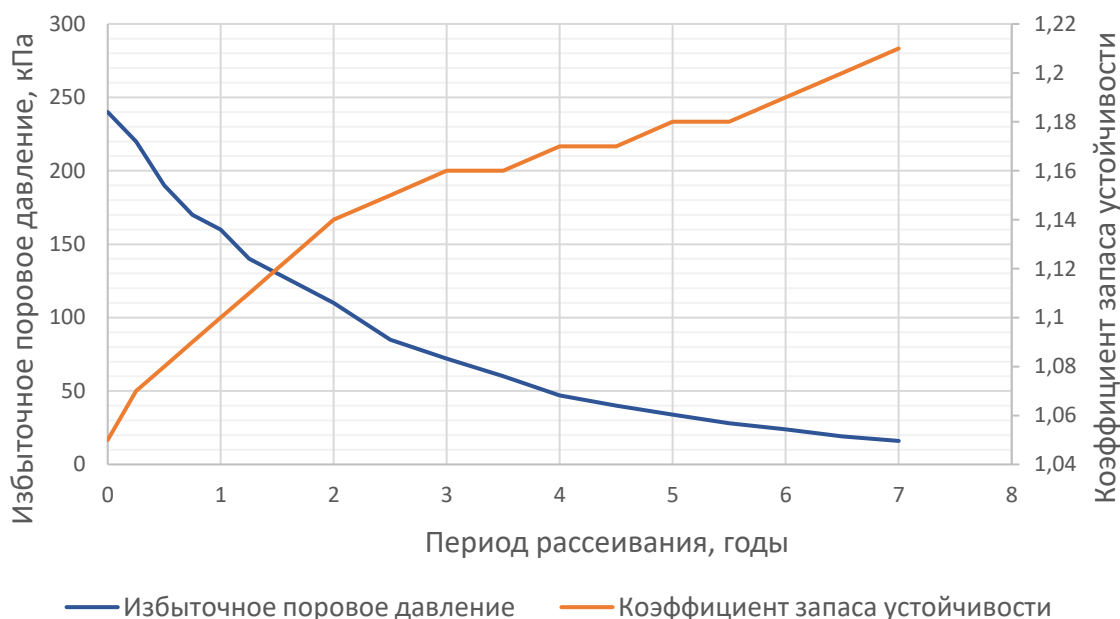


Рисунок 4.7 – График рассеивания избыточного порового давления после завершения отсыпки третьего яруса отвала

Выполненные исследования показывают, что конструктивные особенности отвалов углеобогащения, а именно создание секций, заполняемых тонкодисперсным материалом, обладающим специфическими свойствами, в значительной степени определяют параметры массива и, в частности, параметры устойчивости. Следовательно, при наращивании высоты отвала, сложенного слабопроницаемыми отходами флотации угля, существует необходимость контроля процесса рассеивания избыточного порового давления, возникающего в первом ярусе отвала и необходимо осуществлять контроль состояния не только откосов, но всего массива. Кроме того, техногенные породы характеризуются изменением свойств во времени, фракционированием и гравитационным уплотнением, что приводит к формированию различающихся по физико-механическим свойствам зон. Протекание сложных геомеханических процессов в отвалах отходов углеобогащения также доказывает необходимость создания расширенной сети мониторинга.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности совершенствования существующей системы мониторинга отвальных сооружений для обеспечения непрерывного контроля состояния и свойств массива, оценки

интенсивности протекающих процессов и предупреждения возникновения неблагоприятных ситуаций. Эффективность такого контроля обеспечивается путём применения всех доступных методов мониторинга, выбранных в соответствии с особенностями объекта и спецификой его поведения в процессе эксплуатации.

4.3 Комплексный мониторинг объектов складирования отходов углеобогащения

Состав любой системы мониторинга определяется, прежде всего, объектом мониторинга. Соответственно, структура мониторинга природных или природно-технических систем индивидуальна для каждого объекта и должна обосновываться параметрами объекта. В соответствии с этим актуальным является анализ научно-методических разработок в теории мониторинга ПТС и создание функциональной схемы мониторинга для обеспечения «сухого» складирования отходов углеобогащения, представляющего собой, согласно В. А. Королеву, частный тип литотехнического мониторинга.

Первым этапом мониторинга является анализ накопленной в ходе предыдущих исследований информации – предпроектных и проектных работ, включающих как инженерно-геологические изыскания на территории складирования отходов углеобогащения, так и лабораторные исследования их физико-механических свойств.

Анализ существующего опыта контроля состояния и свойств отвалов позволяет выделить четыре основных направления мониторинга:

- деформационный мониторинг;
- эксплуатационный контроль;
- гидрогеологический мониторинг;
- инженерно-геологический мониторинг.

4.3.1 Деформационный мониторинг

Под деформационным мониторингом понимается определение возможных процессов и явлений, которые могут приводить к неустойчивости массива, а также

организация наблюдательной сети, охватывающей земную поверхность, инженерные и горнотехнические сооружения на территории горного отвода, для снижения риска развития опасных деформаций [18]. Деформационный мониторинг, выполняемый маркшейдерской службой, представляет собой строго необходимый этап работ, так как его результаты применяются для оценки устойчивости сооружения. В качестве базового метода мониторинга в нормативных документах рассматриваются маркшейдерские визуальные и инструментальные наблюдения. Однако современные технологии позволяют использовать комплекс методов (лазерное сканирование, автоматизированные системы мониторинга, дистанционное зондирование), повышающих эффективность мониторинга. Тем не менее, в действительности же использование комплекса методов ограничено финансовыми возможностями, являющимися определяющим фактором при выборе программы мониторинга. Необходимость совершенствования систем деформационного мониторинга объясняется как всё большим развитием технологий и расширением спектра технических возможностей, так и повышением сложности объектов, в случае отвалов – наращиванием высоты сооружений.

Объем и содержание маркшейдерских работ определяется сложностью объекта. Так, при мониторинге сложных объектов делается выбор в пользу автоматизированных и дистанционных методов, в то время как для простых объектов визуальных наблюдений может быть достаточно. Автоматизированные системы заменяют ручной мониторинг с целью снижения рисков там, где безопасность является приоритетом, ручной мониторинг является трудоёмким, требует больших затрат и не исключает возникновения ошибки.

Объекты складирования отходов углеобогащения, подобные отвалу ЦОФ «Печорская», можно отнести к объектам средней сложности. Подобные объекты требуют организации системы комплексного мониторинга, включающей визуальные и наземные инструментальные измерения. В случае невозможности реализации стандартной маркшейдерской съёмки требуется применение GPS/ГЛОНАСС-технологий.

Применение традиционных методов подразумевает привязку и нивелирование реперов к ближайшим пунктам сети триангуляции. Методика определения начального положения реперов наблюдательной станции детально изложена в «Методических указаниях по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, и интерпретации их результатов, и прогнозу устойчивости» [75]. При активизации деформационных процессов интервалы между сериями наблюдений сокращаются до нескольких недель и даже дней, а при наблюдении критических деформаций, свидетельствующих об обрушении массива, интервалы сокращаются до нескольких часов. Таким образом, по мере накопления данных наблюдений проекты наблюдательных станций и периоды наблюдений могут изменяться в соответствии с наблюдаемыми условиями.

Для наблюдения за процессами сдвижения рекомендуется комбинировать традиционные методы маркшейдерской съёмки и глобальные навигационные спутниковые системы, с помощью которых производится тахеометрическая съёмка или съёмка системой GPS/ГЛОНАСС в режиме «кинематика».

Таким образом, на основании инструментально полученных значений производится оценка параметров, определяющих деформационные процессы в массиве:

- определение вертикальных и горизонтальных смещений между соседними реперами;
- определение абсолютных значений вертикальных, горизонтальных и общих смещений;
- определение направлений смещений;
- определение скоростей смещения и изменение скоростей;
- определение зоны распространения деформаций.

На основании вышеперечисленной информации производится оценка устойчивости откосов отвала и составляется прогноз возможных деформаций.

Для повышения информативности деформационного контроля состояния отвала рекомендуется оборудование автоматизированных систем деформационного мониторинга состояния породного массива, предназначенных

для определения глубинных послойных горизонтальных смещений пород в массиве горных пород с помощью стационарных инклинометров, устанавливаемых в наблюдательные скважины и предназначенных для дистанционных автоматизированных измерений поперечных смещений в стволе вертикально ориентированной скважины.

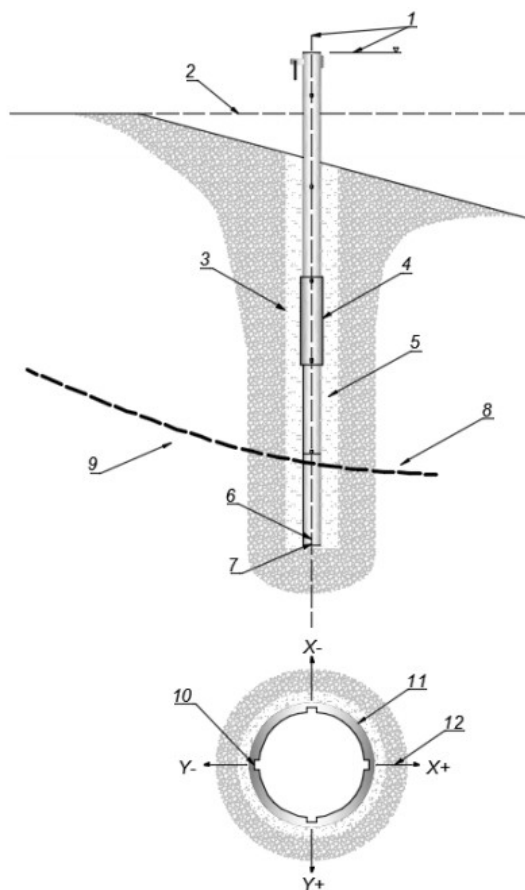
Внешний вид измерительного модуля стационарного скважинного инклинометра приведен на рисунке 4.8 (производство ООО «СПС», Россия).



Рисунок 4.8 - Внешний вид стационарного скважинного инклинометра

Схематичный вид оснащенной скважины, подготовленной для установки и монтажа инклинометров, приведен на рисунке 4.9. После бурения скважины устанавливаются специальные направляющие трубы, обеспечивающие правильное позиционирование стационарных инклинометров. Измерения осуществляются по двум взаимно перпендикулярным плоскостям вдоль осей X и Y. Измеренные величины характеризуют отклонение зонда инклинометра от вертикального положения вдоль соответствующей оси. Единицы измерений – градусы.

Контроль всех измерений с помощью цифрового скважинного инклинометра, сравнение последовательно полученных профилей инклинометрической скважины позволяют определить глубину, направление, величину и скорость горизонтального смещения контролируемого породного массива.



1 – точка, положение которой контролируется геодезическим методом; 2 – уровень поверхности земли; 3 – стенка скважины; 4 – телескопическая секция; 5 – раствор, заполняющий полость между стенкой скважины и инклинометрической колонной труб; 6 – реперная точка; 7 – нижняя заглушка; 8 – область массива, подверженная деформациям; 9 – стабильная область массива; 10 – пазы для инклинометра; 11 – направляющая труба; 12 – направление измерений.

Рисунок 4.9 – Скважина, оснащенная направляющими трубами для установки инклинометров

Для автоматизации процесса измерений и передачи информации в центр мониторинга используются электронные регистраторы, которые считывают данные инклинометров с заданной периодичностью, записывают во внутреннюю память и передают данные на сервер. Данные сохраняются в базе данных с последующей обработкой и визуализацией в специализированном программном обеспечении.

Автоматизированные системы деформационного мониторинга на отвале отходов углеобогащения создаются в дополнение к сети геодезических пунктов, предназначенных для контролирования с определенной периодичностью вертикальных и горизонтальных смещений, происходящих в массиве. По скорости

этих смещений можно выявить состояние, предшествующее образованию опасных деформаций.

На отвале Печорской ЦОФ целесообразно ограничиться созданием одной инклинометрической скважины на первом ярусе отвала. Для получения наиболее показательных данных о состоянии массива по величинам горизонтальных смещений скважина должна располагаться в центральной части призмы возможного оползания откоса оградительного вала. Устройство инклинометрических скважин во втором и третьем ярусах отвала вследствие больших горизонтальных деформаций, которые были оценены в ходе численного моделирования, невозможно.

4.3.2 Эксплуатационный контроль

Эксплуатационный контроль состояния отвалов, или упрощенные маркшейдерские наблюдения, производят на участках, где ранее были выявлены визуальные признаки нарушения устойчивости – трещины, осыпи, обвалы и просадки (рисунок 4.10).

На подобных участках создавать постоянную наблюдательную станцию экономически нецелесообразно, так как скорость возникновения деформаций высока. В этом случае вне зон закола устанавливаются временные реперы, представляющие собой деревянные колья. Также необходимо производить мониторинг раскрытия трещин, который выполняется путем установки парных реперов, находящихся по разные стороны от трещины и скрепленные мерными лентами. При развитии деформаций, система наблюдения может быть оборудована сигнализацией на случай возникновения критических деформаций.

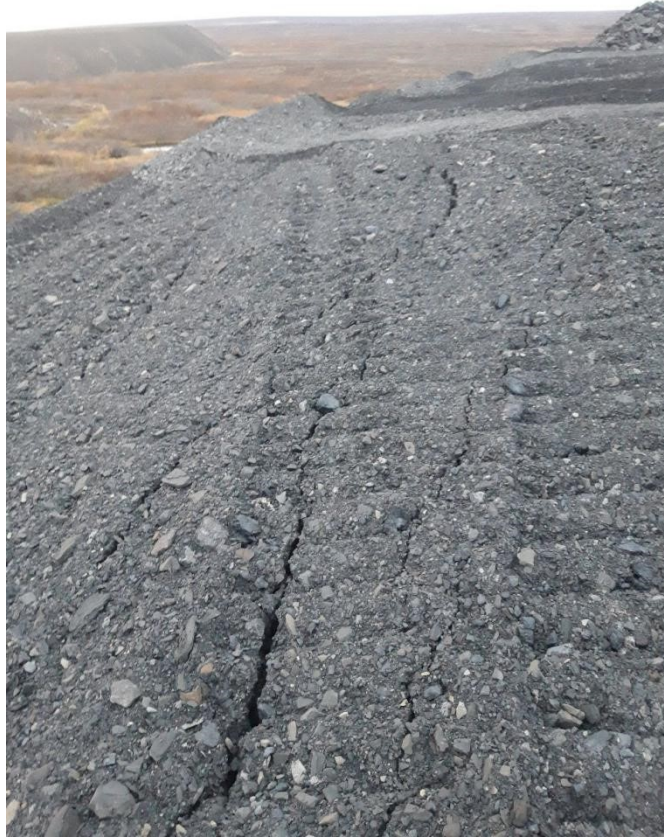


Рисунок 4.10 – Вызванные уплотнением массива деформации первого яруса отвала, наблюдаемые в ходе визуального осмотра отвала Печорской ЦОФ

4.3.3 Гидрогеологический мониторинг

Гидрогеологический мониторинг является наиболее важным этапом работ в рамках мониторинга безопасности на объекте. Это обусловлено, прежде всего, зависимостью между свойствами складированных пород, гидрогеологическими условиями и устойчивостью массива. Зачастую наблюдаются существенные различия между проектными и фактическими условиями на объекте исследования. Так, утверждённые проектные решения по обеспечению устойчивости откосов отвалов основываются на результатах испытаний физико-механических свойств пород и геофильтрационных расчётах. Однако проектные решения могут не соответствовать реальным условиям вследствие недоизученности физико-механических свойств пород или нарушения работы системы водоотведения. В связи с этим на объектах складирования отходов обогащения зачастую наблюдается ситуация возникновения в массиве постоянного или временного

водоносных горизонтов, что оказывает влияние на устойчивость отвального сооружения. Так, на откосах первого яруса отвала Печорской ЦОФ, отсыпка которого происходит, наблюдаются локальные склоновые деформации, которые, вероятнее всего, связаны с геофильтрационными характеристиками массива, которые не были учтены (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Локальные деформации первого яруса отвала ЦОФ «Печорская» в виде конусов выноса

В связи с этим на объекте следует организовать систему гидрогеомеханического мониторинга, позволяющую получать данные о строении отвального сооружения, фактическом положении уровня подземных вод в массиве и распределении напоров в основании. Данные, полученные посредством проведения полевых, лабораторных исследований и буровых работ, используют для калибровки и верификации численной модели напряженно-деформированного состояния массива. Наблюдения за состоянием различных отвальных сооружений и результаты геомеханического моделирования доказывают необходимость уточнения свойств пород в среднем каждые 4-5 лет [129]. Создание численной модели массива является необходимой частью гидрогеологического мониторинга, позволяющей делать выводы об изменчивости свойств и состояния массива и

производить оценку устойчивости склонов. С помощью актуальной модели отвала, калибруемой на основании данных мониторинга, определяются критерии безопасности – предельные значения показателей состояния сооружения, обеспечивающие необходимый коэффициент запаса устойчивости откоса, критическое изменение которых ведёт к возникновению опасных геологических процессов и явлений.

Особую опасность для устойчивости отвалов представляет избыточное поровое давление, которое развивается в нижней части отвала под действием собственного веса в породах, характеризующихся коэффициентом фильтрации $K < 10^{-5}$ м/сут. Поровое давление возникает при коэффициенте водонасыщения пород 0.8-0.6, сохраняется на протяжении долгого периода времени и затрудняет эксплуатацию отвала [62]. Так, деформации отвалов, изученные на примерах отвала Кузбасса, свидетельствуют, что одной из основных причин возникновения оползней является поровое давление [49]. Поровое давление уменьшает величину осадки, параметры сопротивления сдвигу и, соответственно, параметры прочности.

Доказано, что закономерности формирования порового давления в отвалах водонасыщенных пород отличаются от классических процессов фильтрационной консолидации [64]. Процесс выравнивая порового давления зависит от фильтрационных особенностей пород. В большинстве случаев отвалы отходов углеобогащения характеризуются неоднородными, изменяющимися во времени за счет уплотнения свойствами. Было установлено, что в основании отвала целесообразно выделять три зоны: сжатия (консолидации), влияния и промежуточную. В первой зоне возникновение порового давления обусловлено нагрузкой от складированных пород. В этой зоне происходит уплотнение пород, уменьшение пористости и влажности, возрастание плотности и прочностных свойств. В других зонах возникают обратные процессы, связанные с постепенным рассеиванием порового давления, зона влияния становится зоной разуплотнения, где чаще всего происходит разгрузка массива. Исследования показывают, что ненагруженная часть основания с течением времени попадает в зону влияния отвальных сооружений, в связи с чем принципиально важным становится изучение

напряженного состояния пород в ненагруженных частях основания, определение границ зоны влияния и максимального порового давления.

Расчеты, результаты которых описаны в разделе 4.2, показывают, что процесс образования и рассеивания избыточного порового давления в значительной степени оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние отвалов исследуемых отходов углеобогащения, объемы вертикальных деформаций и физико-механические свойства слагаемых массив отложений. Следовательно, прогноз состояния отвала должен основываться в том числе и на сопоставлении текущих значений порового давления в различных участках массива с расчётными критическими значениями.

В связи с этим как часть гидрогеологического мониторинга в схему мониторинга отвалов углеобогащения предлагается включить организацию наблюдательной сети из датчиков порового давления в различных точках массива и его основания. Наблюдения за изменениями порового давления рекомендуется производить путём помещения необходимого количества датчиков на различной глубине в специально оборудованные скважины, расположенные в наиболее неблагоприятных условиях, а также автоматизированные устройства для считывания показаний датчиков, хранения и передачи данных. Расположение наблюдательной сети продемонстрировано на рисунке 4.12.

Наблюдательная сеть создается по мере отсыпки отвала и охватывает все три яруса, на каждом из которых организуется автоматизированная система мониторинга порового давления.

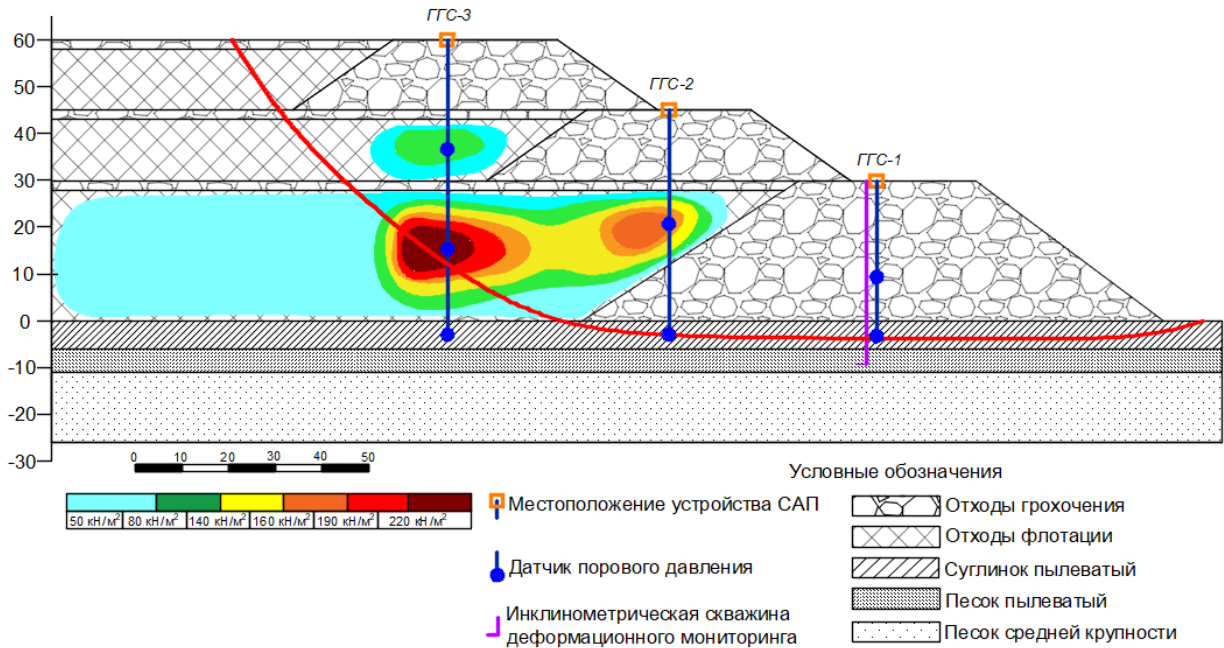


Рисунок 4.12 – Схема наблюдательных скважин для контроля развития избыточного порового давления

Глубина заложения сети определяется положением призмы возможного оползания, в связи с чем первый датчик устанавливается ниже предполагаемой поверхности скольжения, то есть в четвертичных породах основания на глубине более 6 м, для регистрации фоновых значений после отсыпки первого яруса. Согласно расчётной схеме, поверхность скольжения проходит через породы основания, представленными суглинками, в которых также может развиваться избыточное поровое давление при интенсивном нагружении. Это обуславливает необходимость установки датчиков порового давления в четвертичных породах основания в каждой из трёх проектируемых скважин на глубине 2 м. Бурение скважины 2 происходит после отсыпки 2-го яруса. При этом скважина должна быть заложена так, чтобы её ствол проходил через секцию первого яруса, заполненную отходами флотации, являющуюся зоной развития избыточного порового давления. Аналогично производятся работы после отсыпки 3-го яруса. Таким образом, гидрогеологические скважины, оборудованные на втором и третьем ярусах, должны быть пройдены через заполненную отходами флотации секцию, то есть зону развития избыточного порового давления, и оборудоваться датчиками порового давления внутри призмы возможного оползания.

Внешний вид датчика гидростатического давления струнного типа для удаленных измерений показан на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Датчик со встроенным термистором Soil Instruments

В автоматизированных системах мониторинга порового давления рекомендуется использовать считывающее устройство САП-1М/GSM с радиоканалом. Устройство специально разработано для мониторинга безопасности и при достижении контролируемых значений критериев безопасности посылает оператору аварийный сигнал. Внешний вид прибора показан на рисунке 4.14.

САП-1М/GSM осуществляет измерения порового давления одновременно по нескольким установленным датчикам, накопление результатов измерений и их передачу по сотовой GSM сети на базовый компьютер. Измерения могут проводиться как периодически и выполняться оператором, так и автоматически с дистанционной передачей данных диспетчеру. Интервалы измерений при автоматическом режиме составляет от 6 с до 24 ч. Устройство позволяет до нескольких месяцев считывать в автоматическом режиме показания датчиков, установленных в наблюдательной скважине, через заданные промежутки времени и запоминать их.

Результатом наблюдений должны являться графики измерения порового давления во времени и пространстве. На основании сравнения расчётных значений с полученными значениями в результате мониторинга производят корректировку параметров геомеханической модели.



а



б

Рисунок 4.14 – Периодомер скважинный автоматический САП-1М/GSM с радиоканалом в собранном виде (а) и на этапе подсоединения датчиков (б)

Наблюдательная сеть, подобная описываемой, может также служить косвенной оперативной оценкой деформации массива, так как при развитии деформаций, ведущих к нарушению устойчивости, происходит рост порового давления. Однако наблюдения за величиной избыточного порового давления должны сочетаться с инклинометрией скважин, что позволят оценивать величину деформаций и управлять состоянием массива.

Наблюдательная сеть закладывается на откосах отвала обычно на тех участках массива, где инженерно-геологические условия наиболее неблагоприятны: большая мощность техногенных пород, значительная обводненность, сложные и денудационные формы рельефа.

4.3.4 Инженерно-геологический мониторинг

Дополнительные инженерно-геологические исследования также являются обязательной частью мониторинга безопасности на отвалах в случае возникновения на откосах нарастающих деформаций. Целью исследований является уточнение строения массива в определённых участках и физико-механических свойств складированных пород. Необходимость изысканий основывается на зависимости устойчивости отвалов от состояния складированных пород. На состояние техногенных отложений оказывает влияние как их физико-механические свойства, так и условия среды. Основные изменения состояния техногенных пород происходят в первые 5 лет после отсыпки и связаны с их уплотнением, при этом до 95% величины оседания происходит в течение 6 месяцев после отсыпки и достигают 9% от общей высоты отвала. Несмотря на подобные значительные изменения в состоянии, процессы уплотнения не представляют опасности при ведении отвальных работ, в отличие от развивающихся со временем деформаций сдвига. Вследствие этого основным методом определения прочностных свойств для складированных пород является одноплоскостной сдвиг. При этом режим испытаний определяется особенностями строения массива (в случае намывных пород – консолидировано-недренированный режим, проницаемых песчаных пород – консолидировано-дренированный режим; в случае наличия большого количества глинистых частиц – неконсолидировано-недренированный режим). Лабораторные исследования должны включать испытания по определению влажности, плотности, пористости, гранулометрического состава, показателей компрессии и консолидации, сопротивления сдвигу.

Помимо проведённых исследований по определению физико-механических свойств отходов углеобогащения ЦОФ «Печорская» необходимо предусмотреть изучение параметров физико-механических свойств пород основания отвала с учётом изменения нагрузок в процессе наращивания высоты сооружения, а также дополнительные определения параметров физико-механических свойств при

изменении технологии обогащения или сырья, поступающего на фабрику, что будет влиять на формирование свойств.

При любого рода техногенной деятельности в пределах рассматриваемой территории следует учитывать следующие природные характеристики материала и особенности геокриологической обстановки:

- высокую температуру пород многолетнемерзлой толщи;
- вероятность изменения глубины деятельного слоя при нарушении естественного теплового баланса земной поверхности. При этом возможно, как увеличение его мощности за счёт оттаивания верхней части многолетней мерзлоты, так и снижение её вследствие новообразования многолетнемерзлых пород;
- возможную высокую степень водонасыщения пород слоя сезонного оттаивания в тёплый период года.

4.4 Схема мониторинга безопасности на отвалах отходов углеобогащения

На основании вышеизложенной информации была предложена схема мониторинга безопасности на отвалах отходов углеобогащения, представленная на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Схема организации мониторинга безопасности на отвалах отходов углеобогащения

Полученные по результатам мониторинга данные позволяют осуществлять моделирование состояния массива и прогнозировать изменение его состояния во времени. Расчёт устойчивости выполняется на основании разработанной гидрогеомеханической модели объекта, для разработки которой обобщается вся полученная в ходе мониторинга информация. Модель должна отражать строение и геометрию массива, свойства пород, его слагающих, а также напряжения, существующие в массиве. Результатом расчётов является коэффициент запаса устойчивости откосов. Для отвальных сооружений допустимый коэффициент запаса устойчивости принимается равным 1,20. Допустимое значение коэффициента запаса устойчивости соответствует такому коэффициенту, при котором не наблюдается опасных горизонтальных и вертикальных деформаций, свидетельствующих о процессе разрушения отвала. Так, при коэффициенте $\geq 1,20$ наблюдаются преимущественно упругие деформации, которые не нарушают устойчивость массива. Предельно допустимым коэффициентом запаса устойчивости для высоких отвалов принимается $k_y=1,10$, так как в этом случае деформации имеют затухающий характер и не ведут к возникновению неблагоприятных геологических процессов и явлений [2].

На основании установленных предельном и допустимом коэффициентах безопасности происходит обоснование критериев безопасности. Традиционно критерии безопасности разделяются на два уровня. К контролируемым показателям, влияющим на критерии безопасности, относятся параметры геофильтрационного режима (напоры и уровень воды в откосе отвала), напряженно-деформированного состояния, а также физико-механические свойства пород.

Критерии безопасности первого уровня – такие характеристики системы, при которых обеспечивается нормативный коэффициент запаса устойчивости (система стабильна, деформации носят затухающий характер, переходящий в установившуюся ползучесть). Критерии безопасности второго уровня – такие характеристики системы, при которых состояние отвала соответствует предельно допустимому коэффициенту запаса устойчивости (установившаяся ползучесть

трансформируется в прогрессирующую ползучесть, система характеризуется как квазистабильная). Критерии безопасности третьего уровня – такие характеристики системы, при которых не обеспечивается предельно допустимый коэффициент запаса устойчивости (система нестабильна и массив находится в неустойчивом состоянии).

На основании анализа изменений контролируемых показателей в ходе мониторинга безопасности на объекте исследования производится оценка состояния отвала и прогноз развития неблагоприятных процессов. Таким образом, мониторинг безопасности и использование системы разделения критериев безопасности на три уровня позволяет контролировать состояние массива с любой периодичностью за счёт уточнения и дополнения материалов инженерных изысканий. При выявлении критических напоров в массиве или напряжений, соответствующих предельному коэффициенту запаса устойчивости и влияющих на состояние массива, производится корректировка схемы отвалообразования или проводятся мероприятия, повышающие стабильность системы. Кроме того, для каждого этапа развития работ по отвалообразованию рекомендуется разрабатывать отдельные документы, в которых регламентируются количественные и качественные характеристики критериев безопасности и система управления состоянием отвала.

По результатам проведённого исследования в качестве критериев безопасности при осуществлении мониторинга предлагается использовать следующие показатели:

1. Увеличение скорости горизонтальных смещений реперов до 2 мм/сут, что свидетельствует о вероятном возникновении оползневых процессов;
2. Уменьшение значений сопротивления сдвигу пород основания относительно расчётных параметров;
3. Развитие избыточного порового давления в массиве до величины 200 кПа.

4.5 Выводы к главе 4

1. Были сформулированы цель и задачи мониторинга безопасности, необходимого для организации на объектах совместного складирования отходов углеобогащения в отвалах, определены параметры, требующие контроля, а также критерии безопасности.

2. На основе инженерно-геологической модели отвала углеобогащения ЦОФ «Печорская» было выполнено численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива. Расчёты позволили обосновать необходимость включения мероприятий по контролю развития избыточного порового давления в программу мониторинга безопасности на отвале.

3. Обоснована оптимальная и наиболее эффективная программа мониторинга, необходимая для обеспечения длительной устойчивости откосов отвала, сложенного отходами углеобогащения разных типов, и безопасного наращивания высоты сооружения. Программа подразумевает проведения комплекса мероприятий деформационного и гидрогеологического мониторинга, эксплуатационного контроля, а также дополнительные определения параметров физико-механических свойств.

4. Показаны преимущества дополнения регламентированных нормативными документами маркшейдерских наблюдений автоматизированными системами деформационного мониторинга, а именно устройством инклинометрических скважин в первом ярусе отвала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается решение научной задачи по обеспечению эффективности селективного размещения различного типа отходов углеобогащения в «сухих» отвалах.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Определены факторы, влияющие на процесс формирования состава и свойств образующихся в результате обогащения угля техногенных пород, среди которых химический и минералогический состав обогащаемой породы, применяемая схема обогащения, конструктивные особенности отвала, а также параметры нагружения.

2. Уточнены представления о процессе техногенеза пород, формирующихся из отходов углеобогащения, включающий этапы образования материала, его перемещение и изменение. Обосновано, что до складирования отходов в отвал формируются состав и начальные свойства, которые претерпевают изменения после складирования, где основным фактором преобразований пород является давление.

3. На основании лабораторных исследований выявлены отличия свойств и поведения исследованного материала и природных образований. Обосновано, что при изучении свойств отходов углеобогащения, складированных селективно, основное внимание должно уделяться отходам флотации в связи с большой вероятностью развития избыточного порового давления.

4. На основании построенной численной модели формирования «сухого» отвала и изучения свойств отходов углеобогащения выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния техногенного массива и его деформаций.

5. Разработано инженерно-геологическое обоснование безопасного и технически эффективного селективного размещения отходов углеобогащения в «сухих» отвалах, основанное на организации комплексного мониторинга объекта.

6. В качестве перспектив развития исследований по теме диссертации рассматривается применение предложенного подхода при размещении других типов отходов в отвалах, в особенности отходов флотации, подвергаемых обезвоживанию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская Федерация. Законы. Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления». – Текст электронный // Кроссплатформенная справочная правовая система КонсультантПлюс. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 05.04.2021).
2. Российская Федерация. Ростехнадзор. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов : приказ Ростехнадзора от 13.11.2020 N 439 – Москва: НТЦ ПБ, 2020. – 64 с. – Текст : непосредственный
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация / Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Текст : электронный // Общероссийский классификатор стандартов. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.05.2022)
4. ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия / Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Текст : электронный // Общероссийский классификатор стандартов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/566409062> (дата обращения 23.08.2023)
5. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения / Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Текст : электронный // Общероссийский классификатор стандартов. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 25.07.2022)
6. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик / Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Текст : электронный // Общероссийский классификатор стандартов. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.05.2022)
7. ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия / Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Текст

: электронный // Общероссийский классификатор стандартов. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.05.2022)

8. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» – Текст : электронный // Официальный сайт Министерства природных ресурсов РФ. – URL: <https://www.mnr.gov.ru> (дата обращения 01.07.2023).

9. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году». – Текст : электронный // Официальный сайт Министерства природных ресурсов РФ. – URL: <https://www.mnr.gov.ru> (дата обращения 01.07.2023).

10. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.2020 № 439 об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» 2020, 70с.

11. Абакумова, Н. В. Классификации техногенных отложений в инженерной геологии : исторический обзор, современный взгляд на проблему / Н. В. Абакумова, С. К. Николаева, Е. Н. Самарин. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2021. Том XV. – № 1–2. – С. 28–40.

12. Абелев, Ю. М. Возведение зданий и сооружений на насыпных грунтах / Ю. М. Абелев, В. И. Крутов. – Москва : Гос. изд-во по стр-ву, архитектуре и строит. материалам, 1962. – 147 с. – Текст : непосредственный.

13. Авдохин, В. М. Обогащение углей : учебник для вузов / В. М. Авдохин. – Москва : Издательство «Горная книга», 2012. – Т. 2. Технологии. – 475 с. – Текст : непосредственный.

14. Агошков, М. П. Развитие идей и практики комплексного освоения недр \ М. И. Агошков. – Москва : Недрa, 1970. – 319 с. – Текст : непосредственный.

15. Азимов, Б. В. Проблемы ликвидации экологических последствий при закрытии угольных шахт и разрезов / Б. В. Азимов, А. М. Навитный. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2002. – №3. – С. 10–12.

16. Антоненко, Л. К. Основы проектирования, строительства и эксплуатации хвостохранилища большой вместимости / Л. К. Антоненко, В. Г. Зотеев, А. И. Коваленко. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 1990. – № 11. – С. 43-46.

17. Афонин, А. П. Классификация техногенных грунтов. Инженерная геология / А. П. Афонин, И. В. Дудлер, Р. С. Зиангиров, Ю. М. Лычко, Е. Н. Огородникова, Д. В. Спиридонов, Э. Р. Черняк, Д. С. Дроздов. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 1990. – № 1. – С. 115–121.

18. Бахаева С.П. Оценка состояния и прогноз устойчивости техногенных грунтовых массивов угольных разрезов на основе комплексного мониторинга : дис... соиск. уч. ст. канд. техн. наук : спец. 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» / Бахаева Светлана Петровна – Кемерово, КузГТУ, 2008. – 33 с. – Текст : непосредственный.

19. Беневольский, Б. И. Два аспекта проблемы утилизации горно-промышленных отходов / Б. И. Беневский, А. И. Кривцов, А. И. Романчук, Б. К. Михайлов. – Текст : непосредственный // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. – 2011. – № 1. – С. 37–42.

20. Благов, И. С. Флокуляция минеральных и угольных суспензий водорастворимыми полимерами / И. С. Благов, В. П. Небера, И. А. Якубович. – Текст : непосредственный // VI Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Прага. – 1970. – С. 3–12.

21. Бондарик, Г. К. Природно-технические системы и их мониторинг / Г. К. Бондарик, Л. А. Ярг. – Текст : непосредственный // Инженерная геология–1990. – № 5. – С. 3–9.

22. Боровков, Ю. А. Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду / Л. А. Амосов, А. В. Бурмистренко, Б. Б. Зобнин, С. И. Мормиль [и др.] // Екатеринбург : НИА-Природа. – 2002. – 206 с. – Текст : непосредственный.

23. Быховский, Л. З. Техногенные отходы как резерв восполнения минерально-сырьевой базы : состояние и проблемы освоения / Л. З. Быховский, Л. В. Спорыкина. – Текст : непосредственный // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2011. – № 4. – С. 15–20.

24. Васильева, А. Д. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса : дис... соиск. уч. ст. канд. техн. наук : спец. 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» / Васильева Анастасия Дмитриевна. – Санкт-Петербург, СПГУ, 2019. – 186 с. – Текст : непосредственный.

25. Виленская, В. И. Физико-механические свойства и устойчивость обезвоженных хвостов обогащения, складированных в отвалы железорудных горно-обогатительных комбинатов (ГОКов) / В. И. Виленская, А. П. Завальный, П. А. Соляник, И. Е. Вовк – Текст : непосредственный // Труды ВОДГЕО. – 1978. – № 72. – С. 19-21.

26. Вознесенский, Е. А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов / Е. А. Вознесенский. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2019. – № 5. – С. 3–9.

27. Гальперин, А. М. Специальные вопросы инженерной геологии при гидромеханизации открытых разработок : учебное пособие / А. М. Гальперин – Москва : [б.и.], 1974. – 72 с. – Текст : непосредственный.

28. Гальперин, А. М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин – Москва : Недра, 1988. – 197 с. – Текст : непосредственный.

29. Гальперин, А. М. Гидромеханизированные природоохранные технологии / А. М. Гальперин, Ю. Н. Дьячков. – Москва : Недра, 1993. – 252 с. – Текст : непосредственный.

30. Гальперин, А. М. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов : учебное пособие для вузов. Том 1. Насыпные и намывные массивы / А. М.

Гальперин, В. Ферстер, Х-Ю. Шеф. – Москва : Изд-во МГГУ, 2006. – 391 с. – Текст : непосредственный.

31. Гальперин, А. М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, Ю. В. Кириченко [и др.]. – Москва : Горная книга, 2012. – 336 с. – Текст : непосредственный.

32. Гальперин, А. М. Инженерно-геологическое обеспечение формирования и последующего использования отвальных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, В. С. Круподеров. – Текст : непосредственный // Москва : ГИАБ. – 2015. – С. 20–35.

33. Геология угольных месторождений СССР / Под ред. А.К. Матвеева. – Москва : Изд-во МГУ, 1990. – 352 с. – Текст : непосредственный.

34. Годлевская, Г. И. Определение в натуральных условиях показателей фильтрационной консолидации пород гидроотвалов / Г. И. Годлевская, Ю. И. Кутепов, Ю. А. Норватов. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 1985. – №2. – С. 109–114.

35. Гуменик, И. Л. Классификация техногенных формирований при открытых горных работах / И. Л. Гуменик, А. С. Матвеев, А. И. Панасенко. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 1988. – № 12. – С.53–54.

36. Дашко, Р. Э. Механика горных пород : учебник по специальности «Гидрогеология и инженерная геология» / Р. Э. Дашко. – Москва : Недра, 1987. – 263с. – Текст : непосредственный.

37. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологические проблемы рационального использования территорий и охраны геологической среды при эксплуатации хвостохранилищ (на примере ПО "Фосфорит") / Р. Э. Дашко. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 1989. – Т. 118. – С. 18.

38. Дашко, Р. Э. Анализ техногенеза глинистых пород для оценки их несущей способности в основании сооружений промышленной гидротехники / Р. Э. Дашко. – Текст : непосредственный // Физические процессы горного производства. – 1992. – С. 42–49.

39. Еременко, Е. А. Антропогенная трансформация рельефа воркутинского промышленного района / Е. А. Еременко, Ю. Н. Фузеина, Е. В. Ворошилов, М. В. Власов, А. В. Бредихин. – Текст : непосредственный // Вестник Московского университета. – 2021. – № 1. – С. 3–15.

40. Ефимов, В. И. Использование отходов углеобогащения и оптимизация ресурсов по экологическому фактору / В. И. Ефимов, И. Б. Никулин, В. Л. Рыбак. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2014. – № 1. – С. 85–96.

41. Ершов, Э. Д. Преобразование структуры дисперсных пород в процессе их одностороннего промерзания / Э. Д. Ершов, В. Г. Чеверев, Л. В. Шевченко, О. М. Язынин, В. Н. Соколов – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 1979. – № 1. – С. 91–97.

42. Зиангиров, Р. С. Принципиальные вопросы построения общей классификации грунтов (к пересмотру ГОСТ 25100-82 Грунты. Классификация) / Р. С. Зиангиров, В. Т. Трофимов. – Текст : непосредственный // Геоэкология. – 1995. – № 3, С. 103–109.

43. Зотеев, В. Г. Принципы конструирования полигонов для складирования техногенных отходов / В. Г. Зотеев, А. Ю. Макеев, Б. А. Зеленский. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2001. – №4. – С. 71–74.

44. Зотеев, В. Г. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению / В. Г. Зотеев, О. В. Зотеев. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2007. – №1. – С. 40 – 45.

45. Иванов, И. П. Инженерная геодинамика / И. П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. – Санкт-Петербург : Наука, 2001. – 416 с. – Текст : непосредственный.

46. Каздым, А. А. Техногенные отложения и культурный слой – к вопросу о систематике и классификации / А. А. Каздым. – Текст : непосредственный // Минералогия техногенеза–2007. – 2007. – № 8. – С. 224–254.

47. Калашник, Н. А. 4D-моделирование консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» / Н.А. Калашник. – Текст :

непосредственный // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – № 11 (4). – С. 10–15.

48. Калинина, А. А. Технологические инновации – необходимое условие повышения производительности труда в Печорском угольном бассейне / И. П. Иванов, В. П. Луканичева. – Текст : электронный // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2008. – № 4 (4). – С. 27-35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-innovatsii-neobhodimoe-uslovie-povysheniya-proizvoditelnosti-truda-v-pechorskom-ugolnom-basseyne/viewer> (дата обращения 02.07.2023).

49. Кириченко, Ю. В. Инженерно-геологические особенности формирования отвальных массивов / Ю. В. Кириченко. – Текст : непосредственный // Горная Промышленность. – 2002. – №3. – С. 116–125.

50. Кириченко, Ю. В. Геомеханическое обеспечение учебно-рекреационной рекультивации карьеров и отвалов / Ю. В. Кириченко, В. В. Ческидов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №8. – С. 91–98.

51. Кириченко, Ю. В. Геологические аспекты формирования хранилищ отходов. Научные школы МГГУ / Ю. В. Кириченко – Текст : непосредственный // Москва: МГГУ – 2008. – Т. 1.

52. Коган, Я. Л., Влияние условий изменения напряженного состояния глинистых грунтов при определении сопротивления сдвигу / Я. Л. Коган, А. Н. Чухрова // Москва : ЦНИИС. – 1959. – 153 с. –Текст : непосредственный.

53. Комаров, М. А. Горно-промышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья / М. А. Комаров и др. – Текст : непосредственный // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 4. – С. 3–9.

54. **Кондакова, В. Н.** Влияние специфических свойств техногенных грунтов на параметры складирования / В. Н. Кондакова, Г. Б. Поспехов. – Текст : непосредственный // Новые идеи в науках о земле : материалы XIV Международной научно-практической конференции, 2–5 апр. 2019 г. – Том. 3. – С. 139–141.

55. Коробецкий, И. А. Генезис и свойства минеральных компонентов углей / И. А. Коробецкий, М. Я. Шпирт. – Новосибирск : Наука, 1988. – 227 с. – Текст : непосредственный.
56. Королев, В. А. Термодинамические закономерности формирования фазового состава немёрзлых дисперсных грунтов / В. А. Королев – Текст : непосредственный // Инженерная геология – 1989. – № 3. – С. 17-32.
57. Королёв, В. А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем : учебное пособие / В. А. Королёв. – Москва : КДУ, 2007. – 416 с. – Текст : непосредственный.
58. Корчагина, Т. В. Оценка воздействия техногенных массивов угледобывающих предприятий Кузбасса на атмосферу / Т. В. Корчагина, С. А. Воробьев, Л. Л. Рыбак. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2014. – №. 1 – С. 16–21.
59. Котлов, Ф. В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека / Ф. В. Котлов. – Москва : Недра, 1978. – 263 с. – Текст : непосредственный.
60. Крячко, О. Ю. Управление отвалами открытых горных работ / О. Ю. Крячко. – Москва : Недра, 1980. – 256 с. – Текст : непосредственный.
61. Кузнецов, С. К. Минерально-сырьевые ресурсы Воркутинского района и перспективы освоения / С. К. Кузнецов, И. Н. Бурцев, М. Б. Тарбаев и др. – Текст : непосредственный // Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия «Науки о Земле». – 2021. – №3 (49). – С. 65-74.
62. Кутепов, Ю. И. Изучение порового давления в намывных массивах / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова – Текст : непосредственный // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2006. – № 2. – С. 205- 215.
63. Кутепова, Н. А. Инженерно-геологические условия формирования свойств техногенных отложений углеобогачительных фабрик : автореф. канд геол.-мин. наук : 04.00.07 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» / Кутепова Надежда Андреевна. – Ленинград, 1987. – 20 с. – Текст : непосредственный.

64. Кутепов, Ю. И. Закономерности формирования порового давления при гидроотвалообразовании и отсыпке «сухих» отвалов / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова. – Текст : непосредственный // ГИАБ. – 2008. – № 11. – С. 212–220.

65. Кутепова, Н. А. Инженерно-геологическое обоснование прогноза гидрогеомеханических процессов при ведении горных работ : дис. д. тех. наук : 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» / Кутепова Надежда Андреевна. – Санкт-Петербург, 2011. – 424 с. – Текст : непосредственный.

66. Лапин, А. А. Причины самовозгорания породных отвалов в антрацитовых районах Восточного Донбасса / А. А. Лапин, А. П. Меркулов, В. Я. Посыльный. – Текст : непосредственный // Тр. ШахтНИУИ. – 1963. – Т. III. – С. 86–105.

67. Ларичкин, Ф. Д. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий : [монография] / Т. А.Bloшенко, А. А. Гилярова, Л. И. Гончарова, В. А. Кныш, Ф. Д. Ларичкин, И. В. Мелик-Гайказов, М. А. Невская, В. Д. Новосельцева, В. Н. Переин, С. В. Федосеев. – Апатиты : Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2019. – 252 с. – Текст : непосредственный.

68. Лейдерман, Л. П. Юньягинский разрез – золотой уголь Заполярья / Л. П. Лейдерман, Р. Р. Галеев, М. И. Столяров. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2019. – №3. – С. 32–34.

69. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология : инженерная петрология [Учебник для вузов] / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1984. – 511 с. – Текст : непосредственный.

70. Лычко, Ю. М. Использование промышленных отходов для устройства оснований зданий и сооружений / Ю. М. Лычко. – Москва : ВНИИИС, 1982. – 67 с. – Текст : непосредственный.

71. Малышев, Ю. Н. Развитие горнопромышленного комплекса в условиях обострения конкуренции на мировых рынках минеральных ресурсов / Ю. Н.

Малышев. – Текст : непосредственный // НП «Горнопромышленники России». – 2013. – №1. – С. 17–19.

72. Маслов, Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н.Н. Маслов. - 2-е издание – Москва : Высшая школа, 1968. – 629 с.

73. Метрологическая аттестация методик количественного фазового анализа минерального сырья. Методические указания № 27. – Москва : ВИМС, 1989.

74. Методические указания по определению оптимальных параметров гидроотвалов угольных разрезов. – Ленинград: ВНИМИ, 1975. – 102 с.

75. Методических указаниях по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, и интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Ленинград: ВНИМИ, 1987 г. - 118 с.

76. Мироненко, В. А. О концепции государственного гидрогеоэкологического мониторинга России / В. А. Мироненко. – Текст : непосредственный // Геоэкология. – 1993. – № 1. – С. 19–29.

77. Михайлов, Б. К. Техногенные минерально-сырьевые ресурсы / Б. К. Михайлов и др. – Москва : Научный мир, 2012. – 234 с. – Текст : непосредственный.

78. Невская, М. А. Принципы управления отходами добычи и переработки в условиях разграничения прав собственности на полезные ископаемые / М. А. Невская. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2014. – С. 49.

79. Нурок, Г. А. Гидромеханизация открытых горных разработок / Г. А. Нурок. – Москва : Недра, 1970. – 584 с. – Текст : непосредственный.

80. Оллыкайнен, А. М. Угольные месторождения Интинского района (Печорский бассейн) / А. М. Оллыкайнен, Н. А. Шуреков. – Инта : Интауголь, 1997. – 292 с. – Текст : непосредственный.

81. Огородникова, Е. Н. Классификация техногенных грунтов / Е. Н. Огородникова, С. К. Николаева. – Текст : непосредственный // Инженерная геология, 1990. – № 1. – С. 115–121.

82. Огородникова, Е. Н. Техногенные грунты / Е. Н. Огородникова, С. К. Николаева. – Москва : Изд-во Моск.ун-та, 2004. – 250 с. – Текст : непосредственный.
83. Орманбаев, А. Ж. Обогащение полезных ископаемых (углеобогащение) : учебное пособие / А. Ж. Орманбаев, Ж. Орайхан, В. В. Ким. – Нур-Султан: Talar, 2020. – 307 с. – Текст : непосредственный.
84. Определение склонности к самовозгоранию отходов обогащения Печорской ЦОФ, планируемых к размещению в породном отвале : отчёт о НИР : Санкт-Петербургский горный университет ; руководитель Шванкин М. В. – Санкт-Петербург, 2019. – 43 с.
85. Отчёт о ходе реализации государственной программы «Развитие энергетики» за 2021 год. – Текст : электронный // Министерство энергетики Российской Федерации. – 2022. – 216 с. URL: <https://minenergo.gov.ru/> (дата обращения 25.04.2022)
86. Панфилов, П. Ф. Повышение эффективности флокуляционного кондиционирования и обезвоживания отходов флотации ЦОФ «Печорская» на ленточных фильтр-прессах / П. Ф. Панфилов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – С. 336–337.
87. Парабучев, И. А. Мониторинг процессов взаимодействия гидротехнических сооружений с геологической средой / И. А. Парабучев. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 1992. – № 2. – С. 3–16.
88. Пахомов, О. А. Деформируемость и сопротивление сдвигу крупнообломочных грунтов при различной механической прочности пород / О. А. Пахомов – Текст : непосредственный // Известия ВНИИГ. – 1975. – № 108. – С. 213–226.
89. Пашкевич, М. А. Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду / М. А. Пашкевич. – Санкт-Петербург : СПГГИ (ТУ), 2000. – 230 с.

90. Пашкевич, М. А. Негативное воздействие техногенных массивов на природную среду / М. А. Пашкевич. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – С. 154–56.

91. Певзнер, М. Е. Борьба с деформациями горных пород на карьерах / М. Е. Певзнер. – Москва : Недра, 1978. – 255 с. – Текст : непосредственный.

92. Пендин, В. В. Комплексное моделирование устойчивости откосов грунтовых отвалов / В. В. Пендин, И. К. Фоменко, Д. Н. Горобцов, М. Е. Никулина. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2018. – №11. – С. 92–96.

93. Печорский угольный бассейн. – Текст электронный // Горная энциклопедия: интернет-портал. – URL: <http://www.mining-enc.ru/p/pechorskij-ugolnyj-bassejn> (дата обращения 02.07.2023).

94. Поспехов, Г. Б. Изменение инженерно-геологических условий рекультивируемых территорий на Богословском бурогольном месторождении: дис.... соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. наук : спец. 25.00.08 «Инженерная геология, грунтоведение и мерзлотоведение» / Поспехов Георгий Борисович. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2006. – 169 с. – Текст : непосредственный.

95. Поспехов Г. Б. Обоснование методологии мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогажительных предприятий // Г. Б. Поспехов, **В. Н. Кондакова**, Н. А. Кутепова. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2022. – № 5. – С. 59–63.

96. Прокопьев, С. А. Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища Западно-Сибирского металлургического комбината / С. А. Прокопьев, О. Л. Алексеева. – Текст : непосредственный // Науки о Земле и недропользование. – 2022. – Т. 45. № 4. – С. 446–457.

97. Прокопьев, С. А. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов / С. А. Прокопьев. – Текст : непосредственный // Науки о Земле и недропользование. – 2022. – Т. 45. № 4. – С. 458–468.

98. Пучков, Л. А. Маркшейдерская энциклопедия / Л. А. Пучков. – Москва : Мир горной книги, 2006. – 605 с.

99. Пухонто, С. К. Стратиграфия и флористическая характеристика пермских отложений угольных месторождений Печорского бассейна / С. К. Пухонто. – Москва : Научный мир, 1998. – 312 с. – Текст : непосредственный.

100. Пухонто, С. К. Воркутский угленосный геолого-промышленный район: структура запасов и направления комплексного освоения. Стратиграфическое расчленение и корреляция угленосных отложений. С. К. Пухонто. – Сыктывкар : КНЦ Ур ОРАН, 1994. – С. 10–21. – Текст : непосредственный.

101. Рассказов, Л. Н. Гидротехнические сооружения. Часть 1. : учебник для вузов / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин, В. В. Малаханов, А. С. Бестужева, М. П. Саинов, П. В. Солдатов, В. В. Толстиков – Издание второе, исправленное и дополненное. – Москва : Издательство АСВ, 2011. – 576 с. – Текст : непосредственный.

102. Рекомендации по инженерно-геологическому обоснованию параметров отвалов сухих пород, отсыпаемых на гидроотвалах. – Ленинград : ВНИМИ, 1985. – 80 с.

103. Розанов, Н. Н. О назначении расчётных параметров сопротивления сдвигу крупнообломочных грунтов // Н. Н. Розанов. – Текст : непосредственный // Энергетическое строительство. – 1978. – № 2. – С. 67-70.

104. Розанов, Н. Н. Инженерно-геологическая классификация отходов обогащения углей / Н. Н. Розанов. – Текст : непосредственный // Исследования в области строительства плотин и грунтовых материалов. – 1985. – № 2. – С. 4-21.

105. Савинов, О. А. Инструкция по проектированию и устройству фундаментов под временно устанавливаемые машины на насыпных грунтах / О. А. Савинов. – Москва : Машстройиздат, 1949. – 54 с. – Текст : непосредственный.

106. Сверчков, И. П. Снижение выбросов загрязняющих веществ при термической утилизации отходов углеобогащения: дис... канд. техн. наук : спец. 25.00.16 «Геоэкология» / Сверчков Иван Павлович. – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 2019. – 197 с. – Текст : непосредственный.

107. Середин, В. В. Оценка состояния горных пород и геоматериалов / В. В. Середин, А. С. Хрулев, М. В. Пушкарева. – Текст : непосредственный // Физико-

технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №1. – С. 53–57.

108. Сергеев, Е. М. Грунтоведение // Г. А. Голодковская, Р. С. Зиангиров. – Москва : Издательство МГУ. – 1983. – 392 с. – Текст : непосредственный.

109. Сергеев, Е. М. Научное наследство М. М. Филатова и современное состояние грунтоведения / Е. М. Сергеев. – Текст : непосредственный // Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. – Изд-во Академии наук СССР. – 1957. – С. 55–62.

110. Сергеев, Е. М. Методологические основы грунтоведения / Е. М. Сергеев. – Текст : непосредственный // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 3. – 1968. – С. 5–16.

111. Таразанов, И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-июнь 2019 года / И. Г. Таразанов, Д. А. Губанов. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2019. – № 12. – С. 40–48.

112. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий «Реконструкция СП «Печорская ЦОФ» АО «Воркутауголь» с учетом корректировки производственной мощности до 9,5 млн т в год» / АО «Воркутауголь». – 2021. – Воркута. – 349 с. – Текст : непосредственный.

113. ТЭК России – 2019 : ежегодный статистический сборник / Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. – Текст электронный // URL: <https://img-cdn.tinkoffjournal.ru/-/tek2019.pdf> (дата обращения 28.07.2022)

114. Трофимов, В. Т. Классификация техногенных воздействий на геологическую среду. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, А. С. Герасимова. – Текст : непосредственный // Наука. – 1995. – № 5. – С. 96–107.

115. Трофимов, В. Т. Теоретические аспекты грунтоведения / В.Т. Трофимов. – Москва : Изд-во МГУ, 2003. – 114 с. – Текст : непосредственный.

116. Трофимов, В. Т. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв В. А. – Москва: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с. – Текст : непосредственный.

117. Трофимов, В. Т. Теоретические аспекты инженерной геологии / В. Т. Трофимов. – Москва: Академическая наука: Геомаркетинг, 2019. – 280 с. – Текст : непосредственный.

118. Трубецкой, К. Н. Классификация техногенных месторождений / К. Н. Трубецкой, В. Н. Уманец, М. Б. Никитин. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 1989. – № 12. – С. 6–9.

119. Угольная база России. Том 1. Угольные бассейны и месторождения Европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс, Подмосковский, Камский и Печорский бассейны, Урал. – Москва : ЗАО Геоинформмарк, 2000. – 483 с. – Текст : непосредственный.

120. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть 1. Изучение гидрогеомеханических условий строительства и рекультивации отвальных сооружений / Ленинград : ВНИМИ, 1989. – 55 с. – Текст : непосредственный.

121. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть II. Обоснование оптимальных параметров отвальных сооружений / Ленинград : ВНИМИ, 1989. – 51 с. – Текст : непосредственный.

122. Федоров, И. С. Свойства и расчетные характеристики намытых хвостов обогатительных фабрик / И. С. Федоров., О. Х. Добровинская. – Москва : Недра, 1970. – 152 с. – Текст : непосредственный.

123. Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко. – Москва : Недра, 1965. – 378 с. – Текст : непосредственный.

124. Фоменко, Т. Г. Отходы флотации и их свойства / Т. Г. Фоменко, А. Ф. Кондратенко. – Москва : Наука, 1975. – 133 с. – Текст : непосредственный.

125. Хазанов, М. И. Искусственные грунты, их образование и свойства / М. И. Хазанов. – Москва : Наука, 1975. – 135с. – Текст : непосредственный.

126. Чаповкий, Е. Г. Инженерная геология (Основы инженерно-геологического изучения горных пород) : учебное пособие / Е. Г. Чаповский – Москва : Высшая школа, 1975. – 296 с. – Текст : непосредственный.

127. Ческидов, В. В. Комплексное зондирование намывных отложений гидроотвала № 2 разреза «Кедровский» / В. В. Ческидов. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2011. – № 6 (100). – С. 70–76.

128. Ческидов, В. В., Инженерно-геологическое обеспечение мониторинга устойчивости оползневых склонов в условиях транспортного строительства / В. В. Ческидов, А. И. Маневич – Текст : непосредственный // Горные науки и технологии. – 2016. – № 1. – С. 51–59.

129. Ческидов, В. В. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений / В. В. Ческидов. – Текст : непосредственный // Горная Промышленность. – 2017. – № 4 (134). – С.78–80.

130. Шарипов, Д. Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ / Д. Ш. Шарипов. – Текст : непосредственный // Науки о Земле и недропользование. – 2021. – Т. 44. – № 1 (74). – С. 63–72.

131. Шершнева, А. А. Обоснование технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения : дис... соиск. уч. ст. канд. техн. наук : спец. 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая, строительная)» / Шершнева Андрей Александрович. – Красноярск, СФУ, 2016. – 147 с. – Текст : непосредственный.

132. Шпаков, П. С. Инженерно-геологический и геоэкологический мониторинг состояния сложных объектов горнодобывающего комплекса / П. С. Шпаков, А. Г. Урузбиева, А. И. Маневич. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 406–413

133. Шпирт, М. Я. Использование твёрдых отходов добычи и переработки углей / М. Я. Шпирт, В. Б. Артемьев, С. А. Силютин. – Москва : Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. – 432 с. –Текст : непосредственный.

134. Якунин, В. П. Использование отходов обогащения углей / В. П. Якунин, А. А. Агроскин. – Москва : «Недра», 1978. – 167 с. – Текст : непосредственный.
135. Report «Root Cause Analysis of TVA Kingston Dredge Pond Failure on December 22, 2008 Illinois, USA». – AECOM. – 2009.
136. Aldea, C. Paste backfill mix / C. Aldea, B. Cornelius // *International Mining*. – 2010. – P. 79–80.
137. Azam, S. Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA / S. Azam, G. W. Wilson, G. Herasymuik, C. Nichol, L.S. Barbour // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2007. – Vol. 66 (3) – P. 259-268.
138. Bishop, A. W. Geotechnical Investigation into the Causes and Circumstances of the Disaster of 21st October 1966 / A. W. Bishop, J. N. Hutchinson, A. D. M. Penman, H. E. Evans // HMSO. – 1969. – P. 1-47.
139. Carras, J. N. Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia / J. N. Carras, S. J. Day, A. Saghafi, D. J. Williams // *International Journal of Coal Geology*. – 2009. – Vol. 78. – P. 161–168.
140. Carter, J. P. A review of laboratory testing of calcareous soils / J. P. Carter, D. W. Airey, M. Fahey / *Proceedings of the Second International Conference on Engineering for Calcareous Sediments*. – 2000. – Vol. 2. – P. 401–431.
141. Davies, W. E. West Virginia's Buffalo Creek Flood: A Study of the Hydrology and Engineering Geology / W. E. Davies, J. F. Bailey, D. B. Kelly // *USGS Numbered Series*. – 1972. – Vol. 667. – 32 p.
142. Davies, M. C. R. Laboratory measurement of the shear strength of ice filled rock joints / M. C. R. Davies, O. Hamza, B.W. Lumsden, C. Harris // *Annals of Glaciology*. – 2000. – Vol. 31. – P. 463–467.
143. Davies, M. C. R. The geotechnical properties of cemented colliery waste for use in land fill / M. C. R. Davies, A. Landa, G. D. Knowles // *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*. – 1992. – P. 142–152.

144. Dawson, R. F. Liquefaction flowslides in Rocky Mountain coal mine waste dumps. / R. F. Dawson, N. R. Morgenstern, A. W. Stokes // Canadian Geotechnical Journal. – 1998. – Vol. 35 (2). – P. 328–343.

145. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives // Available online. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20180705> (Date of access: 14.08.2023)

146. Donovan, J. G. Assessment of Hillside Coal Waste Embankment Failures Using Qualitative Analysis / J.G. Donovan, M. G. Karfakis // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2003. – Vol. 17(4). – P. 234–245.

147. Filipovich, P. Comparative Analysis of the Geotechnical Properties of Coal Mining Wastes from Lublin Coal Basin and from Other Basin / P. Filipovich, M. Borys // Journal of Water and Land Development. – 2007. – № 11. – P. 117–130.

148. Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC. – 29 p.

149. Golam, M. Base material characterization of spoil piles at BMA coal mines : Master Thesis / Md Mostofa Golam. – Queensland, School of Civil Engineering Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology, 2015. – 111 p.

150. Gruchot A., Zawisza E., Gubala S. 2009. Shear strength tests of coal waste from KWK Wesola: in a three-axle compression apparatus. Mining Review 7–8: 73–78.

151. Agreed Statement of Facts. Docket No. 151258456P1 & 160061354P1 // Prairie Mines & Royalty ULC. – 2017. – P. 1–14.

152. Action Taken Report of the Committee / Hiralal Bais v. Reliance Sasan Power Ltd. & Ors // Honorable National Green Tribunal Principal, Original Application No. 31 of 2020. – P. 1–19.

153. Iavid, E. I. Diversity and main properties of soils of the Gronfjord area (Svalbard archipelago) / E. I. Iavid, V. N. Kondakova, V. I. Polyakov, E. V. Abakumov // Czech Polar Reports. – 2018. – Vol. 8. – P. 43–59.

154. Indraratna, B. Utilization of compacted coal tailings as a structural fill / I. Gasson, R. N. Chowdhury // *Canadian Geotechnical Journal*. – № 31. – P. 614–623.
155. Kaliboullah, T. H. Behavior of compacted coalwash under saturated condition incorporating particle breakage : Doctor of Philosophy thesis. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong. – 2016.
156. Kasmer, O. Spoil pile instabilities with reference to a strip coal mine in Turkey: mechanisms and assessment of deformations / O. Kasmer, R. Ulusay, C. Gokceoglu // *Environmental Geology*. – 2006. – Vol. 49. – P. 570–585.
157. **Kondakova, V.** The Comparison of the Russian and Foreign Mining Wastes Classification Systems / V. Kondakova, A. Pomortseva, G. Posphehov // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2021. – №. 666(5). – 7 p.
158. **Kondakova, V.** Analysis of the Problem of Classification of Mining Wastes / V. Kondakova, G. B. Posphehov, K.V. Pankratova, A. A. Pomortseva // *Engineering and Mining Geophysics*. – 2020. – p.1–8.
159. **Kondakova, V.** Dependence between the parameters of storage of artificial soils from their specific properties / V. Kondakova, G. B. Posphehov // *12th Russian-German Raw Materials Forum – Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues 2019, St. Petersburg 27-29 November 2019*. – P. 11–17.
160. Koosmen, K. Considerations for the Geotechnical Stability of Coal Mine Spoil Piles Containing Co-Disposed Tailings. Doctor of Philosophy thesis. School of Civil, Surveying and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and the Built Environment. The University of Newcastle. – 2016.
161. Kutepova N.A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage / N. A. Kutepova, V. V. Moseykin, **V. N. Kondakova**, G. B. Posphehov, A. I. Straupnik. // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. – 2022. – № 12. – P. 77–93.
162. Makarov, A. Regulation of open pit slope stability in Russia / A. Makarov, I. Livinsky. V. Spirin, A. Pavlovich. *Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. – 2020. – P. 155–164.

163. Nichols, R. R. Rock segregation in waste dumps / R. R. Nichols // International Symposium on Flow through Rock Drains, Cranbrook, Canada, 1987.
164. Leventhal, A. R. De Ambrosis, L. P. Waste disposal in coal mining—a geotechnical analysis / A. R. Leventhal, L. P. De Ambrosis // Engineering Geology. – 1985. – № 22. – P. 83–96.
165. Oluranti, A. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management / A. Oluranti, D. E. Babatunde, O. S. Isaac Fayomi, E. R. Sadiku, P. Popoola, L. Moropeng, A. Yahaya, O. A. Mamudu // Results in Engineering. – 2020. – Vol. 8. – 23 p.
166. Steiakakis, E. Large scale failure of the external waste dump at the 1392 "South Field" lignite mine, Northern Greece / E. Steiakakis, K. Kavouridis, D. Monopolis // Engineering Geology. – 2009. – № 104. – P. 269–279.
167. Pells, P. J. N. A note on design parameters for in-pit coal waste dumps in weak rock / P. J. N. Pells // The 1st Asia Pacific Slope Stability in Mining. – 2016. – P. 523-530.
168. Pfeiffer, E. M. Focus Siberian Permafrost – Terrestrial Cryosphere and Climate Change / E. M. Pfeiffer, O. Vybornova, C. Beer // Online Symposium Institute of Soil Science, March 24–25, 2021, Hamburg, Germany. – P. 38.
169. Richards, B.G. Spoil pile stability in the Bowen Basin revisited. Part 1; material characterisation / B. G. Richards // Journal of the Australian Geomechanics Society. – 1998. – Vol. 33 (1). – P. 20–32.
170. Plaxis 2D. Научное пособие / НИИ-Информатика. – 2017. – 59 с.
171. Skarzynska, K. M. 1995. Reuse of Coal Mining Wastes in Civil Engineering – Part 1: Properties of Minestone / K. M. Skarzynska // Waste Management. – Vol. 15(1). – P. 3–42.
172. Simmons, J. V. Shear strength framework for design of dumped spoil slopes for open pit coal mines / J.V. Simmons, D. A. McManus // Advances in Geotechnical Engineering (The Skempton Conference) London, United Kingdom. – 2004. – P. 981–991.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2021622924

**База данных физико-механических свойств техногенных
грунтов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Кондакова Вероника Николаевна (RU), Иванов
Павел Владимирович (RU), Поспехов Георгий Борисович
(RU)*

Заявка № 2021622701

Дата поступления 26 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 13 декабря 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б


Акт о внедрении результатов диссертации

Общество с ограниченной ответственностью
по проектированию предприятий угольной промышленности «СПб-Гипрошахт»

Утверждаю

Технический директор, к.т.н.

ООО «СПб-Гипрошахт»

А. А. Подосенов 

Дата «01» сентября 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации соискателя ученой степени
Кондаковой Вероники Николаевны
по научной специальности 2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Состав комиссии:

Председатель: С. П. Решетняк;

Члены комиссии: Н. С. Аврамова, И. А. Ишкулова.

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертации на тему «Инженерно-геологическое обоснование размещения отходов углеобогащения в отвалах с учётом процессов техногенеза», представленной на соискание учёной степени кандидата наук, использованы в 2021 и 2022 году в рамках деятельности ООО «СПб-Гипрошахт» при разработке проекта реконструкции Печорской центральной обогатительной фабрики в виде:

- экспериментальных данных по исследованию физико-механических свойств отходов углеобогащения;
- рекомендаций по размещению отходов углеобогащения на участке складирования.

Результаты исследований дали возможность специалистам ООО «СПб-Гипрошахт» обосновать оптимальные параметры сооружений по складированию отходов фабрики с обеспечением необходимого уровня устойчивости откосных сооружений в том числе, нагруженных горнотранспортным оборудованием, что в итоге позволило повысить качество проектирования и обеспечить эффективность принятых решений.


Председатель комиссии

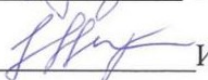
Главный технолог,
доктор технических наук


С. П. Решетняк

Члены комиссии:

Начальник отдела открытых работ,
кандидат технических наук
Начальник сектора отдела открытых
работ, кандидат технических наук


Н. С. Аврамова


И. А. Ишкулова