

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

*На правах рукописи*

---

Прищепов Владимир

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ АБРАЗИВНОСТИ СКАЛЬНЫХ И  
ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСА  
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ**

2.8.6 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэrogазодинамика и  
горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор  
Вознесенский Александр Сергеевич

Москва – 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Анализ публикаций в области современных методов оценки абразивных свойств скальных и дисперсных грунтов, постановка цели и задач исследования.....	13
1.1 Классификация грунтов, учитываемая при проходке с помощью ТПМК .....	13
1.2 Возникающие трудности в процессе работы ТПМК из-за абразивности грунтов .....	13
1.3 Существующие методы оценки абразивности.....	18
1.4 Практическое применение методов оценки абразивности и их результаты, полученные на разных грунтах и горных породах.....	32
1.5 Нерешенные вопросы, постановка цели и задач исследования .....	41
2 Материалы, оборудование и методы исследования .....	43
2.1 Анализ типов грунтов при проходке тоннелей с помощью ТПМК.....	43
2.2 Исходные образцы скальных и дисперсных грунтов для испытаний ...	45
2.3 Испытание по определению минерального (фазового) состава проб скальных и дисперсных грунтов.....	48
2.4 Методика исследования абразивности по методу Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (вращающегося полого стержня).....	50
2.5 Методика исследования абразивности по методу вращающейся крыльчатки (LCPC) .....	54
2.6 Методика ситового анализа при исследовании проб дисперсных грунтов.....	57
2.7 Методика подбора плотностей распределений вероятностей размера частиц .....	59

2.8 Методика проведения испытаний для уточнения классификации грунтов по их абразивности .....	63
Выводы .....	65
3 Исследование взаимосвязей прочностных свойств, размеров кусков и зерен скальных грунтов, а также размеров зерен и содержания кварца в дисперсных грунтах с абразивностью .....	66
3.1 Испытания по определению предела прочности при сжатии и растяжении скальных грунтов .....	66
3.2 Абразивность скальных грунтов по методу Барона – Кузнецова .....	68
3.3 Абразивность скальных грунтов по методу LCPC .....	69
3.4 Результаты испытания на абразивность дисперсных грунтов (песка) по методу вращающейся крыльчатки .....	78
Выводы .....	88
4 Исследование особенностей взаимодействия режущего инструмента с дисперсными грунтами .....	90
4.1 Результаты фракционного анализа проб при их обработке по методу LCPC .....	90
4.2 Анализ полигонов распределений .....	93
4.3 Построение гистограмм распределений вероятностей .....	97
4.4 Подбор плотностей распределений вероятностей размера частиц .....	102
Выводы .....	107
5 Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по коэффициентам абразивности .....	109
5.1 Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по скорости износа режущего инструмента ТПМК .....	115
5.2 Итоговые скорости износа дисков шарошек ТПМК .....	118
Выводы .....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	130

Приложение А Результаты исследования минерального состава проб .....	140
Приложение Б Результаты испытаний образцов на предел прочности при сжатии и растяжении .....	145
Приложение В Результаты испытаний абразивности по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову .....	147
Приложение Г Результаты испытаний образцов скального грунта на абразивность методом вращающейся крыльчатки ( <i>LCPC</i> ) .....	149
Приложение Д Результаты испытаний образцов дисперсного грунта на абразивность методом вращающейся крыльчатки ( <i>LCPC</i> ) .....	153
Приложение Е Результаты испытаний образцов песка на абразивность методом вращающейся крыльчатки .....	159
Приложение Ж Данные ситового анализа, полученные при обработке проб песка на установке с вращающейся крыльчаткой .....	161
Приложение З Данные аппроксимации результатов ситового анализа плотностью логнормального распределения .....	164
Приложение И Методические рекомендации по оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке .....	170
Приложение К Справка о внедрении результатов диссертации .....	191

## ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Абразивность – способность горных пород изнашивать контактирующие с ними твёрдые тела (детали горных машин, инструменты и т.п.). Обусловлена в основном прочностью, размерами и формой минеральных зёрен, слагающих породу [1].

Грунт – любая горная порода, почва, осадок и техногенные минеральные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы и часть геологической среды, изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью [4].

Скальный грунт – грунт, в котором преобладают структурные связи химической природы [4].

Дисперсный грунт – грунт, в котором преобладают механические, физические и физико-химические структурные связи [4].

Изнашивание – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела [2].

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах [2].

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания [2].

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния [3].

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [3].

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния [3].

ТПМК – тоннелепроходческий механизированный комплекс.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы** диссертации следует из необходимости разработки новых и совершенствования существующих способов и средств разрушения горных пород механическими воздействиями. Это обусловлено резким увеличением тоннелепроходческих работ с использованием ТПМК. Так, например, только в Москве с 2011 года построено и реконструировано более 250 км линий метро. В ближайших будущем – строительство дублеров крупнейших тоннелей на БАМ-3, другие значимые проекты. При таком широком фронте работ по прокладке тоннелей с помощью ТПМК особенно остро ставится вопрос о прогнозе износа и своевременной замене режущего инструмента – шарошек, который в значительной степени определяется таким свойством грунтов, по которым проводится проходка, как их абразивность и дробимость. Следует отметить, что за рубежом уже существуют методы оценки абразивности и дробимости, которые успешно используются на практике. Существуют стандарты и методические рекомендации, позволяющие делать оценку абразивности и дробимости грунтов, и по полученным данным осуществлять подбор режущего инструмента, а также планово и своевременно осуществлять его замену по мере износа.

В нашей стране вопрос об оценке абразивности ставится уже не один десяток лет. Метод вращающегося эталона полого стержня для скальных грунтов, первоначально предложенный М. И. Койфманом, был затем усовершенствован Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым и назван в их честь. Наряду с другими он успешно применяется и в зарубежной практике. Работы по созданию методов оценки абразивности грунтов интенсивно ведутся и за рубежом. Среди прочих здесь можно упомянуть метод оценки абразивности скальных грунтов с вращающейся крыльчаткой, разработанный в лаборатории Laboratoire Central des Ponts et Chausées, Франция, сокращенно

LCPC. В то же время многие вопросы еще не решены. В частности, оба упомянутых метода, как и ряд других, разработаны для скальных грунтов, в то время как больший объем работ ведется на дисперсных (песчаных) грунтах. Отсутствуют достаточно обоснованные методические рекомендации по оценке абразивности не только скальных, но скальных и дисперсных грунтов применительно к геологическим и техническим условиям России.

В связи с вышесказанным на сегодняшний день становятся актуальными исследования, направленные на разработку методов оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов, а также на создание лабораторно-полевой классификации их абразивных свойств.

**Целью данной работы** является установление связей между показателями абразивности по методам вращающихся эталонов полого стержня и крыльчатки для скальных и дисперсных грунтов, и разработка на этой основе лабораторного метода оценки абразивных свойств грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке.

Для достижения указанной цели в работе решались **следующие задачи**.

1. Определение преобладающих типов грунта при проходке тоннелей с помощью ТПМК для формулировки технических требований к методам определения абразивности грунтов.

2. Разработка экспериментальных лабораторных установок для оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов по методам Л. И. Барона – А. В. Кузнецова (метод вращающегося полого стержня) и *LCPC* (метод вращающейся крыльчатки), а также сопоставление этих методов друг с другом на основе сравнительных испытаний на одних и тех же грунтах.

3. Проведение экспериментальных исследований на разработанной установке для определения особенностей фракционного состава грунтов по методу вращающейся крыльчатки и изменения его параметров в зависимости от времени испытания.

4. Установление вида и параметров вероятностных распределений фракционного состава проб при их дроблении и оценка связи этих параметров с показателем абразивности  $LAC$  по методу вращающейся крыльчатки.

5. Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по коэффициентам абразивности и по скорости износа режущего инструмента ТПМК.

### **Идея работы**

Основная идея работы заключается в оценке абразивности грунтов по результатам лабораторных испытаний, которые затем могут быть перенесены на натурные объекты щитовой проходки.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту.**

1. Установлено влияние пределов прочности скальных грунтов при сжатии и растяжении, размеров кусков и зерен, а также содержание кварца на абразивность как скальных, так и дисперсных грунтов, при этом увеличение численных значений указанных свойств соответствует увеличению коэффициентов абразивности, определяемых как методом вращающегося эталона полого стержня, так и методом вращающейся крыльчатки, имеющих взаимосвязь между собой.

2. Распределение размеров частиц при дроблении скальных и дисперсных грунтов удовлетворительно описывается логнормальным распределением, значения параметров которого, непосредственно связанные с показателями абразивности, определяемыми методом вращающейся крыльчатки, уменьшаются с увеличением времени обработки пробы в лабораторной установке.

3. Абразивные свойства грунтов каждого типа классифицируются по найденным соотношениям фактической скорости износа дисковых шарошек щита ТПМК и лабораторных показателей абразивности по методу

вращающейся крыльчатки, что позволяет прогнозировать износ режущего инструмента при щитовой проходке.

**Обоснованность и достоверность** выдвинутых положений и выводов обеспечена:

- применением проверенных современных методик экспериментальных исследований;
- воспроизводимостью и непротиворечивостью полученных данных общим законам физики, теории прочности, а также ранее опубликованным результатам;
- представительным количеством выполненных экспериментов, полученных с использованием разработанной экспериментальной методики;
- удовлетворительным соответствием результатов определения абразивности, полученных с помощью лабораторных физических экспериментов на образцах скальных и дисперсных грунтов, результатам фактической скорости износа дисковых шарошек щита ТПМК в схожих грунтах;
- положительными результатами их апробации на отечественных и международных конференциях.

**Методы исследований включали** анализ и обобщение литературных источников; лабораторное экспериментальное исследование абразивности скальных и дисперсных грунтов; анализ фактического расхода режущего инструмента, обработку, интерпретацию, анализ современными методами статистики, обобщение полученных данных.

**Научное значение работы** состоит в установлении полученных впервые взаимосвязей между коэффициентом абразивности по методу вращающейся крыльчатки с пределом прочности скальных грунтов при сжатии и растяжении, со средним размером куска, с коэффициентом абразивности по методу вращающегося эталона полого стержня, а также в установлении вида и параметров вероятностных распределений

фракционного состава проб при их дроблении и оценка связи этих параметров с показателем абразивности по методу вращающейся крыльчатки.

**Практическая значимость и реализация результатов исследования.**

По результатам диссертации разработаны «Методические рекомендации по оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке», принятые к практическому использованию.

**Личный вклад автора.** Постановка цели и задачи; обзор литературных источников; обоснование методик, подготовка и проведение экспериментов; обработка результатов; разработка методических рекомендаций.

**Апробация работы.** Основные научные положения, выводы и рекомендации по результатам диссертационной работы были представлены на следующих конференциях и научно-практических семинарах: Международный научный симпозиум «Неделя Горняка-2023; 2024; 2025»; 16-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов, ИПКОН РАН, Москва, 2023.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано: всего 6 публикаций, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и входящих в международную систему аprobации Scopus.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 191 странице машинописного текста, включает 50 рисунков, 17 таблиц, список источников из 85 наименований, 10 приложений (включая 9 рисунков и 19 таблиц).

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю, докт. техн. наук, проф. А. С. Вознесенскому, докт. техн. наук С. В. Мазеину, коллективу кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС за неоценимую помощь при

подготовке и проведении исследований, а также за консультационную и моральную поддержку при написании работы.

# **1 Анализ публикаций в области современных методов оценки абразивных свойств скальных и дисперсных грунтов, постановка цели и задач исследования**

## **1.1 Классификация грунтов, учитываемая при проходке с помощью ТПМК**

Изнашивание режущих элементов тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) во многой степени определяется средой, в которой ведутся работы, а именно – горными породами и грунтами, среди свойств которых в данном случае наибольшее значение имеет абразивность. В соответствии с ГОСТ 25100-2020 [4] они подразделяются на скальные, дисперсные и мерзлые. Из этих трех классов для данного случая имеют значения первые два.

Согласно упомянутому ГОСТу, скальным называется грунт, в котором преобладают структурные связи химической природы, а дисперсным грунт, в котором преобладают механические, физические и физико-химические структурные связи.

Как следует из приведенных ГОСТов, подразделение как скальных, так и дисперсных грунтов на разновидности по абразивности не регламентируется существующими отечественными нормативными документами.

## **1.2 Возникающие трудности в процессе работы ТПМК из-за абразивности грунтов**

В настоящее время рядом отечественных ученых [5, 6] ставится вопрос о необходимости разработки государственного стандарта и других нормативных документов по оценке абразивности горных пород и грунтов с

целью прогнозирования износа породоразрушающего инструмента и, в частности, являющегося составной частью роторов ТПМК.

Абразивность горных пород влияет на износ инструмента, потребление энергии и время строительства и, следовательно, является важным параметром в горной и строительной инженерии [7].

Абразивные свойства разрабатываемых ТПМК грунтов и горных пород – это их способность истирать контактирующую с ними поверхность режущих инструментов, рабочих элементов оборудования и машин [8]. Износ оборудования при щитовой проходке является возможной причиной нештатной ситуации прорыва водогрунтовой массы в тоннель [9], что также сдерживает темпы тоннельного строительства и снижает его безопасность.

Рабочий орган ТПМК роторного типа традиционно оснащен режущим инструментом в следующей комплектации:

- центральный забурник,
- плоские и/или стержневые резцы и контурные выгнутые ковши (все они жестко крепятся в держателях),
- вращающиеся на своей оси дисковые шарошки, режущий контур которых выступает над режущим контуром плоских резцов.

Вышеперечисленный режущий инструмент подвергается первичному износу, при несвоевременной замене изношенного инструмента приходит вторичный износ таких контактирующих с породой компонентов ТПМК, как луки ротора, держатели и корпус резцов, шнековый конвейер [10]. Износ режущего инструмента обычно оценивается путем объединения количественных данных, записанных во время замен (уменьшение радиуса режущего диска шарошки в миллиметрах, замена отказавшего инструмента в шт.), как дополнение используются детекторы износа [11]. К немедленной замене инструмента приводит только разрушение инструмента и крепления. Остальные проявления износа регулярно отслеживаются: равномерный (абразивный) износ шарошки и неравномерный износ шарошки при

заклинивании вращения, а также частичная потеря режущей гребенки на резцах [12].

Методы контроля износа режущего инструмента: визуальный, измерительный по лекалу, дистанционный по детекторам износа [13].

Методика горнодобывающей и тоннелестроительной промышленности определяет скорость износа скоростью потери металла из инструмента, то есть количеством замен инструмента при разработке единицы объема породы. Величина, обратная скорости износа, – это буровой ресурс инструмента, выраженный в разработанных тысячах  $\text{м}^3$  породы на одно эталонное изделие [14]. Классификация скорости износа и её обратной величины – ресурса режущего инструмента приведена в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация скорости износа и ресурса режущего инструмента

Оценка скорости износа инструмента		Оценка ресурса инструмента	
количественно: шт. / тыс. $\text{м}^3$	качественно:	количественно: тыс. $\text{м}^3$ породы / шт.	качественно:
< 0,5	очень низкая	> 2,0	очень высокий
0,5...0,7	низкая	1,5...2,0	высокий
0,7...1,0	средняя	1,0...1,5	средний
1,0...2,0	высокая	0,5...1,0	низкий
2,0...5,0	очень высокая	0,2...0,5	очень низкий
> 5,0	экстремально высокая	< 0,2	экстремально низкий

Для последующих прогнозов ресурса инструмента необходимо накапливать и обрабатывать статистические количественные данные замен режущих инструментов [15], очерчивающих дорожку резания заданного радиуса и разрабатывающих определенный объем абразивной горной породы.

На интенсивность изнашивания влияют режим и условия работы детали и инструмента. Исследования показывают, что по мере изменения условий в области контакта поверхностей одни виды взаимодействия могут

переходить в другие, т. е. с изменением условий может меняться не только количественная, но и качественная картина износа. Зависимость износа от столь большого числа факторов не позволяет в настоящее время ввести единый показатель абразивности горных пород. Поэтому для конкретных условий показатели относительной абразивности горных пород определяются через показатели износа.

Измерение абразивности породы для оценок ресурса режущего инструмента ТПМК и периодичности его замен становится все более актуальным для проектирования и строительства тоннельных выработок большого сечения. В [16] выполнен обзор типов износа режущего инструмента и соответствующих мероприятий в условиях абразивного грунта. Составлена универсальная классификация абразивности на основе лабораторных образцов скального и сыпучего грунта. Сформулированы направления исследований на абразивность грунтов применительно к геологии московского региона.

Об актуальности исследования влияния абразивности грунтов свидетельствует также ряд публикаций, посвященных установлению закономерностей между износом породоразрушающих элементов ТПМК и эффективностью проходки тоннелей.

В [17, 18] показано, что существует прямая зависимость между эффективностью механизированной выемки в твердых породах и эффективностью дисковых шарошек. Дисковые шарошки расположены на переднем конце ТПМК и непосредственно контактируют с породой. Износ дисковых шарошек является важным эффективным фактором, влияющим на функциональность проходческих комбайнов. Суровые условия работы, такие как сильные удары и отсутствие смазки, приводят к высокому износу шарошки при работе с твердыми породами. Замена дисковых шарошек является трудоемким и дорогостоящим мероприятием, которое может значительно снизить использование ТПМК и скорость продвижения, а также

оказывает существенное влияние на сроки строительства, стоимость и безопасность тоннельных проектов.

Важным шагом в успешной проходке тоннелей является тщательная характеристика грунтовых условий и выявление геологических и геотехнических рисков. При проходке тоннелей эта и другая информация необходима для выбора подходящего ТПМК и определения его технических характеристик для оптимальной производительности. Основными геологическими рисками при проходке тоннелей являются липкость и засорение грунта, абразивность грунта, грунты с низким содержанием мелких или крупных зерен, обрушение и нестабильность тоннеля, колебание грунтовых вод, смешанные забойные условия, разжижение, и движение грунта. Таким образом, опыт проходки тоннелей показывает, что в разных типах грунтов разный уровень геологической опасности. Из этого следует, что знание различных типов грунтов важно для прогнозирования возможных геологических опасностей [19].

В [20] авторы подробнее рассматривают, как при проходке тоннелей в грунтах экономические показатели прямо зависят от износа и определения расхода режущего инструмента. Эти процессы как прямо (через стоимость инструмента), так и опосредованно (через затраты времени на их замену, снижение ресурсов исполнительного органа, элементов трансмиссии, приводов и других узлов машин) влияют на стоимость горного проекта. Измерение показателей абразивности грунтов для оценки ресурса режущего инструмента и периодичности его замен является довольно острым вопросом, например, для проектирования выработок большого сечения, при строительстве которых разрабатываются большие объемы абразивных горных пород грунтов. Ресурс режущего инструмента является важным компонентом как при добыче горных пород, так и при проходке протяженных тоннелей с помощью ТПМК.

Все факторы, влияющие на интенсивность изнашивания режущих инструментов, можно разделить на три группы:

- характеристики материала, т.е. показатели физико-технических свойств грунтов, обусловливающие изнашивающую способность;
- параметры режима разрушения и условия внешней среды, в которой протекает рассматриваемый процесс;
- характеристики физико-технических свойств самого инструмента [21].

Из приведенного обзора можно сделать вывод, что оценка абразивности горных пород и грунтов с целью прогнозирования ресурса режущего инструмента и периодичности его замен является важной и актуальной задачей при строительстве тоннелей с помощью ТПМК.

### **1.3 Существующие методы оценки абразивности**

Для решения обозначенной задачи была разработана и проверена на реальных примерах методология, позволяющая описать абразивность горных пород и грунтов или стойкость металла к истиранию с помощью соотношения сопоставимых количественных показателей.

#### **Метод Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (далее – метод вращающегося полого стержня)**

Этот метод первоначально был предложен М.И. Койфманом [22], а затем усовершенствован Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым [23]. Сущность метода состоит в том, что о необработанную поверхность образца испытываемой горной породы истирается торец цилиндрического стального стержня при вращении его вокруг продольной оси с последующим измерением его износа. Метод может быть использован для пород с твердостью от 2–3 единиц по шкале Мооса.

Определение абразивности осуществляется при истирании торца вращающегося стального стержня о поверхность образца горной породы [24]. Испытание проводится на установке, оборудованной на базе сверлильного станка с небольшими конструктивными изменениями, как показано на рисунке 1.1.

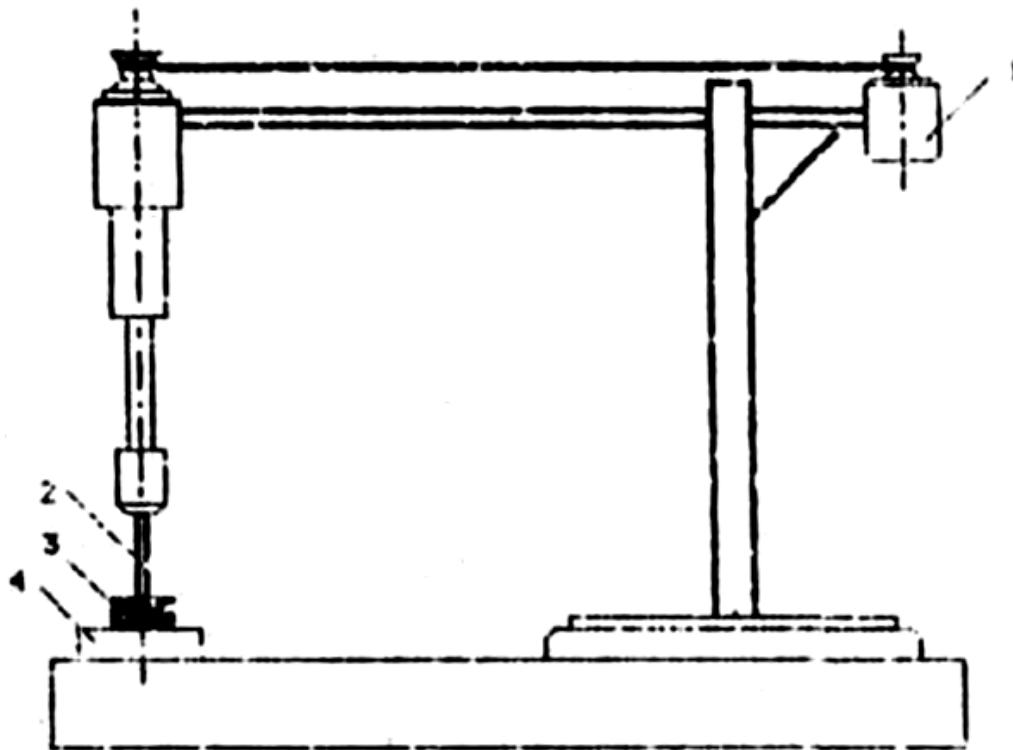


Рисунок 1.1 - Схема лабораторной установки для определения абразивности горных пород по методу Барона–Кузнецова

Основным узлом лабораторной установки является сверлильный станок, состоящий из двигателя 1 и шпинделя, в патроне которого зажат эталонный стержень 2. С помощью устройства вертикальной подачи (на рисунке не показано) стержень давит на образец породы 3, закрепленный в подставке 4. Подставка удерживается в неподвижном положении. Для точного взвешивания образца служат аналитические весы типа ВЛК-500.

Эталонный стержень диаметром 8 мм длиной 50-70 мм изготавливают из термически обработанной стали (инструментальной калиброванной стали-серебрянки У8А ГОСТ 2588-44), чистой обточкой добиваются строгой

перпендикулярности обоих торцов каждого стержня и вы сверливают центральное отверстие диаметром 4 мм и глубиной 10–12 мм. Определение абразивности породы производят «сверлением» образца породы предварительно взвешенным эталонным стержнем. Сначала «сверлят» в течение 10 мин. одним торцом стержня, а затем в течение также 10 мин. – другим. При этом необходимо следить, чтобы нагрев не превышал 200–220°C (указанной температуре соответствует появление побежалости соломенно-желтого цвета). При «сверлении» образец нагружается осевым усилием 150 Н при скорости вращения 400 об/мин. Потеря массы эталонного образца в мг за время проведения опыта принимается в качестве показателя абразивности испытываемой породы. Классификация горных пород по абразивности по методу Барона–Кузнецова представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация горных пород по абразивности по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову

Класс абразивности	Класс пород	Коэффициент абразивности, мг	Характерные породы
I	Весьма малоабразивные	до 5	Известняки, мраморы, мягкие сульфиды без кварца (галенит, сфалерит, пирротин), апатит, каменная соль
II	Малоабразивные	5-10	Сульфидные руды, барито-сульфидные руды; аргиллиты, мягкие сланцы: углистые, глинистые, хлоритовые, хлорито-аспидные
III	Ниже средней абразивности	11-18	Джеспилиты, роговики (рудные и нерудные), кварцево-сульфидные руды, магматические тонкозернистые породы, песчаники кварцевые и аркозовые тонкозернистые, руды железные, известняки окремненные
IV	Среднеабразивные	19-30	Песчаники кварцевые и аркозовые, мелкозернистые диабазы, крупнозернистый пирит, арсенопирит, жильный кварц, кварцево-сульфидные руды, мелкозернистые магматические породы, окварцованные известняки, джеспероиды

Продолжение таблицы 1.2

Класс абразивности	Класс пород	Коэффициент абразивности, МГ	Характерные породы
V	Выше средней абразивности	31-45	Песчаники кварцевые и аркозовые, средне- и крупнозернистые, плагиограниты, нефелиновые сиениты, мелкозернистые граниты, мелкозернистые диориты, порфирита, грейзены, габбро, гнейсы, скарны (рудные и нерудные)
VI	Повышенной абразивности	46-65	Средне- и крупнозернистые граниты, диориты, гранодиориты, порфириты, нефелиновые сиениты, сиениты, кератофиры, пироксениты, монцониты, амфиболиты, сланцы кварцевые и окварцованные, гнейсы
VII	Высокоабразивные	66-90	Порфириты, дориты, граниты, гранитоидные нефелиновые сиениты
VIII	Высшей степени абразивные	свыше 90	Корундосодержащие

Данный тест используется также и в зарубежной практике [25]. Чтобы выяснить, как минеральный состав породы определяет ее механические свойства, были собраны девяносто шесть образцов из десяти провинций Китая и проведены тесты, включая содержание минералов, размер минеральных частиц, абразивность и твердость. Результаты испытаний показали, что между ними существует сильная связь. Посредством обработки данных, нормализации, корреляционного анализа и группировки необработанные данные тестирования были использованы для создания функции прогнозирования с помощью искусственной нейронной сети обратного распространения ошибки (сокращенно BP-ANN). Кроме того, результаты расчетов с использованием этой функции прогнозирования также выявили тенденцию изменения абразивности и твердости в зависимости от содержания минералов и размера частиц.

Абразивность горных пород, определяемая как способность долот к износу горных пород, проверялась методом определения стандартной детали,

который подразумевает измерение потери массы стандартной детали после трения о породу при заданной скорости, давлении и других условиях.

Данные, полученные в результате испытаний, проходили нормализацию в соответствии с диапазонами изменения, представленными в таблице 1.3. Затем по нормализованным данным производилось обучение искусственных нейронных сетей для прогнозирования абразивности и твердости грунта. В качестве исходных данных для прогноза использовались содержание и размер частиц кварца и полевого шпата.

Таблица 1.3 – Параметры и диапазоны их изменения для нормализации данных

Параметры	Максимальное значение	Минимальное значение
Содержание кварца, %	100	4
Размер частиц кварца, мм	2,8	0,049
Содержание полевого шпата, %	90	0
Размер частиц полевого шпата, мм	6,875	0
Абразивность, мг	94,62	6
Твердость, МПа	5836	1156

### Тест CERCHAR

Тест *CERCHAR* [26] был разработан Центром исследований и разработок угольных месторождений Франции (Centre d'Etudes et de Recherches des Charbonnages de France), по этому стандарту разработаны американский стандарт ASTM [27] и его более ранняя версия [28]. Тест *CERCHAR* (*Cerchar Abrasivity Index, CAI*) рекомендован Международным обществом геомехаников ISRM [29]. В [30] описаны наиболее известные комплексы испытаний по определению абразивности, результаты которых используются для оценки износа инструмента не только при проходке

ТПМК, но и при бурении горных пород, при использовании проходческих комбайнов и т. д.

Тест по определению  $CAI$  на абразивность следует выделить как широко используемый тест, особенно при расчете затрат при проходке тоннелей ТПМК. Другой тест на абразивность  $LCPC$  становится все более и более важным при тестировании горных пород и грунтов. Несмотря на то, что оба теста частично регулируются стандартами, они выполняются во множестве вариаций, что приводит к сильно различающимся результатам и необходимости обновления рекомендаций по тестированию. Для практического использования обоих тестов на абразивность авторами предложена уникальная схема классификации.

Индекс абразивности  $CAI$  рассчитывается из диаметра плоской части заостренного штифта  $d$  в миллиметрах после его перемещения (царапания) на расстояние 10 мм по необработанной поверхности образца горной породы при статической вертикальной нагрузке на штифт 70 Н, как показано на рисунке 1.2. Расчет показателя  $CAI$  осуществляется по формуле

$$CAI = \frac{d}{c}, \quad (1.1)$$

где  $d$  – диаметр плоской части остряя;  $c$  – нормирующий множитель,  $c = 1$  мм.

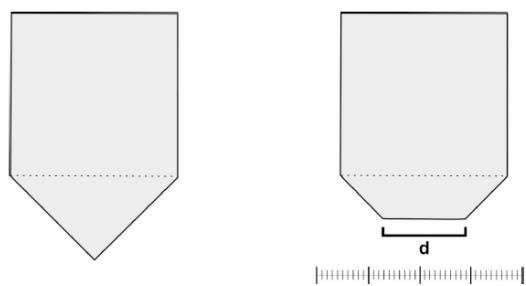


Рисунок 1.2 – Эскиз стального штифта прямоугольной формы до испытания (слева) и после испытания (справа) с плоскостью износа  $d$

Основными параметрами, влияющими на абразивность, являются плотность, степень цементации, прочностные свойства и количество

абразивных минералов в породе. В [31] были проведены 20 различных испытаний на 80 различных породах, в основном на модуль Юнга ( $E$ ), прочность на одноосное сжатие ( $UCS$ ) и  $CAI$ . Основная цель исследования - оценить взаимосвязь между основными механическими свойствами горных пород и значением  $CAI$ . Был разработан ряд простых уравнений и уравнений множественной регрессии с использованием  $CAI$  и других методов тестирования. Результаты исследования показали, что существуют значительные взаимосвязи между основными механическими свойствами горных пород и  $CAI$ .

В [32] с помощью нового испытательного устройства, разработанного *G. West*, были оценены с применением теста  $CAI$  параметры абразива, такие как: сила царапания, энергия царапания и удельная энергия царапания, определяются с помощью специального прибора. Для изучения взаимосвязи абразивных параметров керамзита с внутренними свойствами породы были выбраны три типичных горных материала для строительства (гранит, песчаник и сланец). Результаты исследований показали, что коэффициент истирания  $CAI$  является значимым параметром для количественной оценки не только абразивности породы, но и взаимодействия породы со штифтом, а также износа штифта и эффективности царапания.

В статье [33] изучается влияние скорости перемещения штифта на индекс истирания  $CAI$ . Результаты показали, что изменение скорости скольжения штифта может влиять на износ наконечника штифта. Однако эффект неоднороден и зависит от твердости пород и штифтов. Изменение скорости перемещения штифта также может изменить степень проникновения штифта в поверхность образца. Более твердые штифты проникают глубже в поверхность образца. Однако разница между более твердыми и более мягкими штифтами уменьшается с увеличением скорости перемещения штифта. Проникновение (пенетрация) наконечника штифта в

поверхность образца не зависит от скорости его перемещения в твердых образцах, таких как кварц.

Полученные результаты позволили вывести отношение объема породы, удаляемой при царапании, к объему износа наконечника штифта (*scratch volume to wear ratio, SVWR*), которое используется для определения оптимальной скорости перемещения штифта в различных условиях.

Оптимальная скорость перемещения штифта также может использоваться в качестве ориентира для определения оптимальной скорости режущего инструмента на поверхностях горных пород в практических условиях. Была введена новая система классификации истирания, основанная на *SVWR*, которая показала, что ее можно использовать независимо от твердости штифта.

### Тест LCPC

Тест *LCPC* разработан во Франции в лаборатории *Laboratoire Central des Ponts et Chausées (LCPC)* и описан во французском стандарте NF P18-579 впервые опубликованном в 1990 г. [34], затем переизданном в 2013 г. во Франции [35] и в переводе на немецкий в Германии [36]. Установка для испытаний, названная «Абразиметр», оснащена двигателем мощностью 750 Вт, приводящим в движение металлическую крыльчатку, вращающуюся в цилиндрическом сосуде, в котором находится гранулированный образец. Прямоугольная крыльчатка изготовлена из стандартизированной стали с твердостью по Роквеллу *HRB* 60–75.

Перед испытанием порода должна быть измельчена. Размер зерен пробы должен находиться в диапазоне от 4 до 6,3 мм. Коэффициент абразивности *LCPC* (*LCPC-Abrasivity-Coefficient* или сокращенно *LAC*) рассчитывается как потеря веса крыльчатки за время дробления 5 мин, деленная на вес образца (500 г) по формуле:

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M}, \quad (1.2)$$

где  $LAC$  – коэффициент абразивности по  $LCPC$  (г/т);

$m_0$  – вес крыльчатки до испытания (г);

$m$  – вес крыльчатки после испытания (г);

$M$  – вес материала образца (0,0005 т).

Встречается также его аббревиатура в виде  $ABR$  (*abrasivity coefficient*).

### **Метод NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT)**

Целью статьи [20] является объяснение последствий проходки тоннеля в условиях абразивного и мягкого грунта, а также описание теста *NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT)*, который является одним из подходов к измерению абразивности грунта. Поскольку данный тест отличается от описанных выше тестов *CERCHAR* и *LCPC*, приведем более подробное описание этого метода.

Испытание на истирание грунта *NTNU/SINTEF (SAT)* является результатом и дальнейшим развитием испытаний на истирание горных пород *NTNU/SINTEF*, называемых величиной истирания ( $AV$ ) и величиной истирания режущей стали ( $AVS$ ). Показан схематический обзор испытательного устройства, состоящего из вращающегося стального диска, на который подается грунт с зернами менее 4 мм. При движении грунта на вращающемся диске он проходит под образцом стали, полученным из дисковой шарошки ТПМК. Этот контакт приводит к абразивному износу стального образца. По сравнению с тестом  $AVS$ , который проводится с использованием измельченного каменного порошка размером менее 1 мм, в тесте  $SAT$  используется сухой и измельченный образец грунта с размером зерен менее 4 мм. На рисунках 1.3 и 1.4 показано взаимодействие между образцом стали и грунта для исходного образца  $AVS$  и модифицированного образца  $SAT$ . Первоначально тест  $SAT$  проводился с верхним пределом размера зерен 1 мм, что подробно описано в публикациях [37], [38] и [39]. Из-за относительно ограниченного размера фракции (0-1 мм) установка для испытаний была модифицирована таким образом, чтобы включать зерна

размером до 4 мм [40], что означает, что параметр *SAT* применим для тестирования фракций глины, ила и песка. Тест не может быть проведен на фрагментах размером более 4 мм.

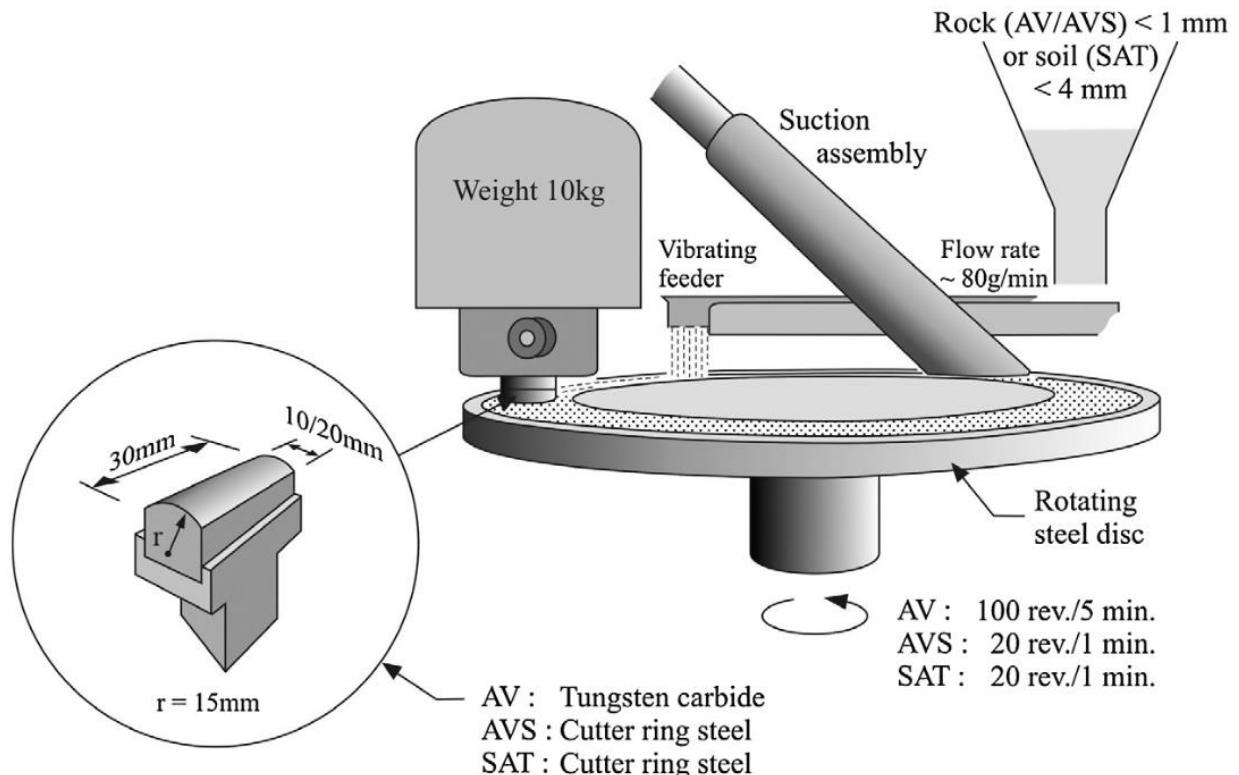


Рисунок 1.3 – Схематический вид установки тестирования *SAT*

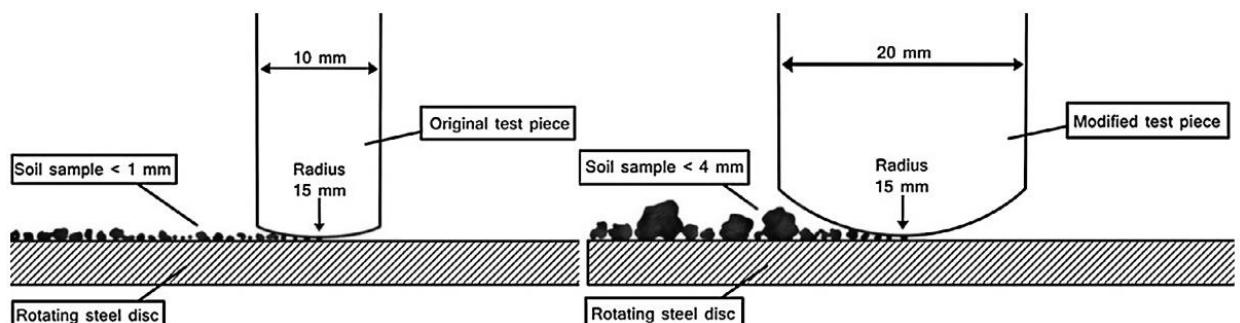


Рисунок 1.4 – Исходные образцы *AVS* (слева) и модифицированные образцы *SAT* (справа) для испытаний

Значение *SAT* рассчитывается как среднее значение измеренной потери веса стального долота в миллиграммах после тестирования. Чтобы быть принятным в качестве значения *SAT*, результаты 2-4 тестов не должны отклоняться более чем на 5 мг.

## Метод RIAT

Испытание на истирание при вдавливании прокаткой (*RIAT*) — это недавно разработанный метод измерения абразивности горных пород. В исследовании [41] испытания *RIAT* были проведены на 17 образцах глубинной породы, а вес, потерянный мини-дисковым резцом (мг) после испытания (*RIATa*), является средним значением 10 равномерно распределенных измерений глубины проникновения резца в породу за 1/100 мм (*RIATi*), для образцов были определены значения скорости проникновения к истиранию (*APR*) и скорости проникновения (*PTR*). Для образцов были определены значения индекса абразивности *CERCHAR (CAI)*, индекса абразивности *LCPC (LAC)* и эквивалентного содержания кварца (*EQC%*). Связь *APR* и *PTR* с *CAI*, *LAC* и *EQC%* исследовали с использованием регрессионного анализа, теста Фишера и эмпирических уравнений между *APR-EQC%*, *PTR-EQC%*, *APR-PTR*, *PTR-CAI*, *APR-LAC*, и *PTR-LAC*. Предложенные уравнения были проверены на трех контрольных образцах и признаны действительными для плутонических пород. Тест *RIAT* использовался при различных скоростях вращения для определения их влияния на образцы, и для каждого образца была предложена оптимальная скорость вращения с использованием параметра *APR*. Сравнение текущих результатов и результатов предыдущих исследований песчаника показало, что тренды *PTR-EQC%*, *APR-PTR* и *PTR-CAI* были схожими. Для этих типов пород было предложено экспериментальное соотношение для *APR-EQC%*. Для твердых и высоко абразивных образцов тенденции *PTR-EQC%*, *APR-PTR* и *PTR-CAI* были одинаковыми для глубинных пород и песчаников, но для образцов со средней и высокой абразивностью скорость проникновения в глубинные породы была меньше, чем в песчаник с точки зрения абразивности.

## **Методы анализа шума (непрерывной акустической эмиссии) при работе режущего инструмента**

Во Всероссийском научно-исследовательском институте методики и техники разведки (далее – ВИТР) разработан метод акустико-спектральной диагностики буримости горной породы [42, 43]. Принцип данного метода заключается в воздействии на образец вращающимся алмазным инструментом и измерении спектра акустического шума разрушения в полосе 7–20 кГц, скорости разрушения и реализуемой мощности. Применение данного метода позволило разработать классификацию горных пород по показателю буримости  $W_{AV}$  удельной акустической энергии, выделившейся при разрушении, позволяющая связать параметр  $W_{AV}$  с категорией пород ЕНВ [44]. В классификации устанавливается 8 формаций горных пород. Для типизации формаций использованы свойства горных пород, влияние которых на износ инструмента доказано практикой бурения: твердость, абразивность, зернистость, трещиноватость, нарушенность, способность заполировывать алмазный инструмент.

В [45] исследуется возможность оценки абразивности горных пород путем обработки акустических и вибрационных сигналов, генерируемых во время бурения. Испытания проводились на 13 образцах магматических пород. Была исследована взаимосвязь между акустическими параметрами, параметрами вибрации для бурения и абразивностью породы. Результаты этого исследования показывают возможность оценки свойств горных пород путем обработки сигналов, генерируемых во время операции бурения горных пород. Этот подход может быть использован в реальных промышленных условиях путем простой установки акустических датчиков и датчиков вибрации на буровой установке для быстрого, точного и неразрушающего определения абразивности горных пород и связанных с ними рабочих параметров без необходимости останавливать процесс бурения для отбора проб и проведения лабораторных измерений.

В [46] была предпринята попытка исследовать влияние пород с различными физическими свойствами, т. е. прочностью на сжатие и абразивностью, на уровень звука при бурении с использованием отбойного молотка. Результаты этого исследования показывают, что увеличение усилия прижатия увеличивает уровень звука на более высоких среднечастотных частотах в шумовом спектре. Исследование также показывает, что повышение уровня звука может произойти при увеличении прочности на сжатие и снижении абразивности горных пород. Следовательно, повышенная прочность на сжатие и меньшая абразивность горных пород потребуют более высокого давления воздуха и толчков для достижения оптимальной скорости проникновения и, следовательно, приведут к более высокому уровню шума.

### **Влияние содержания кварца на абразивность грунта**

В [47, 48] произведена оценка между содержанием кварца в горных породах и индексом абразивности *CERCHAR (CAI)*. Результаты исследования выявили прямую зависимость между содержанием кварца в породах и абразивностью. Из сравнения теоретической и экспериментально определенной абразивности было установлено влияние минералогического состава и других факторов. Установлено, что кварц, за некоторыми исключениями, является наиболее абразивным породообразующим минералом.

В [49] рассмотрены взаимосвязь индекса абразивности *CAI* пород с их петрографическими свойствами, в частности, с содержанием кварца и размером зерен. Обнаружена хорошая линейная связь между параметрами *CAI* и средним размером зерна кварца. Результаты испытаний также показали, что на абразивность влияют минералогический состав, тип цемента, степень цементации, содержание кварца и средний размер кварцевого зерна. Установлено, что абразивность породы снижается при низкой степени цементации между абразивными минералами. Значения *CAI* и петрографические свойства могут быть использованы для оценки расхода

инструмента при подземных работах. Было замечено, что при увеличении значений  $CAI$  увеличивается расход инструмента.

В [50] было изучено влияние различных параметров, в том числе эквивалентное содержание кварца ( $EQC$ ) на индекс абразивности  $CERCHAR$  ( $CAI$ ) на различных типах горных пород. Было установлено, что на уровень истираемости песчаника влияют, помимо прочности, минералогические факторы. В то время, как на абразивность метаморфических пород в большей степени влияют минералогические факторы. В интрузивных магматических породах установлено, что эквивалентное содержание кварца ( $EQC$ ) оказалось ключевое влияние на изменение индекса  $CAI$  по сравнению с другими параметрами. Установлено, что абразивность различных пород может сравниваться путем оценки эквивалентного содержания кварца ( $EQC$ ) с помощью предложенной формулы расчета  $CAI$  через  $EQC$ .

### **Влияние формы частиц на абразивность грунтов**

Сопоставляя результаты нахождения коэффициентов абразивности для больших кусков и мелких зерен пород, следует иметь в виду, что при одинаковом минералогическом составе абразивность обломочных пород обычно выше абразивности кристаллических горных пород. Это обусловлено характером шероховатости поверхности трения. Чем больше пористость и неоднородность породы, крупнее обломки и остроугольнее их форма, тем больше шероховатость обломочной породы. С увеличением шероховатости уменьшается реальная площадь контакта металла резцов с породой, возрастает контактное давление, которое может достигать твердости металла.

Это означает, что для сыпучих грунтов – песков одного состава абразивность зерен с их укрупнением будет увеличиваться.

В [51] были проведены экспериментальные исследования для оценки изменения износа скребков в зависимости от содержания кварца, размера частиц, формы частиц и содержания воды. Результаты исследования показали, что износ скребков увеличивается с увеличением содержания

кварца. Это связано с эффектом дробления частиц и адгезии известнякового песка. По мере увеличения среднего размера частиц трение между скребком и частицами песка сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Таким образом, и износ скребков сначала увеличивается, а затем снижается с увеличением среднего размера частиц. Тенденция в целом сопоставима с соответствующими изменениями износа скребков в зависимости от содержания воды. Поскольку частицы кварца сталкиваются с частицами песка и разрушают микроскопическую систему трения, состоящую из скребков и неровностей, износ скребков уменьшается по мере увеличения округлости и уменьшения скорости перемещения.

#### **1.4 Практическое применение методов оценки абразивности и их результаты, полученные на разных грунтах и горных породах**

Как отмечается в [52], чтобы оптимизировать потребление резцов, важно проанализировать силы сдвига и ударные нагрузки на резец, а также свойства, определяющие взаимодействие пород и резцов. Одним из таких определяющих свойств является абразивность, которую можно определить с помощью теста *LCPC* и теста *CERCHAR* на индекс абразивности *CAI*. Поскольку *CAI* обеспечивает своевременную и надежную оценку абразивности пород на участке проходки тоннеля, результаты *CAI* можно использовать для оценки жизненного цикла и стоимости замены резцов. Исследования показывают, что значение *CAI* в значительной степени зависит от минералогических, физических и механических свойств горных пород. Поэтому в этом исследовании образцы магматических, метаморфических и осадочных пород были проанализированы на предмет их физико-механических характеристик и были получены соответствующие значения *CAI*. Кроме того, на основе экспериментальных данных предложена оценка расхода инструмента. Также для разработки новых прогностических и

корреляционных моделей использовались статистические и программные вычислительные инструменты, такие как многомерный регрессионный анализ (*multivariate regression analysis – MVRA*), искусственная нейронная сеть (*artificial neural network - ANN*) и адаптивная нейро-нечеткая система вывода (*adaptive neuro-fuzzy inference system – ANFIS*). Физико-механические свойства, такие как прочность на сжатие и растяжение, пористость и плотность в сухом состоянии, служили входными параметрами для прогнозирования *CAI*. Был проведен сравнительный анализ различных показателей эффективности с целью установления эффективности разработанных моделей. Результаты показывают, что модель *ANFIS* обеспечивает лучшую корреляцию между входными и выходными параметрами.

В [53] представлено экспериментальное исследование износа инструмента и абразивности сыпучих грунтов, использующее специально разработанную испытательную систему для оценки износа резцов машин, особенно при проходке тоннелей с мягким грунтом, где влияние истирания грунта на работу проходческих машин является значительным. В испытательной системе, снабженной стальными крышками различной твердости, крыльчатка вращается со скоростью 60 об/мин в зернистых образцах грунта в камере при окружающем давлении до 10 бар. Разработанная система позволяет количественно оценивать абразивные характеристики грунтов путем измерения потери веса на специальных кожухах крыльчатки с учетом градации грунта, минерального состава, сферичности и окатанности зерен песков, обводненности и твердости инструмента. Предварительные результаты испытаний показывают, что содержание воды, угловатость частиц и относительная твердость между инструментом и грунтом оказывают значительное влияние на износ инструмента и истирание грунта. В ходе проведенных испытаний было замечено, что угловатые зерна песков вызывают значительно более высокий

износ инструмента, чем круглые зерна песков в сухом состоянии. Износ инструмента сначала увеличивается с содержанием воды, пока оно не достигнет примерно 7–10%; за пределами этого диапазона более высокое содержание воды снижает износ инструмента. Увеличение отношения твердости (инструмент/минерал), соответствующее увеличению твердости инструмента и/или снижению твердости минерала, приводит к уменьшению износа инструмента в сухих песчаных смесях, но эта тенденция не является монотонной для песчаных смесей с высоким содержанием воды.

В [54] представлены отдельные результаты исследования износа инструмента при механизированной проходке тоннелей в крупнозернистом грунте. Было проведено несколько лабораторных испытаний грунта на истирание, и результаты коррелировали с минералогическим составом, формой и шероховатостью поверхности зерен и кривой размера зерен грунта. Анализ результатов ясно подтверждает хорошо известную корреляцию между абразивностью грунта и содержанием кварца и для протестированных грунтов может дать количественную оценку соответствующего влияния размера и шероховатости зерна. Сообщаются и обсуждаются результаты, полезные для количественной оценки положительного эффекта добавления различных химических агентов, вводимых в виде пены в процессе, известном как кондиционирование грунта, обычно выполняемом при механизированной проходке тоннелей с использованием машин для проходки тоннелей и технологии противодавления грунта для минимизации расхода инструмента.

В [55] представлена простая и практическая классификация типов грунта для прогнозирования поведения грунта и геологических рисков как при обычной, так и при механизированной проходке тоннелей. С помощью этого метода грунты классифицируются по двум параметрам. Во-первых, распределение зерна грунта. С этой целью были проведены испытания образцов почвы из испытательного котлована и геотехнических скважин, и для каждого образца был рассчитан процент частиц, согласно заданным

размерам. Вторым параметром является индекс консистенции, который рассчитывается исходя из пределов Аттерберга. Грунты были разделены на десять групп на основе этих двух параметров, а затем были спрогнозированы поведение грунтов и геологические опасности для каждого класса на основе опыта проходки туннелей. Результаты показали, что прогнозы в значительной степени соответствовали фактическим условиям. Это позволило использовать разработанные прогнозы для предварительного и постоянного проектирования облицовки и рекомендаций по кондиционированию грунта, а также для конструктивного проектирования различных станций.

Статья [56] была посвящена исследованию геотехнических свойств и актуальным вопросам механизированной проходки тоннелей метрополитена. Геологические слои на трассе тоннеля состоят из аллювиальных отложений (от мелкозернистых до крупнозернистых с небольшим количеством булыжника и валунов) в южной и северной частях и чередованием слоев мягких пород (мергели, песчаники и аргиллиты) в средней части. Исследованы основные объекты, включающие детальную оценку физико-механических параметров, гранулометрический состав грунта, процентное содержание мелкозернистости, эквивалентное содержание кварца, проницаемость и консистенцию. Основными геотехническими проблемами являются наличие крупногабаритных частиц породы, смешанное состояние забоя, абразивность грунта и засорение глиной проемов для прохода разработанного грунта, и для изучения этих проблем построены в основном четкие геологические модели недр. Наконец, на основе полученных данных предлагается правильный тип ТПМК и дополнительный кондиционирующий материал для каждой секции тоннеля.

Производительность бурения и износ инструмента являются двумя обязательными параметрами для оценки времени и стоимости операции. В [57] с использованием электрического бурильного молотка и двух типов

буровых долот были проведены испытания бурения на месте на трех типах горных пород для оценки производительности бурения и износа инструмента. Экспериментальные результаты показали, что наибольшая производительность и наибольший износ долота наблюдаются при бурении песчаника, а наименьшие значения скорости проходки и износа наблюдаются в амфиболите и базальте. Кроме того, скорость бурения связана с механическими свойствами породы. Регрессионный анализ показал, что корреляция характеристик с прочностью на одноосное сжатие, прочностью на растяжение и индексом точечной нагрузки, соответственно, является значимой и надежной. Что касается износа инструмента, эквивалентное содержание кварца показало разумную корреляцию с износом долота по сравнению с индексом абразивности  $CAI$  и коэффициентом абразивности  $LAC$ .

В [58] описано изучение абразивности флювиогляциальных гравийных пород, расположенных в Центральном Дублине. Был исследован очень плотный материал с большим содержанием булыжников и валунов. Был проведен обширный набор лабораторных испытаний на абразивность, которые включали испытания образцов гравия (например,  $SAT$ ,  $SGAT$  и  $LCPC$ ), а также испытания отдельных булыжников (например, точечная нагрузка,  $CAI$ ,  $Sievers' J/SJIP$ ). Лабораторные результаты показали очень высокую ударную вязкость (испытания  $LCPC$ ) и абразивную стойкость при скольжении и раздавливании от низкой до средней (тесты  $SAT$  или  $SGAT$ ). Испытания  $CAI$  на отдельных булыжниках показали, что это материал средней абразивности, в отличие от испытаний  $Sievers' J/SJIP$ , которые показали низкую твердость поверхности. Четкой взаимосвязи между результатами различных тестов обнаружено не было. Аналогичным образом, не было доказано сильной корреляции между результатами и различными геотехническими параметрами или содержанием кварца. Размер отдельных частиц гравия, булыжников и валунов может иметь решающее значение для

оценки износа. Однако более крупные обломки в основном состоят из известняка, который менее абразивен и имеет меньшую поверхностную твердость. Легкость отделения обломков от общей матрицы будет иметь важное влияние на износ стали режущей кромки. Угловатость зерен и сферичность материала являются важными параметрами дислокации обломков. Ограничением этого и подобных исследований является отсутствие тестов, способных включать частицы размером от 10 мм до булыжника. Однако очевидно, что ни один тест не может быть использован для оценки абразивности такого материала, как речно-ледниковый гравий.

В [59] были изучены абразивные и прочностные свойства различных типов горных пород. На основании собранных данных обобщены характеристики неопределенности абразивности пород и эксплуатационных параметров ТПМК. В качестве случайных величин в данном исследовании рассматривались абразивность породы, прочность на сжатие, прочность на растяжение, скорость продвижения ТПМК и скорость вращения режущего инструмента ротора. Был проведен вероятностный анализ для исследования поломки резца и группы резцов при выемке крепких пород. Результаты показывают, что изменчивость геологических и технических факторов не оказывает существенного влияния на отказ резцов, в частности, на отказ группы резцов. Поэтому важно анализировать характеристики износа резцов в вероятностной основе, чтобы избежать переоценки срока службы резцов. Наконец, для принятия в промышленности предлагается расчетная диаграмма надежности для оценки потенциального отказа резца.

Исследование [60] направлено на изучение возможности экспериментальных взаимосвязей параметров прочности и минералогической твердости с тестами *CAI* и *LCPC*. Для этой цели были отобраны 18 образцов гранитных строительных камней и определены эквивалентное содержание кварца (*EQC*), предел прочности на одноосное сжатие (*UCS*) и прочность на растяжение по бразильскому методу (*BTS*), а также индексы абразивности

*CERCHAR* и *LCPC* (*CAI* и *LAC*). Результаты показали отсутствие какой-либо существенной зависимости между прочностными и абразивными свойствами. Однако при оценке одновременного воздействия *EQC* и *UCS* с использованием индекса абразивного износа горных пород ( $RAI = UCS \times EQC$ ) были получены достоверные эмпирические зависимости *RAI-CAI* и *RAI-LAC*. Чтобы исследовать одновременное влияние *UCS*, *BTS* и *EQC*, был введен безразмерный параметр (т.е. модифицированный индекс истирания породы;  $MRAI = (UCS \times BTS) \times EQC$ ). Более того, было обнаружено, что эмпирическая связь *MRAI-CAI* была более значимой и достоверной, чем предыдущие зависимости. Проверка предложенной взаимосвязи со значениями других исследователей и шестью новыми образцами для оценки *CAI* и *LAC* на основе *UCS*, *BTS* и *EQC* оказалась очень точной для гранитных строительных камней.

В [61] десять образцов потенциально абразивных пород, отобранных в различных местах и охватывающих магматические, метаморфические и осадочные породы, были подвергнуты комплексной программе лабораторных испытаний. Испытания проводились с применением тестов на истирание стали *NTNU/SINTEF (AVS)* и *J*-миниатюрные сверла Сиверса (*SJ*), а также *CERCHAR* и *LCPC* на абразивность горных пород. Результаты испытаний *SJ* и *AVS* были дополнительно использованы для расчета индекса срока службы резца (*CLI*), который оценивает срок службы шарошек ТПМК в часах бурения. В этом исследовании было проведено сравнительное исследование на устройстве *NTNU/SINTEF* для определения абразивности горных пород путем изменения размера частиц порошка для истирания горных пород и скорости вращения стального диска. Результаты испытаний *NTNU/SINTEF AVS* показали постепенное снижение абразивности с соответствующим уменьшением размера зерна исследуемых фракций. Увеличение износа образца наблюдалось при скорости испытания 10 об/мин по сравнению со стандартной скоростью испытания 20 об/мин. Также

обсуждались соответствующие корреляции  $CLI$ , значения  $SJ$  и  $AVS$  с индексом абразивности  $CERCHAR$  ( $CAI$ ) и коэффициентом абразивности  $LCPC$  ( $ABR$ , г/т).

В [62] тесты на абразивность  $LCPC$  и  $CERCHAR$ , а также полный набор тестов на механические и физические свойства породы были проведены на 51 образце породы, отобранном в разных местах Пакистана. Кроме того, были выполнены петрографические исследования 48 образцов горных пород, а также вычислены  $F$ -значение Шимазека и индекс абразивности горных пород ( $RAI$ ). Для анализа результатов теста использовалась регрессия наименьших квадратов. Первоначально значения коэффициента абразивности  $LCPC$  ( $ABR$ ) были сопоставлены с тестами индекса абразивности  $CERCHAR$ , и были соблюдены разумные соотношения. Были обнаружены статистически значимые отношения между  $ABR$  и геотехническими индексами износа (значение  $F$  и  $RAI$ ). Также выявлены возможные корреляции результатов испытаний  $LCPC$  со свойствами породы. Наконец, был применен множественный регрессионный анализ, чтобы найти статистически значимую корреляцию  $ABR$  с петрографическими и физико-механическими свойствами породы. Результаты испытаний показали, что  $RAI$ , прочность на растяжение по бразильской схеме и средний размер зерна кварца оказываются статистически лучшими предвестниками  $ABR$  на основе определенных свойств породы.

В [63] описаны исследования геотехнических аспектов спецификации ТПМК на 3-й линии метро Тебриза в Иране. Целью исследований являлось проведение теста на абразивность горных пород  $LCPC$  для изучения характеристик износа рабочих крыльчаток для испытаний  $LCPC$  из материалов различной твердости. Испытания  $LCPC$  были проведены на двух твердых и абразивных минералах - кварце и гранате. Что касается потери веса, результаты испытаний показали обратную зависимость между твердостью материала и соответствующими значениями  $ABR$  (г/т). Было

проведено микроскопическое исследование для изучения механизмов износа выбранных рабочих крыльчаток, испытанных как на образцах кварца, так и на образцах граната. Микрофотографии рабочих крыльчаток из стали *LCPC* показали деформацию борозды, сопровождающуюся микрорезанием и хрупким разрушением в случае мягких стандартных испытательных рабочих крыльчаток (70-75 *HRB*). Когда твердость материала рабочих крыльчаток была увеличена с (46-48 *HRC*) до (78-82 *HRC*), механизм износа начал проявлять микрорезание и хрупкое разрушение. Для обоих минералов в целом с увеличением твердости рабочих крыльчаток наблюдалось уменьшение деформации материала наряду с постепенным увеличением хрупкого разрушения. В случае кварцевого минерала наблюдалась большая потеря массы материалов крыльчатки и, следовательно, более высокие значения *ABR* (г/т) из-за угловатой морфологии кварца по сравнению с округлыми зернами граната. При сравнении *ABR* (г/т) кварца с гранатом было обнаружено, что он увеличивается на 48%, 57%, 59% и 147% при испытаниях с использованием рабочих крыльчаток 46-48 *HRC*, 54-56 *HRC*, 60-61 *HRC* и 78-82 *HRC* соответственно.

В [64] были исследованы 12 типов горных пород различного происхождения с использованием прочности на одноосное сжатие (*UCS*), бразильского теста на прочность при растяжении, а также тестов скорости продольной волны и *LCPC*, и были проведены микроскопические наблюдения, чтобы получить корреляцию для оценки коэффициента абразивности *LCPC* путем проведения обычных испытаний по механике горных пород. Используя эквивалентное содержание кварца, скорость продольных волн и индекс хрупкости породы, была получена линейная корреляция с коэффициентом детерминации ( $R_2$ ) 93,3% с использованием программы статистической обработки *SPSS* для оценки *LAC*.

## **1.5 Нерешенные вопросы, постановка цели и задач исследования**

Обзор показал, что на сегодняшний день, в особенности в отечественной практике, нет единого подхода при оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов, а также переноса результатов лабораторных исследований на натурные условия. Отсутствуют в большинстве случаев зависимости, позволяющие сравнивать полученные различными методами результаты.

Отсутствие надежных методов оценки абразивности грунтов и выявления влияния различных параметров на скорость изнашивания в настоящее время рассматривается как недостаток геотехнических исследований на этапах технико-экономического обоснования, проектирования и строительства проходческих сооружений с применением ТПМК. Тема в последнее время привлекает широкое международное внимание и интерес.

Цель исследований: установление связей между показателями абразивности по методам вращающихся эталонов полого стержня и крыльчатки не только для скальных, но и для дисперсных грунтов, и разработка на этой основе лабораторного метода оценки абразивных свойств грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Определение преобладающих типов грунта при проходке тоннелей с помощью ТПМК для формулировки технических требований к методам определения абразивности грунтов.
2. Разработка экспериментальных лабораторных установок для оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов по методам Л. И.

Барона – А. В. Кузнецова (метод вращающегося полого стержня) и LCPC (метод вращающейся крыльчатки).

3. Установление связей коэффициента абразивности с прочностными параметрами и размером кусков скальных грунтов, а также с размером зерен и содержанием кварца дисперсных грунтов.

4. Установление связей коэффициентов абразивности, полученных по обоим методам, друг с другом на основе сравнительных испытаний на одних и тех же грунтах.

5. Проведение экспериментальных исследований на разработанной установке для определения особенностей фракционного состава грунтов по методу вращающейся крыльчатки и изменения его параметров в зависимости от времени испытания.

6. Установление вида и параметров вероятностных распределений фракционного состава проб при их дроблении и оценка связи этих параметров с показателем абразивности LAC по методу вращающейся крыльчатки.

7. Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по коэффициентам абразивности и по скорости износа режущего инструмента ТПМК.

Основные результаты, полученные при решении указанных задач, изложены в [65].

## 2 Материалы, оборудование и методы исследования

### 2.1 Анализ типов грунтов при проходке тоннелей с помощью ТПМК

Для учета свойств грунтов была использована статистика по проходке тоннелей метрополитена в московском регионе в период с 2015 по 2020 гг., представленные в таблице 2.1. Исходные данные усреднялись с помощью взвешенного среднего.

Для породы с номером  $j$  среднее значение содержания рассчитывается по формуле взвешенного среднего

$$MS_j = \frac{\sum_{i=1}^N l_i s_i}{\sum_{i=1}^N l_i}, \quad (2.1)$$

где  $MS_j$  – среднее значение содержания  $j$ -той породы;  $l_i$  – длина  $i$ -того участка.

По результатам анализа типов грунтов, указанных в таблице 2.1, можно сделать вывод, что объемы проходки в дисперсных грунтах значительно превышают объемы проходки в скальных грунтах. На основании этого можно сделать вывод, что методы определения абразивности грунтов должны быть применимы как к скальным, так и к дисперсным грунтам, причем к дисперсным – в первую очередь.

В данной работе автор делает акцент на двух методах: отечественный метод Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (вращающегося полого стержня), предназначенный для определения абразивности скальных грунтов, а также метод *LCPC* (метод вращающейся крыльчатки), первоначально разрабатывавшийся также для скальных грунтов. В то же время, как показала практика, метод *LCPC* может быть адаптирован для определения

абразивности и дисперсных грунтов, поскольку предусматривает предварительное дробление кусков скального грунта до фракции  $-6,3+4,0$  мм и размалывание его в сосуде с помощью крыльчатки.

Таблица 2.1 – Данные по типам грунтов при проходке тоннелей в г. Москве за 2015-2020 гг

Метро Москвы 2015-2020 гг			Грунты, %				
Линия	Длина тоннелей, м	Аббревиатура	скальные, полу skalьные			дисперсные	
			песчаник	известник	мергель	песок, супесь	суглинок, глина
Деловой центр - Нижняя Масловка	12317	С3 БКЛ	0	30,3	24,5	15,2	30
Авиамоторная- Нижегородская улица	11240	СВУ БКЛ	0	22	11	18	49
к/с за Юго-Восточная- Авиамоторная	7864	КЖЛ-11	0	0	0	56	44
к/с за Юго-Восточная- Некрасовка	9998	КЖЛ-10	0	0	0	59,4	40,6
улица Новаторов - Коммунарка	23400	ЛМ1	0	0	0	23,7	76,3
Деловой Центр - Парк Победы	2000	КСЛ	0	76,5	15	0	8,5
Кунцевская - Проспект Вернадского	12873	ЮЗУ БКЛ	0	0	0	62,3	37,7
Улица Новаторов - Каходская	13118	ЮУ БКЛ	0	0	0	47	53
Кунцевская - Хорошевская	7531	ЗУ БКЛ	0	6	0	47	47
Боровское шоссе - Рассказовка	26028	КСЛ	0,2	0	0	32,8	67
Сокольники - Марьина Роща	13730	СВУ-2	0	32	45	0	23
<b>Сумма протяженности</b>	<b>140099</b>	<b>Среднее</b>	<b>0,037</b>	<b>8,98</b>	<b>7,661</b>	<b>32,867</b>	<b>50,456</b>
<b>По видам грунтов</b>					<b>16,678</b>		<b>83,322</b>

Как показал опыт проходки тоннелей метро в Москве, более 83 % пройдено по дисперсным грунтам, и менее 17 % – по скальным, что предъявляет соответствующие требования к выбору методов определения

абразивности, среди которых как основной при соответствующей адаптации может быть рекомендован метод *LCPС*, предусматривающий дробление пробы с помощью вращающейся крыльчатки и применимый как для скальных, так и для дисперсных грунтов, для которого абразивность грунтов оценивается по уменьшению веса крыльчатки в процессе дробления пробы, пересчитанной в коэффициент *LAC*.

## 2.2 Исходные образцы скальных и дисперсных грунтов для испытаний

Испытания проводились на пробах скальных и дисперсных грунтов. Отбор и подготовка образцов скальных горных пород для испытаний на прочность осуществлялись по ГОСТ 21153.0–75. Для изготовления образцов были извлечены штуфы из двух мест проходки ТПМК: известняки на станции метро «Суворовская» и доломиты на станции «Рижская» Большой кольцевой линии (БКЛ).

Представителем скальных грунтов выступали штуфы известняков (а) и доломитов (б) из двух мест проходки ТПМК: станция метро Суворовская и БКЛ Рижская (рисунок 2.1).

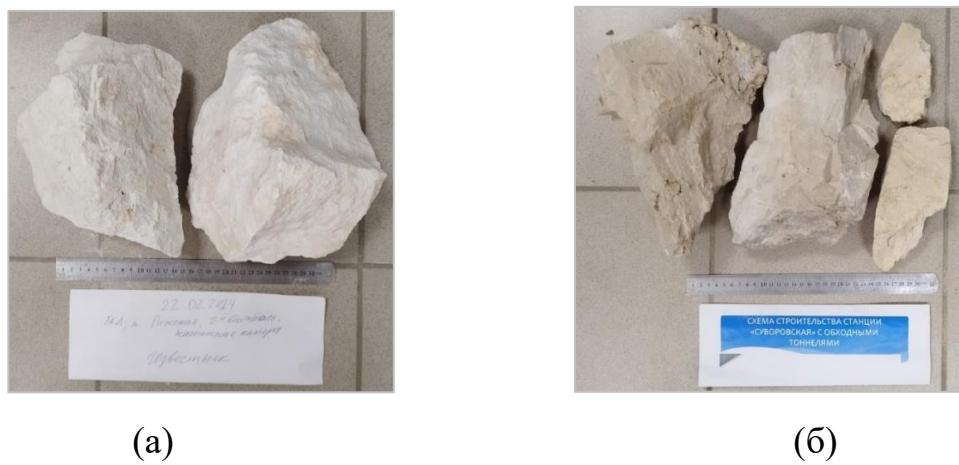


Рисунок 2.1 – Штуфы для изготовления образцов из двух мест проходки ТПМК: известняков со станции БКЛ «Рижская» (а) и доломитов со станции метро «Суворовская» (б)

Для определения предела прочности при сжатии из известняков и доломитов были изготовлены кубические образцы  $40 \times 40 \times 40$  мм  $\pm 2$  мм, а по бразильской схеме – цилиндрические образцы с диаметром  $\varnothing 40 \times 40 \pm 2$  мм.

Для определенности обозначения имели букву R (лат.) или Р (русск.) для известняка со станции Рижская, и букву S (лат.) или С (русск.) для доломита со станции Суворовская. В обозначениях использовались также цифры, первая из которых 0 обозначала испытания при растяжении, а цифра 1 – при сжатии. Вторая цифра означала номер образца. Изготовленные образцы представлены на рисунках 2.2 и 2.3.



Рисунок 2.2 – Фото образцов известняка со станции Рижская БКЛ до испытаний на предел прочности при сжатии



Рисунок 2.3 – Фото образцов доломита со станции Суворовская БКЛ до испытаний на предел прочности при сжатии

Для определения предела прочности при растяжении по бразильской схеме изготавливались цилиндрические образцы с диаметром  $\text{Ø}40 \times 40 \pm 2$  мм, представленные на рисунках 2.4 и 2.5, измерялись их размеры, их взвешивали и находили среднюю плотность образцов правильной формы по ГОСТ 31436-2011.



Рисунок 2.4 – Фото образцов известняка со станции Рижская БКЛ до испытаний на предел прочности при растяжении



Рисунок 2.5 – Фото образцов известняка со станции Суворовская до испытаний на предел прочности при растяжении

Куски породы, образовавшиеся после испытаний на сжатие и растяжение, были использованы для испытаний по определению абразивности пород по методу врачающегося полого стержня.

Затем для испытаний по методу вращающейся крыльчатки, полученные куски породы были раздроблены до размеров фракции 4,0–6,3 мм.

В качестве проб дисперсных пород был использован кварцевый песок различной крупности и песок одного из карьеров Московской области для подготовки испытуемых смесей с разным содержанием кварца и крупностью частиц (рисунок 2.6 (а) и (б)).



Рисунок 2.6 – Кварцевый песок различной крупности (а) и песок одного из карьеров Московской области (б) для подготовки испытуемых смесей с разным содержанием кварца и крупностью частиц

### **2.3 Испытание по определению минерального (фазового) состава проб скальных и дисперсных грунтов**

Определение содержание кварца в скальных и дисперсных грунтах осуществлялось с помощью рентгенофазового анализа методом рентгеновской дифрактометрии на компьютеризированном дифрактометре рентгеновском «ADP2 – 01» с использованием Fe K $\alpha$  излучения. На спектрограммах, представленных ниже, по оси ординат отложены интенсивность отраженного излучения (имп./с), по оси абсцисс – угол отражения ( $2\theta$ ) в градусах.

При обработке спектра определялись угловое положение, высота (интенсивность) дифракционных пиков, межплоскостное расстояние и их геометрические параметры [66, 67]. По ним производилась идентификация состава исследуемых проб.

Межплоскостные расстояния определяют экспериментально, а идентификацию рентгенограммы проводят путем сопоставления экспериментально полученной рентгенограммы с литературными данными или при расчете теоретической дифрактограммы.

Всего было исследовано 5 проб (Приложение А).

1. Проба №1 дисперсного грунта – песок мелкий карьерный (ПМ).
2. Проба №2 дисперсного грунта – песок пылеватый (ПП).
3. Проба №3 дисперсного грунта – песок средней крупности карьерный (ПСК).
4. Проба №4 известняка (скального грунта), извлеченного из массива при проходке тоннеля станции метро Рижская (Р).
5. Проба №5 доломита (скального грунта), извлеченного из массива при проходке тоннеля станции метро Суворовская (С).

Результаты исследований приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Состав проб

Номер пробы	Содержание по элементам, %				
	SiO <sub>2</sub>	CaMgAlSiO	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Ca Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
1	93,7	6,3	–	–	–
2	86,3	–	13,7	–	–
3	89,4	10,1	0,5	–	–
4	–	–	–	100	–
5	–	–	–	1,7	98,3

Основное содержание следующих минералов:

SiO<sub>2</sub> – кварц; CaMgAlSiO – силикат кальция–магния–алюминия;

KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> – микроклин; CaCO<sub>3</sub> – кальцит; Ca Mg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – доломит.

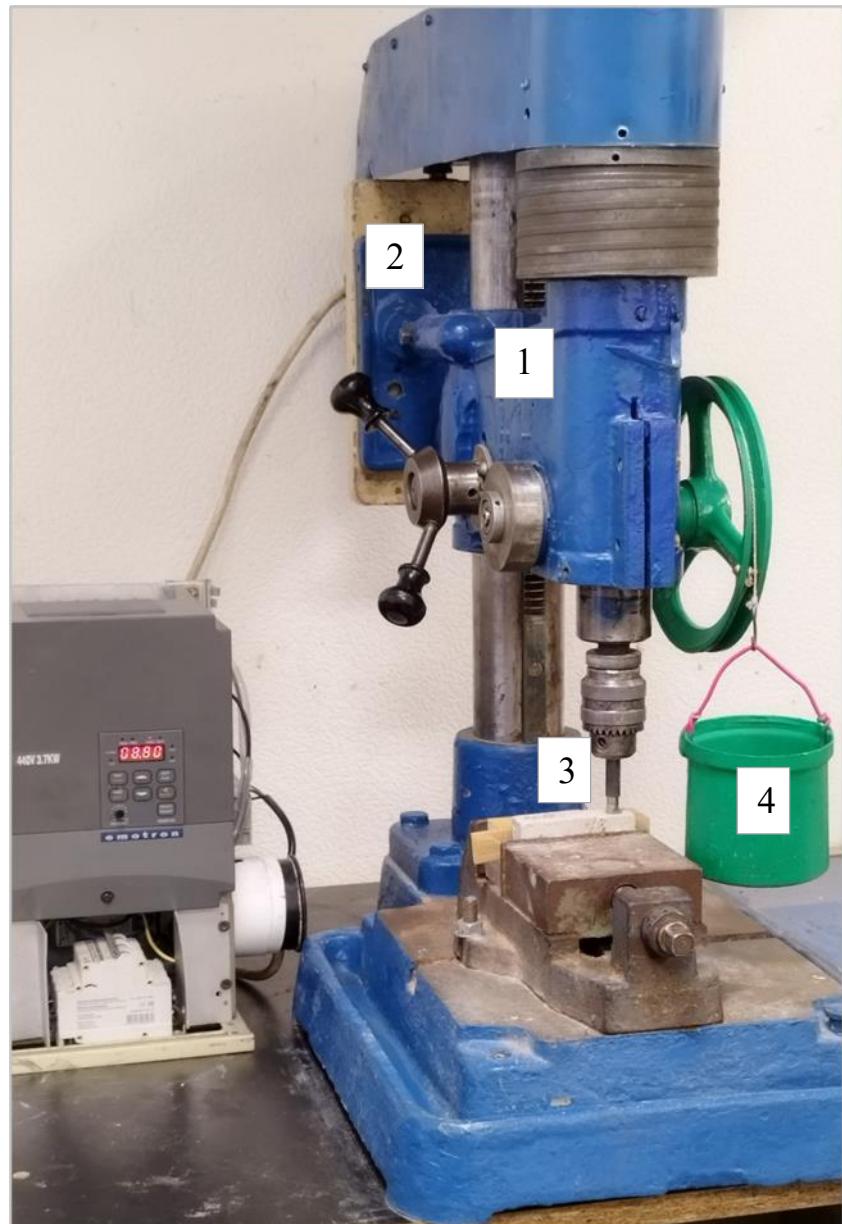
## **2.4 Методика исследования абразивности по методу Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (вращающегося полого стержня)**

Методика определения абразивности скальных горных пород по методу вращающегося полого стержня является наиболее широко распространенной в России (а также странах бывшего СССР). Данный метод утвержден в Российской Федерации в качестве стандартного по оценке абразивности горных пород [68, 69].

Исторически сложилось, что показатель абразивности по Барону-Кузнецову применялся в основном на предприятиях по добыче угля, где механизации подвергались работы по проведению выработок с целью обеспечения доступа к залежам полезного ископаемого, то есть угля, и непосредственно его добыча при помощи проходческих и добывающих комбайнов [70].

Для определения абразивности скальных и дисперсных грунтов используется специальная установка на базе сверлильного станка, разработанная на кафедре физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС в 2022–2023 гг. Данная установка в одном варианте использовалась для определения абразивности скальных горных пород по методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова, а в другом, после небольшого переоснащения – как для определения абразивности скальных и дисперсных грунтов, так и скорости износа режущего инструмента по методу *LCPC*.

Для проведения исследования по методу вращающегося полого стержня была использована модифицированная установка, разработанная для оценки абразивности по методу *LCPC*. Общий вид установки представлен на рисунке 2.7.



1 – вертикальный сверлильный станок; 2 – двигатель; 3 – стержень; 4 – груз с осевым усилием 150 Н

Рисунок 2.7 – Общий вид установки для проведения исследования по методу Барона–Кузнецова

Для проведения испытаний необходимо предварительно изготовить эталонный стержень диаметром 8 мм длиной 50-70 мм из термически обработанной стали (У8А). С обеих сторон высверливают центральные отверстия диаметром 4 мм и глубиной 10–12 мм. Подготавливается установка на базе сверлильного станка. Путем навешивания различных грузов на ручку

управления высотой шпинделя сверлильного станка регулируется осевое усилие прижатия эталонного стержня поверхности образца. Усилие без вращения шпинделя измеряется динамометром, на который опирается эталонный стержень, зажатый в патроне. Испытания производятся на обрезках штуфов, оставшихся при подготовке образцов скальных пород. При «сверлении» образец нагружается осевым усилием 150 Н при скорости вращения 400 об/мин. Необходимое количество оборотов устанавливается путем подбора шкивов ременной передачи станка. Определение абразивности породы производят «сверлением» образца породы предварительно взвешенным эталонным стержнем. Сначала «сверлят» в течение 10 минут одним торцом стержня, а затем в течение также 10 минут – другим. Абразивность в миллиграммах определяется как полусумма потери веса эталонного стержня.

В данной работе исследования включают в себя по 5 измерений абразивности на каждом типе пород (известняки и доломиты).

Испытания проходили в следующей последовательности:

1. На аналитических весах была определена масса эталонного стержня  $M_0$ .
2. Эталонный стержень был закреплен в шпинделе сверлильного станка, а образец горной породы - в подставке.
3. Стержень был приведен в соприкосновение с образцом при стандартном осевом усилии (150 Н).
4. Двигатель был приведен в действие с отметкой момента времени его включения. Вращение и истирание стержня о поверхность образца производилось в течение 10 минут.
5. После 10-минутного истирания стержень был перевернут и было произведено его истирание противоположным торцом также в течение 10 минут при стандартном осевом усилии (150 Н).

6. После истирания стержня с противоположного торца он был извлечен из патрона, тщательно очищен от пыли и взвешен. Путем взвешивания была определена масса стержня после истирания  $M_1$ .

7. Коэффициент абразивности пород был вычислен на основании результатов опытов по формуле

$$K_{ab} = 0,5(M_0 - M_1), \text{ мг} \quad (2.2)$$

где  $M_0, M_1$  - масса стержня до и после опыта соответственно, мг.

Полученный коэффициент абразивности сравнивался с классификацией, представленной в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Классификация горных пород по абразивности по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову

Класс абразивности	Класс пород	Коэффициент абразивности, мг	Характерные породы
I	Весьма малоабразивные	до 5	Известняки, мраморы, мягкие сульфиды без кварца (галенит, сфалерит, пирротин), апатит, каменная соль
II	Малоабразивные	5-10	Сульфидные руды, барито-сульфидные руды; аргиллиты, мягкие сланцы: углистые, глинистые, хлоритовые, хлорито-аспидные
III	Ниже средней абразивности	10-18	Джеспилиты, роговики (рудные и нерудные), кварцево-сульфидные руды, магматические тонкозернистые породы, песчаники кварцевые и арковые тонкозернистые, руды железные, известняки окремненные
IV	Среднеабразивные	18-30	Песчаники кварцевые и арковые, мелкозернистые диабазы, крупнозернистый пирит, арсенопирит, жильный кварц, кварцево-сульфидные руды, мелкозернистые магматические породы, окварцованные известняки, джеспероиды

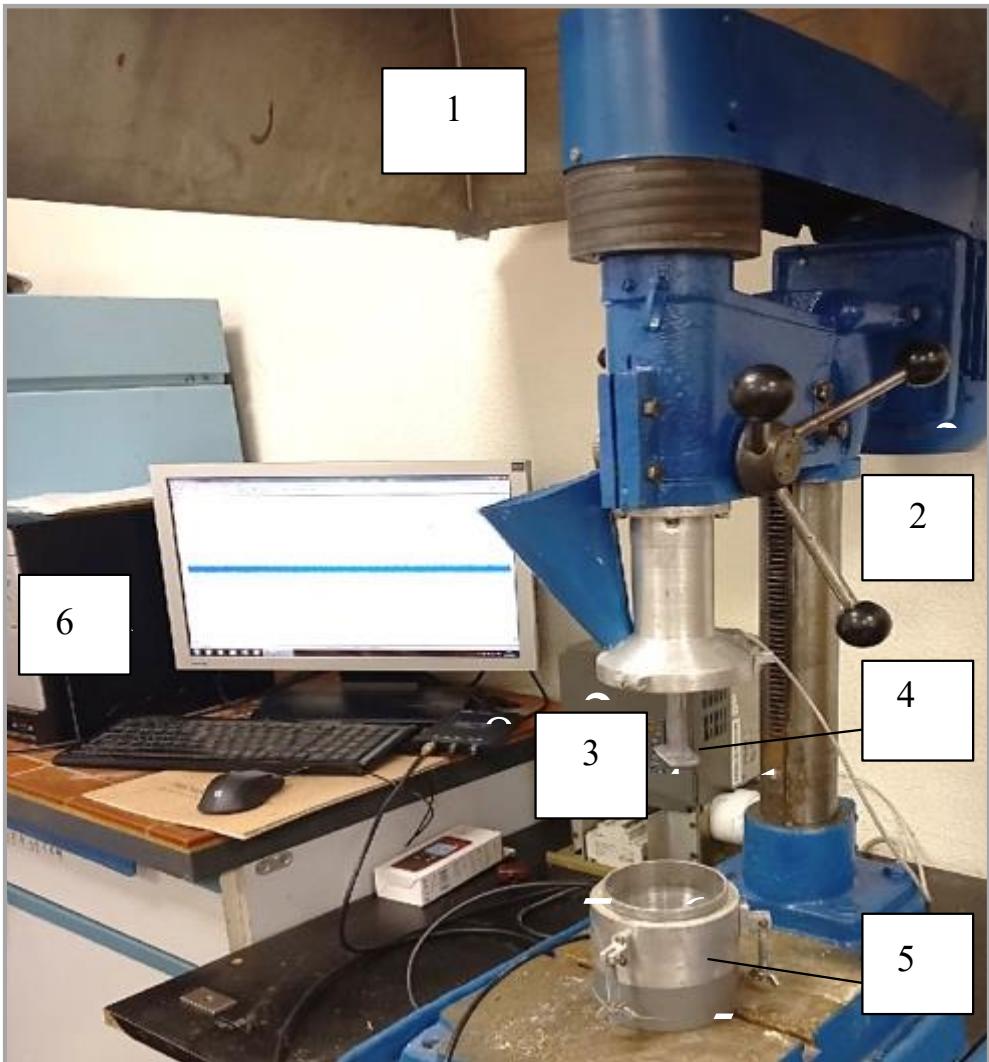
Продолжение таблицы 2.3

Класс абразивности	Класс пород	Коэффициент абразивности, мг	Характерные породы
V	Выше средней абразивности	30-45	Песчаники кварцевые и аркозовые, средне- и крупнозернистые, плагиограниты, нефелиновые сиениты, мелкозернистые граниты, мелкозернистые диориты, порфирита, грейзены, габбро, гнейсы, скарны (рудные и нерудные)
VI	Повышенной абразивности	45-65	Средне- и крупнозернистые граниты, диориты, гранодиориты, порфириты, нефелиновые сиениты, сиениты, кератофиры, пироксениты, монцониты, амфиболиты, сланцы кварцевые и окварцованные, гнейсы
VII	Высокоабразивные	65-90	Порфириты, дориты, граниты, гранитоидные нефелиновые сиениты
VIII	Высшей степени абразивные	свыше 90	Корундосодержащие

## 2.5 Методика исследования абразивности по методу вращающейся крыльчатки (LCPC)

Вторая часть испытаний проводилась по методу вращающейся крыльчатки (подробнее про Тест *LCPC* в подразделе 1.3).

Разработанная в данной работе лабораторная установка схожа с упомянутой выше на рисунке 2.7, но имеет некоторые изменения. Общий вид разработанной установки представлен на рисунке 2.8.



1 – сверлильный станок; 2 – электромотор; 3 – блок управления частотой вращения; 4 – крыльчатка; 5 – сосуд для пробы; 6 – компьютер.

Рисунок 2.8 – Общий вид установки для проведения исследований по методу LCPC

Базой установки является вертикальный сверлильный станок (1) с двигателем (2), который выдает 4500 оборотов в минуту. Вместо сверла к станку крепится стержень, в который вкручивается крыльчатка (3) (рисунок 2.9 (б)) с помощью болта. Крыльчатка представляет собой прямоугольную пластину из стали с твердостью HRB в диапазоне 60-75 (например, Ст3) с размерами 50x25 мм ( $\pm 0,5$  мм) x 5 ( $\pm 0,2$  мм). Крыльчатка опускается в сосуд (4) (рисунок 2.9 (в)), который крепится к станку с помощью соединительных винтов. Двигатель приводится в работу с помощью блока управления частотой вращения (5) (рисунок 2.9 (г)). После включения в установленный

сосуд с крыльчаткой засыпается образец грунта через специальную воронку (6). Вес грунта в сосуде составляет  $500 \text{ г} \pm 2 \text{ г}$ .



а



б



в



г

а – сверлильный станок и двигатель; б – крыльчатка; в – сосуд для пробы с датчиком АЭ; г – частотный преобразователь

Рисунок 2.9 – Отдельные части лабораторной установки

Коэффициент абразивности *LCPC* (*LCPC-Abrasivity-Coefficient* или сокращенно *LAC*) рассчитывается как потеря веса крыльчатки за время дробления 5 мин, деленная на вес образца (500 г) по формуле (1.2).

## **2.6 Методика ситового анализа при исследовании проб дисперсных грунтов**

В данном разделе будет описан метод определения гранулометрического состава грунта ситовым методом на образцах песка, который проводился, опираясь на положения ГОСТ 12536–2014 [71]. Для количественной оценки был использован эмпирический показатель – модуль крупности песка с учетом положений ГОСТ 8736–2014 [72].

Для проведения ситового анализа был использован комплект сит с отверстиями диаметром 10; 5; 3; 2; 1 и сетками N 0,5; 0,25; 0,1; 0,071; 0,045.

Каждая проба подвергалась ситовому анализу 4 раза: до начала испытаний, после первой минуты дробления пробы в лабораторной установке, после третьей минуты и после пятой минуты. Сита монтируют в колонку, размещая их от поддона в порядке увеличения размера отверстий. На верхнее сито надевают крышку. Отобранную пробу переносят на верхнее сито первого набора (диаметром отверстий от 10 до 0,045 мм), закрывают крышкой и просеивают с помощью легких боковых ударов ладонями рук до полной сортировки грунта. Полноту просеивания фракций грунта проверяют встряхиванием каждого сита над листом бумаги. Если при этом на лист выпадают частицы, то их высыпают на следующее сито; просев продолжают до тех пор, пока частицы не перестанут выпадать на бумагу.

Фракции грунта, задержавшиеся после просеивания на каждом сите и прошедшие в поддон, необходимо взвесить и суммировать массы всех фракций грунта. Если полученная сумма масс всех фракций грунта превышает более чем на 1 % массу взятой для анализа пробы, то анализ

следует повторить. Потерю грунта при просеивании разносят по всем фракциям пропорционально их массе.

По результатам проведения ситового анализа были построены интегральные кривые гранулометрического состава.

На основе полученных данных для каждого этапа был рассчитан модуль крупности песка  $M_k$ .

Для определения модуля крупности песка  $M_k$  необходимо пробу, прошедшую через сито с отверстиями диаметром 5 мм, просеять через набор сит с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и с сетками N 1,25; 0,63; 0,315 и 0,16.

Просеивание производят механическим или ручным способами. Продолжительность просеивания должна быть такой, чтобы при контролльном интенсивном ручном встряхивании каждого сита в течение 1 мин через него проходило не более 0,1% общей массы просеиваемой навески. При механическом просеивании его продолжительность для применяемого прибора устанавливают опытным путем.

При ручном просеивании допускается определять окончание просеивания, интенсивно встряхивая каждое сито над листом бумаги. Просеивание считают законченным, если при этом практически не наблюдается падения зерен песка.

На основании полученных данных построены зависимости частных и полных остатков на ситах разного размера и произведен расчет модуля крупности по результатам ситового анализа от времени обработки.

По результатам просеивания вычисляют:

– частный остаток на каждом сите ( $\alpha_i$ ) в процентах по формуле

$$\alpha_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (2.3)$$

где  $m_i$  – масса остатка на данном сите, г;

$m$  – масса просеиваемой навески, г;

– полный остаток на каждом сите ( $A_i$ ) в процентах по формуле

$$\alpha_i = \alpha_{2,5} + \alpha_{1,25} + \dots + \alpha_i, \quad (2.4)$$

где  $\alpha_{2,5}$ ,  $\alpha_{1,25}$ ,  $\alpha_i$  – частные остатки на соответствующих ситах;

– модуль крупности песка ( $M_k$ ) без зерен размером крупнее 5 мм по формуле

$$M_k = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}, \quad (2.5)$$

где  $A_{2,5}$ ,  $A_{1,25}$ ,  $A_{0,63}$ ,  $A_{0,315}$ ,  $A_{0,16}$  – полные остатки на сите с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и на ситах с сетками N 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм.

Модуль крупности определяется один раз до обработки пробы, и три раза после обработки пробы на первой, второй – третьей, четвертой – пятой минутах соответственно.

По результатам обработки строят графики зависимостей полных остатков на ситах от размера отверстий сит для разного времени обработки проб.

## 2.7 Методика подбора плотностей распределений вероятностей размера частиц

Модуль крупности песка – это условная безразмерная величина, позволяющая оценить преобладающую крупность его зёрен. Недостаток показателя состоит в том, что одно и тоже значение модуля крупности может быть рассчитано для материалов с разными фракционными составами. Но в целом меньшее значение показателя указывает на более мелкий зернистый материал.

Помимо таких характеристик частиц пробы, как модуль крупности, может быть рассчитана функция плотности распределения вероятностей размеров частиц, дающая более детальную характеристику результатов дробимости пробы.

В данном разделе использована терминология по ГОСТ Р ИСО 3534-2019 [73] и ГОСТ Р 50779.10-2000 [74].

Для проведения исследования были использованы результаты ситового анализа песка одного из карьеров Московской области до, а также после 1, 3, и 5 минут его дробления на установке с вращающейся крыльчаткой. Форма представления данных приведена в таблице 2.4 (на основании данных, полученных при ситовом анализе первой пробы). Данные в столбцах 4, 6, 8, 10 графически представляют собой полигоны относительных частот попадания размеров частиц в диапазон между заданным  $i$ -тым и  $i+1$ -м ситами в столбце с номером 3. Для поддона при  $i = 11$  размер отверстий в колонке 3 формально принят равным нулю. В колонках с номерами 5, 7, 9, 11 приведены данные ситового анализа по проходу через сита в процентах по отношению к общему весу пробы.

Данная форма представляет собой таблицу сопряженностей трех признаков – размера отверстий сит  $d$  с относительной частотой  $P(d)$  и кумулятивной относительной частотой  $F_{\pi}(d)$  попадания размеров частиц при их проходе через сита в интервалы, определяемые размерами отверстий. Уменьшению размера отверстий соответствует уменьшение кумулятивной частоты  $F_{\pi}(d)$ .

Данная форма имеет вид функции распределения вероятностей, что совместно с данными колонки 3 дает возможность расчета плотностей распределения вероятностей размеров частиц.

В таблице 2.4 приняты обозначения:

$\mathbb{N}$  – номер пробы;

$d_i$ , мм – размер сита;

$P(d_i)$ , % – вероятность попадания размера частицы  $d$  в  $i$ -тый интервал выше сита  $d_i$ ;

$F_{\pi}(d_i)$ , % – функция распределения, т.е. вероятность попадания размера частицы  $d$  в диапазон от 0 до размера сита  $d_i$ ,  $P(d \leq d_i)$ .

Таблица 2.4 – Данные ситового анализа при обработке первой пробы песка на установке с вращающейся крыльчаткой

№	i	$d_i$ , мм	До обработки		После 1 мин.		После 3 мин.		После 5 мин.	
			$P(d_i)$ , %	$F_{\text{п}}(d_i)$ , %						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	2	5	1,37	98,63	0,94	99,06	0,37	99,63	0,36	99,64
	3	3	4,58	94,05	2,25	96,81	0,57	99,06	0,21	99,43
	4	2	5,10	88,95	3,53	93,28	2,58	96,48	2,06	97,37
	5	1	10,80	78,14	8,54	84,73	7,01	89,47	6,39	90,99
	6	0,5	32,42	45,72	29,66	55,07	27,55	61,92	28,05	62,94
	7	0,25	33,00	12,72	34,54	20,53	42,03	19,89	48,13	14,80
	8	0,1	10,45	2,26	14,20	6,33	17,77	2,12	13,32	1,48
	9	0,071	1,93	0,33	5,87	0,47	1,75	0,37	0,73	0,75
	10	0,045	0,32	0,01	0,28	0,19	0,02	0,34	0,01	0,74
	11	0	0,01	0,00	0,19	0,00	0,34	0,00	0,74	0,00

Данные в столбцах 5, 7, 9, 11 представляют собой выборочные функции распределения массы частиц с размерами, определяемыми диаметром отверстий сит. Графически данные, размещенные в этих столбцах, представляют собой полигоны кумулятивных частот.

Обработка экспериментальных результатов включала в себя:

- анализ данных таблицы сопряженностей признаков и построение полигонов распределений относительных частот размеров частиц, попадающих в соответствующие интервалы до, а также после 1, 3, и 5 минут обработки;
- построение гистограмм выборочных распределений плотности вероятности размеров частиц с учетом ширины соответствующих интервалов, при этом произведение ширины интервалов на их высоту давало относительные частоты размеров частиц, попадающих в данный интервал.

Подбор вида распределения вероятностей осуществлялся для пяти аналитических функций:

– нормального распределения

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.6)$$

где  $x$  – случайная величина (в данном случае диаметр частиц  $d$ ),  $\mu$ ,  $\sigma$  – среднее и среднеквадратическое отклонение случайной величины соответственно;

– логнормального распределения

$$f_2(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.7)$$

где параметры обозначены аналогично нормальному распределению;

– распределение Рэлея:

$$f_3(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.8)$$

где  $\sigma$  – параметр распределения;

– гамма-распределение:

$$f_4(x) = \frac{x^{m-1} \exp(-x/\alpha)}{\alpha^m \Gamma(m)}, \quad (2.9)$$

где  $\Gamma(m)$  – гамма-функция

$$\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt,$$

где  $m$ ,  $\alpha$  – параметры распределения;

– распределение Вейбулла:

$$f_5(x) = \beta \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\frac{(t/\eta)^\beta}{\eta}}, \quad (2.10)$$

где  $\beta$  – параметр формы распределения Вейбулла;

$\eta$  – параметр масштаба распределения Вейбулла.

Для обработки данных была написана программа в среде MathCAD. Подбор значений коэффициентов уравнений (2.6)–(2.10) методом наименьших квадратов.

Для оценки качества аппроксимации были рассчитаны разности между экспериментальными и теоретическими распределениями  $Z_i$ , т.н. остатки, а по ним – максимальные значения  $Z_{max}$  и среднеквадратические отклонения  $\sigma_Z$  остатков.

Выбор наиболее подходящего вида распределения проводится по результатам анализа вышеупомянутых характеристик.

## **2.8 Методика проведения испытаний для уточнения классификации грунтов по их абразивности**

Эксперименты проводились в лаборатории на пробах песка массой 500 г одного из карьеров Московской области, выдержанных при комнатной температуре и влажности. Модуль крупности песка  $M_K$  имел диапазон от 2,5 до 2,7 мм и в соответствии с ГОСТ 8736–2014 по своему размеру относился к крупному.

Лабораторный комплекс [75] состоял из испытательной лабораторной установки для проведения работ по изучению абразивности грунта (схема на рисунке 2.8) и набора лабораторных сит для проведения ситового анализа в соответствии с ГОСТ 8736–2014. Внешний вид установки показан на рисунке 2.8.

Испытания предусматривали три цикла длительностями 1, 2, 2 минуты. До начала испытаний и после каждого цикла (всего 4 измерения) производилась остановка установки, взвешивание крыльчатки и производился ситовый анализ проб.

На рисунке 2.10 показаны подготовленные для испытания пробы дисперсных грунтов (песка) для испытания на абразивность в зависимости от относительного количества кварца ( $\text{SiO}_2$ ) и размеров его зерен.



Рисунок 2.10 – Пробы дисперсных грунтов (песка) для испытаний на абразивность в зависимости от относительного содержания зерен кварца и их крупности, разделенные по фракциям

## **Выводы**

1 Анализ типов грунтов при проходке тоннелей с помощью ТПМК в Москве, показал, что более 83 % пройдено по дисперсным грунтам, и менее 17 % – по скальным, что предъявляет соответствующие требования к выбору методов определения абразивности, среди которых как основной при соответствующей адаптации может быть рекомендован метод *LCPC*, предусматривающий дробление пробы с помощью вращающейся крыльчатки и применимый как для скальных, так и для дисперсных грунтов.

2 Для проведения исследования была составлена коллекция скальных грунтов с различной прочностью и дисперсных грунтов с разными размерами частиц и различным содержанием кварца.

3 Для лабораторных испытаний было обосновано применение двух методик: методики исследования абразивности по методу Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (вращающегося полого стержня) и методика исследования абразивности по методу вращающейся крыльчатки (*LCPC*), что позволяет оценивать абразивность как скальных, так и дисперсных грунтов.

4 Обосновано применение стандартной методики ситового анализа при исследовании проб дисперсных грунтов для последующего анализа распределений размеров частиц, а также методики подбора плотностей распределений вероятностей размера частиц, дающей более детальную характеристику результатов дробимости пробы.

5 Обоснована методика проведения испытаний для уточнения классификации грунтов по их абразивности по методу вращающейся крыльчатки.

6 Приведенные методы позволили составить базовую основу для последующих исследований абразивности скальных и дисперсных грунтов.

### **3 Исследование взаимосвязей прочностных свойств, размеров кусков и зерен скальных грунтов, а также размеров зерен и содержания кварца в дисперсных грунтах с абразивностью**

#### **3.1 Испытания по определению предела прочности при сжатии и растяжении скальных грунтов**

Для определения предела прочности при сжатии и растяжении использовались ранее описанные в подразделе 2.2 образцы.

На рисунках 3.1...3.4 представлены образцы после испытаний на предел прочности при сжатии и растяжении. После испытаний при растяжении по бразильской схеме образцы имели вид цилиндров, расколотых по центру на две половины.

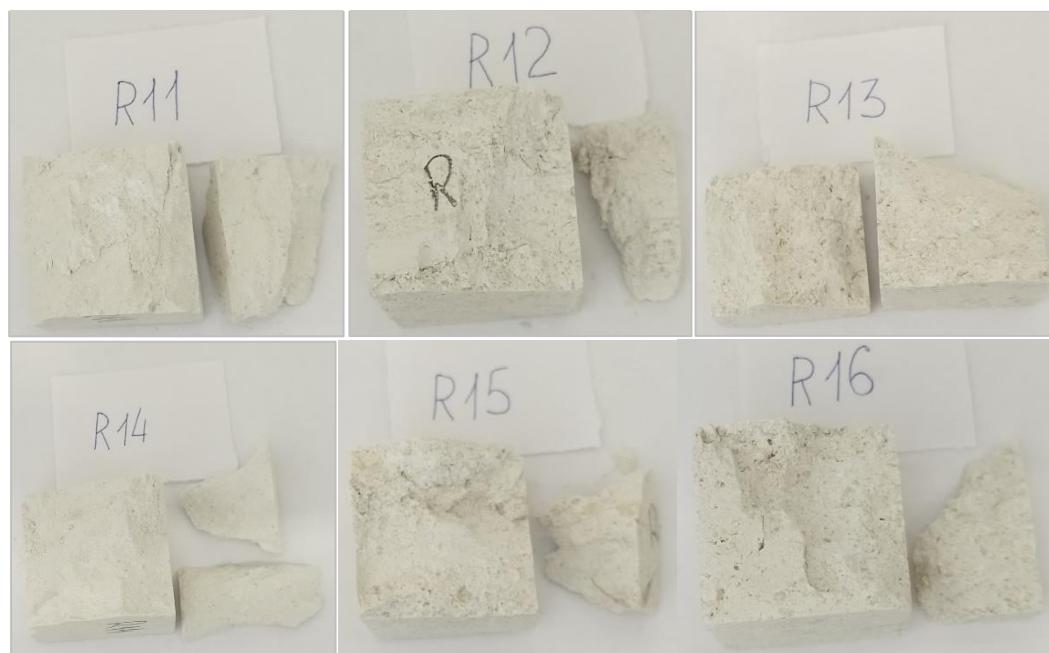


Рисунок 3.1 – Фото образцов известняка R01...R06 после испытаний на предел прочности при сжатии



Рисунок 3.2 – Фото образцов известняка R01...R06 после испытаний на предел прочности при растяжении



Рисунок 3.3 – Фото образцов доломита S01...S05 после испытаний на предел прочности при сжатии



Рисунок 3.4 – Фото образцов доломита S01...S06 после испытаний на предел прочности при растяжении

Образцы испытывались на универсальной испытательной машине Instron 150LX по п. 6.5 ГОСТ 30629-2011 при определении предела прочности при сжатии и по п. 2 ГОСТ 21153.3-1985 при растяжении. В таблицах 1 и 2 Приложения Б представлены результаты полученных пределов прочности при сжатии, а в таблицах 3 и 4 Приложения Б при растяжении.

### 3.2 Абразивность скальных грунтов по методу Барона – Кузнецова

В таблицах 1 и 2 Приложения В представлены результаты испытаний абразивности известняка и доломита соответственно.

Следует отметить, что оба скальных грунта обладают невысокой абразивностью. Поэтому разница в весе испытательного стержня до и после «сверления» отличается незначительно, в одном образце даже менее 1 мг, что ниже цены деления весов. В таблицах приведена также оценка верхнего

допуска  $M_b$ , который вычислялся как  $M_b = M_0 + 3s$ , где  $M_0$  – среднее значение потери веса;  $s$  – среднеквадратическое отклонение веса  $M_b$  характеризует возможный переход в более высокий класс абразивности по классификации Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (см. таблицу 2.3 подраздела 2.3).

Как следует из представленных результатов, даже при оценке по верхнему допуску исследованные скальные грунты не выходят за пределы I класса абразивности, т. е. обладают наименьшей абразивностью. Следующий II класс абразивности начинается с 6 мг.

### 3.3 Абразивность скальных грунтов по методу LCPC

Для проведения испытаний были изготовлены пробы из штуков, а также из массы, полученной после испытания образцов на прочность на щековой лабораторной дробилке ДЩЛ 180×250. Для испытания по методу *LCPC* были подготовлены пробы крупности  $-6,3+4,0$  мм, а также соседних диапазонов. Внешний вид подготовленных проб известняка со станции Рижская и проб доломита различной крупности со станции Суворовская показан на рисунках 3.5 (а) и (б).



(а)



(б)

Рисунок 3.5 – Фото проб известняка со станции Рижская (а) и проб доломита различной крупности со станции Суворовская (б)

Результаты испытаний проб доломита и известняка на абразивность, а также их ситовый анализ представлены в таблицах 1 и 2 Приложения Г соответственно.

Анализ результатов проведенных испытаний скальных грунтов на абразивность показал нелинейный (затухающий) характер потери веса крыльчатки, т. е. показателя абразивности  $LAC$ , в зависимости от длительности воздействия скальных кусков на поверхность крыльчатки, как для образцов доломита (рисунок 3.6), так и для образцов известняка различных фракций (рисунок 3.7).

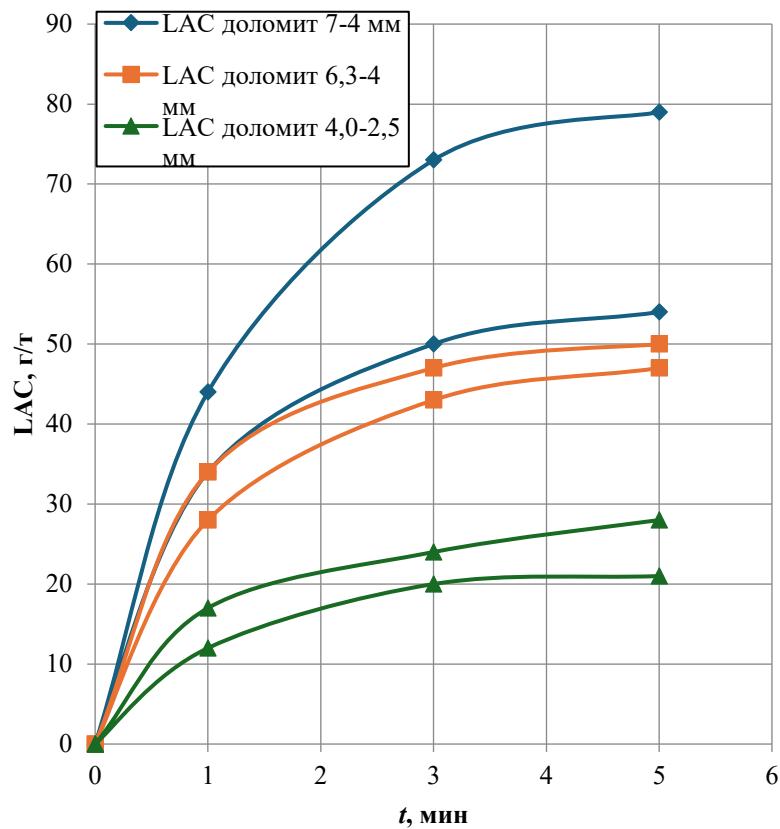


Рисунок 3.6 – Зависимость  $LAC$  от времени опыта на парных образцах фракции доломита крупностью 7-4 мм, 6,3-4 мм, 4-2,5 мм

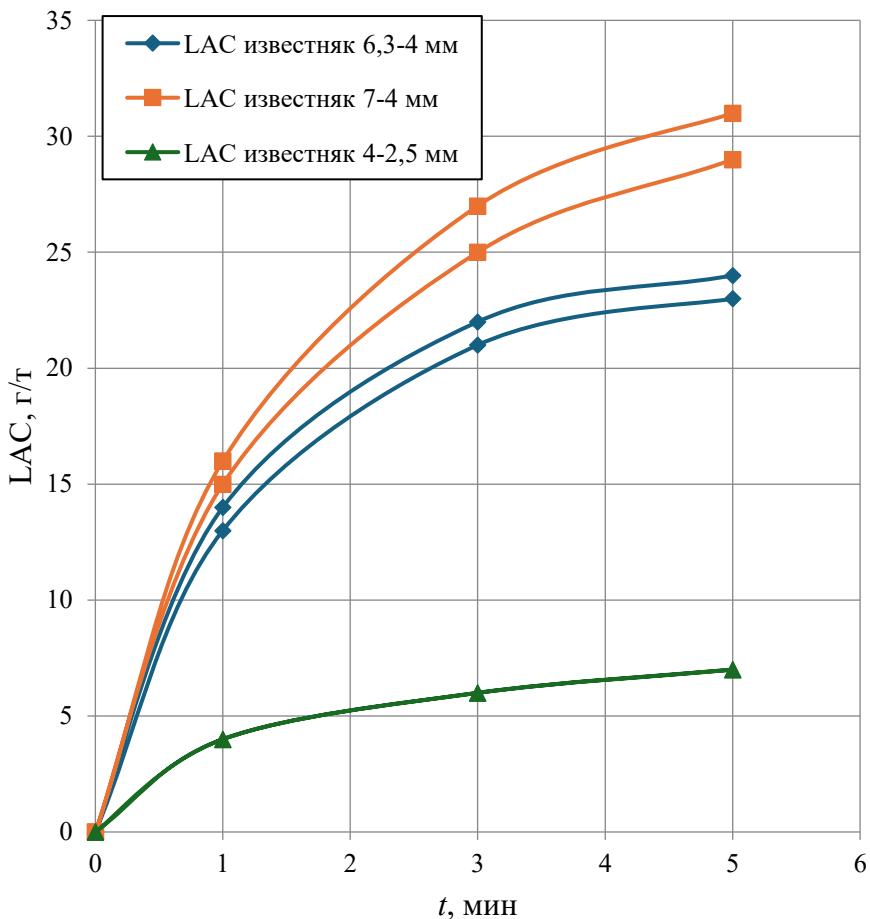


Рисунок 3.7– Зависимость  $LAC$  от времени опыта на парных образцах фракции известняка крупностью 7-4 мм, 6,3-4 мм, 4-2,5 мм

Коэффициент  $LAC$  для доломита выше, чем для известняка, приблизительно:

- в 3,5 раза применительно к исходной (мелкой) фракции 4...2,5 мм;
- в 2,1 раза применительно к исходной (средней) фракции 6,3...4 мм;
- в 2,2 раза применительно к исходной (крупной) фракции 7...4 мм.

Различие в показателях  $LAC$  парных проб выше для крупной исходной фракции, особенно для доломита с кристаллическими прожилками, которые показали аномально высокую прочность в отдельных образцах. Поэтому в целях повышения точности для определения показателя абразивности необходимо максимально строго подходить к подготовке исходной пробы дроблением с выделением фракции – 6,3+4,0 мм для метода  $LCPC$ .

Почти полная сходимость результатов  $LAC$ , которые являются наиболее низкими для данного цикла испытаний, наблюдается для мелкой фракции известняка.

Таким образом, самым низко абразивным с усредненным показателем  $LAC = 23,5 \pm 0,5$  г/т по методу  $LCPC$  был определен известняк с сопутствующими средними физико-механическими характеристиками:

- предел прочности на сжатие  $UCS = 16,25$  МПа,
- предел прочности на растяжение  $TS = 2,7$  МПа.

Усредненный коэффициент  $LAC = 48,5 \pm 1,5$  г/т был определен для доломита с соответствующими средними физико-механическими характеристиками:

- предел прочности на сжатие  $UCS = 74,14$  МПа,
- предел прочности на растяжение  $TS = 8,38$  МПа.

Полученная зависимость  $LAC$  от предела прочности при сжатии  $\sigma_{UCS}$  ( $UCS$ , uniaxial compressive strength) для известняка и доломита представлена на рис. 3.8.

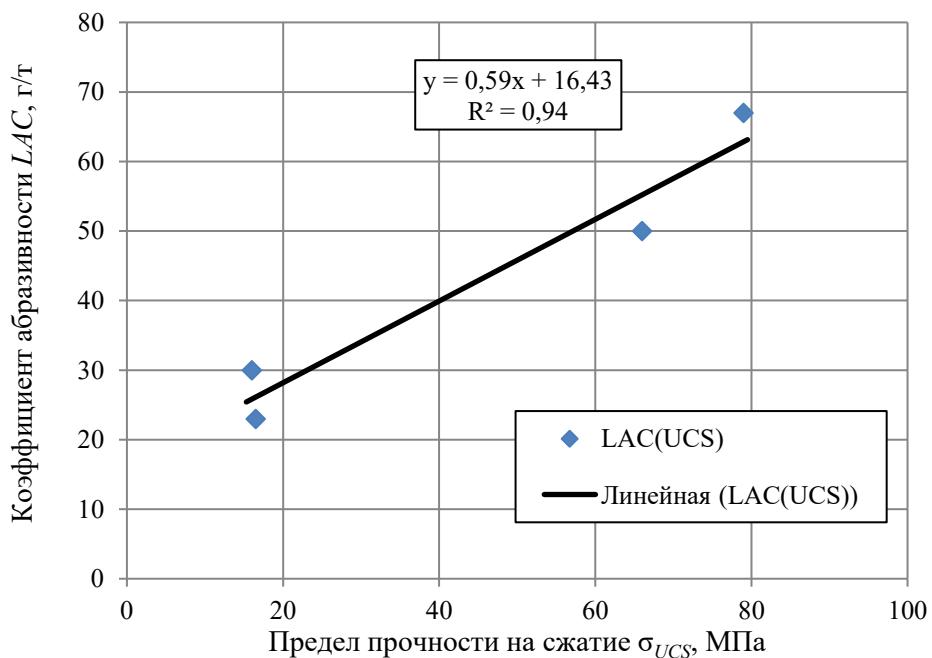


Рис. 3.8 – Зависимость коэффициента  $LAC$  от предела прочности при сжатии  $\sigma_{UCS}$  для известняка и доломита

Полученная зависимость  $LAC$  от предела прочности на растяжение  $TS$  для известняка и доломита представлена на рисунке 3.9.

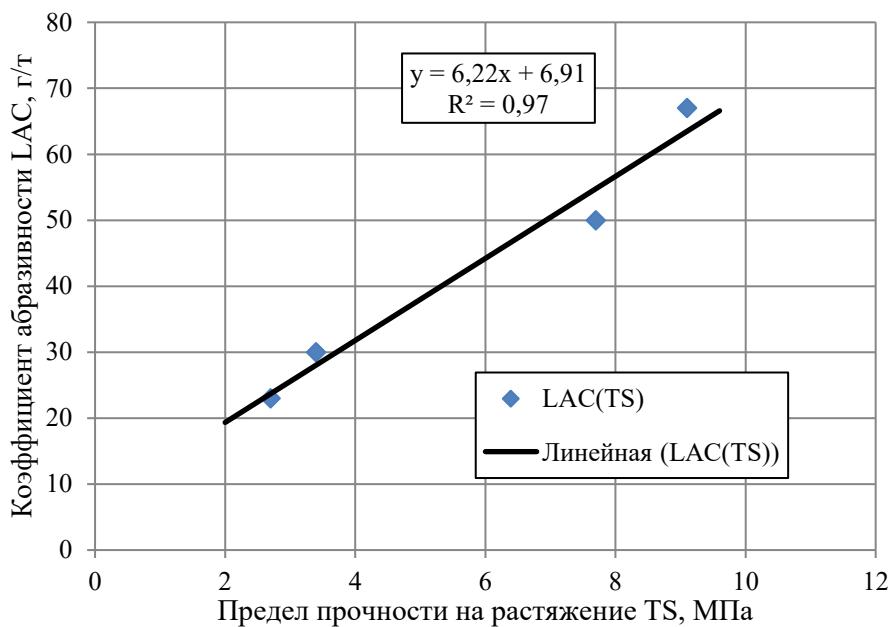
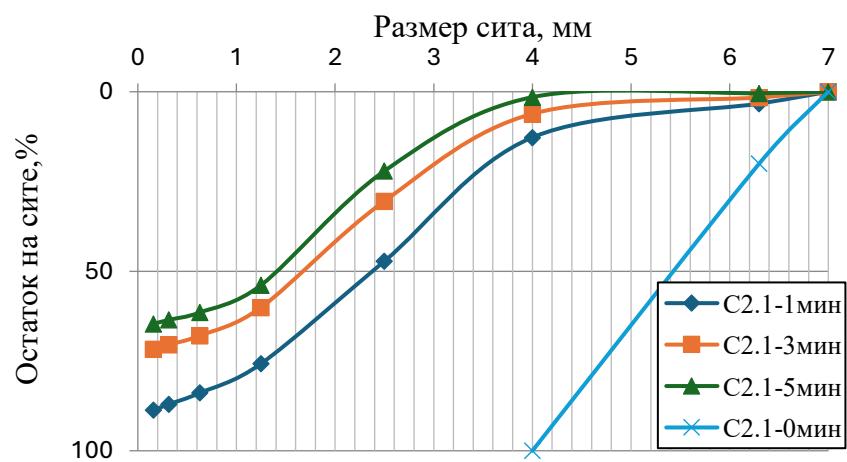


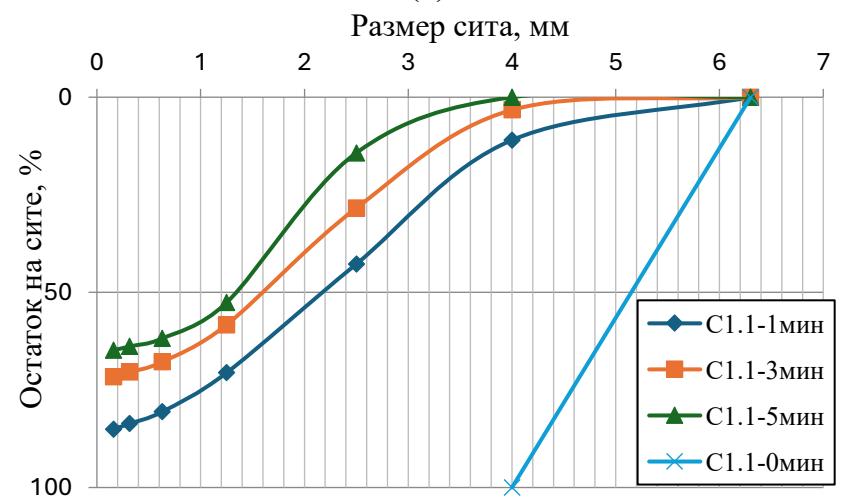
Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента  $LAC$  от предела прочности при растяжении  $\sigma_{UTS}$  для известняка и доломита

Данные зависимости  $LAC$  прямо пропорциональны прочностным показателям известняка и доломита, причем наблюдается более сильная взаимосвязь  $LAC$  с пределом прочности на растяжение  $TS$  ( $R^2 = 0,97$ ), полученная по 8-ми измерениям. Это дает возможность прогноза абразивности данных типов пород по их прочностным показателям.

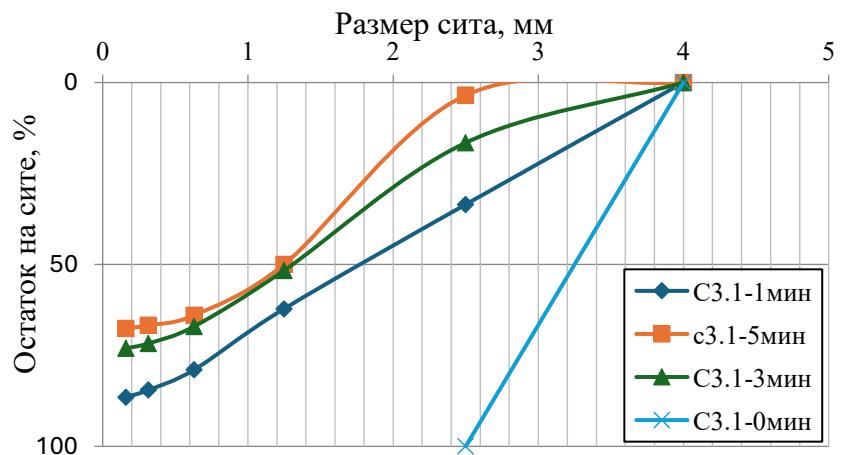
Далее приведены результаты исследования гранулометрического состава исходных, промежуточных и конечных испытываемых проб с построением процентных графиков их полных весовых остатков на стандартных ситах для 0, 1, 3 и 5 минут испытания фракций 7...4 мм, 6,3...4 мм и 4...2,5 мм исходных проб доломита (рисунок 3.10) и известняка (рисунок 3.11).



(а)

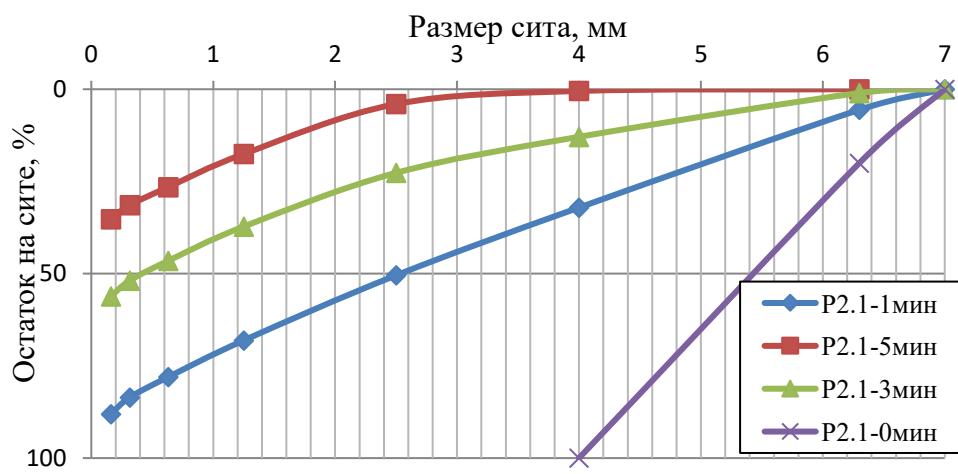


(б)

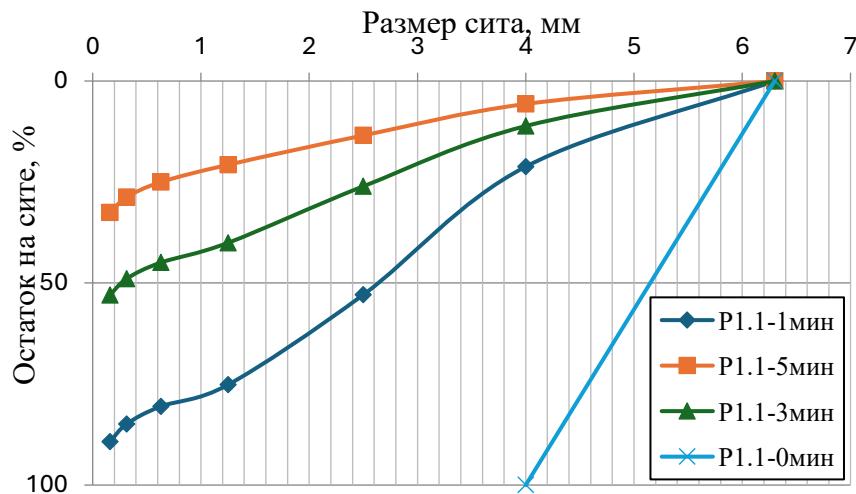


(в)

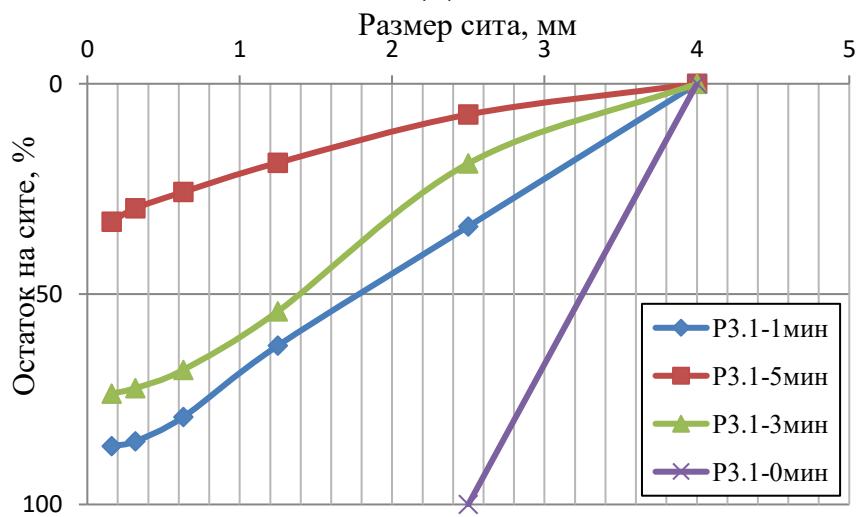
Рисунок 3.10 – Гранулометрический состав по полным остаткам проб доломита через 0, 1, 3, 5 минут опыта для исходной фракции 7...4 мм (а); 6,3...4 мм (б); 4...2,5 мм (в)



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.11 – Гранулометрический состав по полным остаткам проб известняка через 0, 1, 3, 5 минут опыта для исходной фракции 7...4 мм (а); 6,3...4 мм (б); 4...2,5 мм (в)

Все исходные пробы за время опыта значительно измельчаются, особенно известняк. В конце опыта через самое тонкое сито размером 0,16 мм проходит 64...68% известняка, а для доломита этот показатель составляет 29...35%.

По пересечению графиков с горизонтальной осью сетки со значением полного остатка 50% определяют значение среднего размера  $D50$  куска в пробе. Также по известному, описанному ранее способу суммирования долей полных остатков на ситах размером 2,5 мм, 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм и 0,16 мм определяется модуль крупности  $MK$ .

Эти два показателя характеризуют крупность испытываемых кусков, которая сильно влияет на ее абразивность. На рисунке 3.12 представлена зависимость  $LAC$  от среднего размера  $D50$  куска известняка и доломита в исходной пробе.

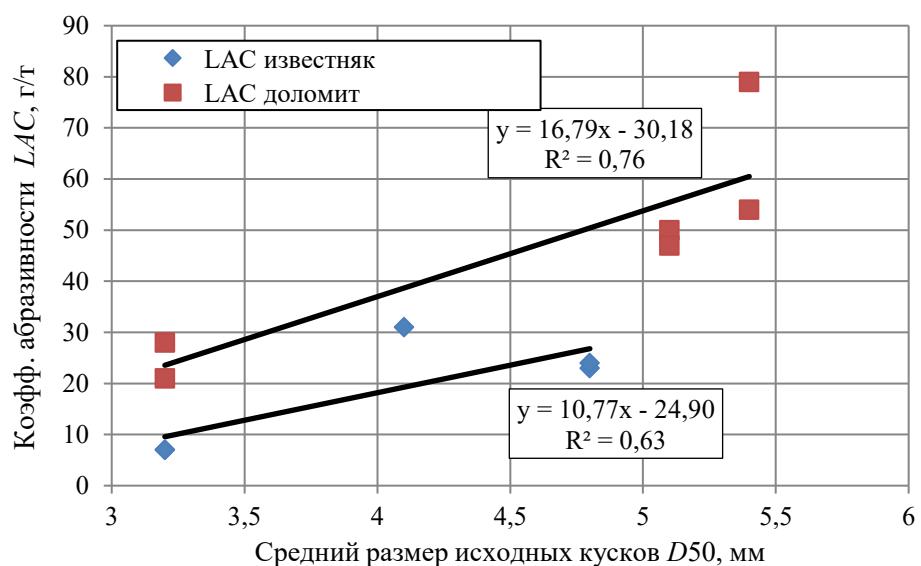


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента  $LAC$  от среднего размера  $D$  исходных кусков известняка и доломита

График применительно к доломиту показывает, что при увеличении среднего размера исходного куска с 3,2 мм до 5,1 мм коэффициент абразивности  $LAC$  повышается в 2,5 раза.

График применительно к известняку показывает, что при увеличении среднего размера исходного куска с 3,2 мм до 4,8 мм коэффициент абразивности  $LAC$  повышается в 2,6 раза.

Полученные взаимосвязи  $LAC$  с модулем крупности  $MK$  (рисунок 3.13) можно охарактеризовать как менее значимыми ( $R^2 = 0,41$  и  $R^2 = 0,22$  для известняка и доломита соответственно).

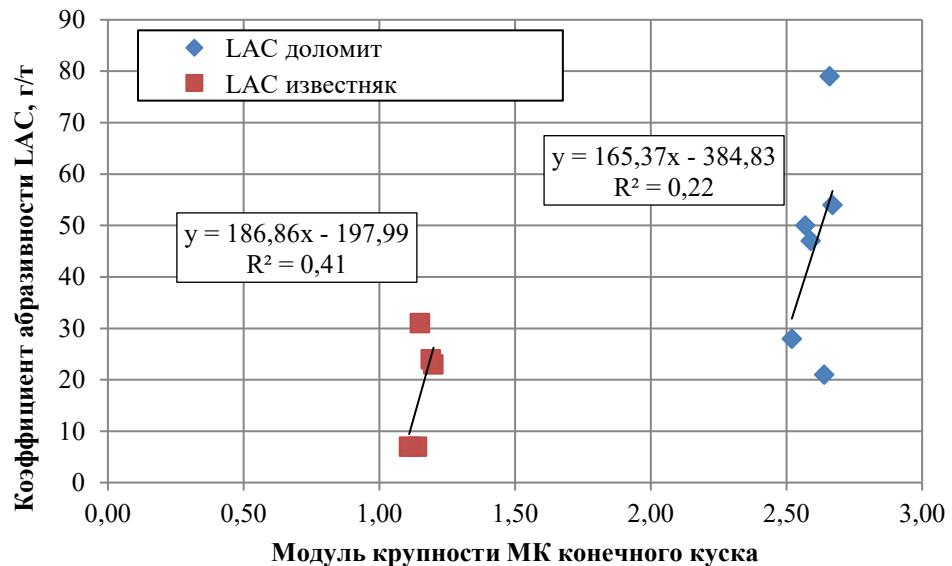


Рисунок 3.13 – Зависимость  $LAC$  от модуля крупности  $MK$  конечных кусков известняка и доломита

В заключение анализа результатов испытаний скальных грунтов, по данным таблиц Приложений В и Г построена зависимость показателя абразивности  $LAC$  по методу  $LCPC$  от коэффициента абразивности  $K_{ab}$  по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову (рисунок 3.14).

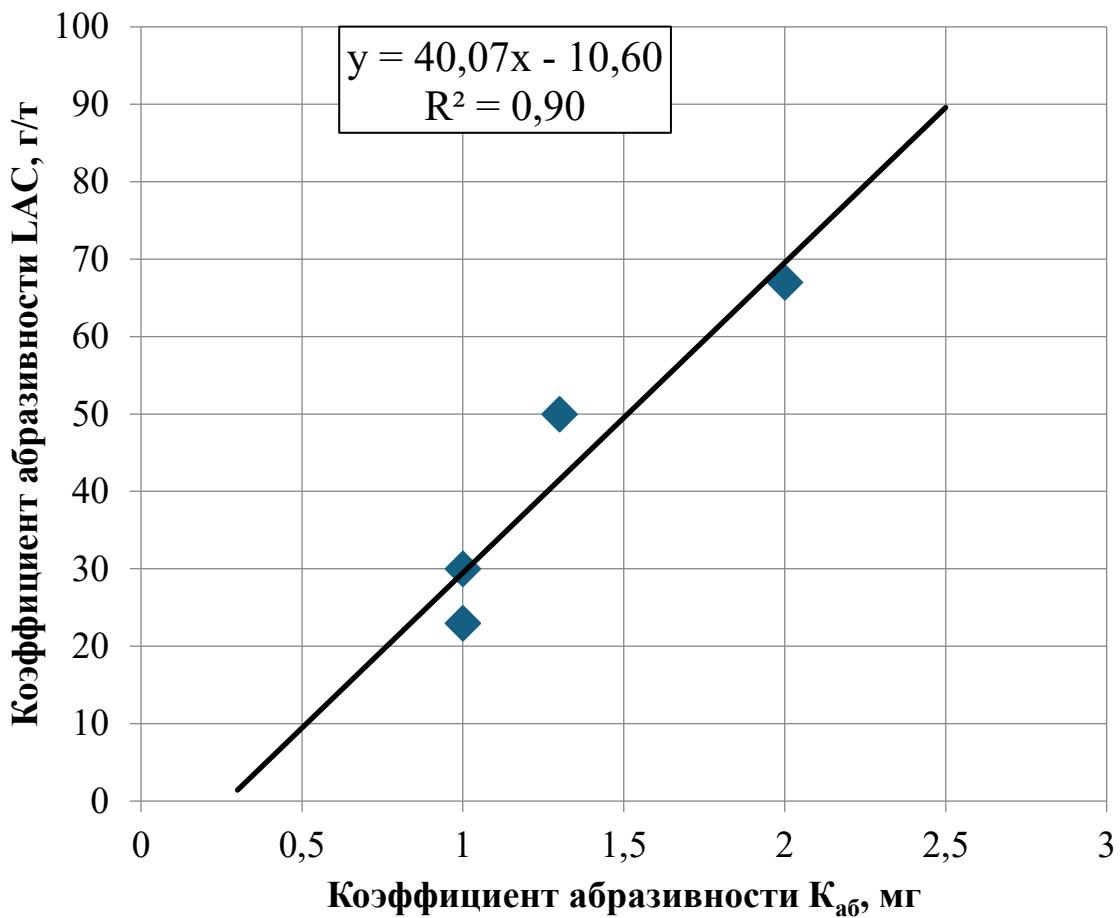


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента  $LAC$  от  $K_{ab}$

С достаточной точностью ( $R^2 = 0,9$  для зависимости, построенной по четырём парным опытам) можно в пределах  $LAC = 2\dots70$  г/т представить следующее выражение для функции:

$$LAC = 40,1 \times K_{ab} - 10,6 \text{ [г/т]} \quad (3.1)$$

### 3.4 Результаты испытания на абразивность дисперсных грунтов (песка) по методу вращающейся крыльчатки

В таблицах 1.Д, 2.Д, 3.Д Приложения Д представлены результаты испытаний на абразивность проб карьерного и кварцевого песка (с условными обозначениями):

- Песок средней крупности (ПСК);
- Песок мелкий (ПМ);

- Песок кварцевый крупный (ПКК);
- Песок кварцевый мелкий (ПКМ);
- Песок кварцевый средней крупности (ПКСК).

Пески испытывались как отдельно, так и в различных сочетаниях, всего 8 проб.

В таблице 2.Д Приложения Д представлены результаты ситового анализа проб песка после испытаний на абразивность.

В таблице 3.Д Приложения Д представлены результаты дополнительных испытаний на абразивность проб узких фракций карьерного песка (с условными обозначениями):

- 250 г фракции -0,5+0,25 мм и 250 г фракции -1,0+0,5 мм ( $\Phi 0,5$ );
- 250 г фракции -1,0+0,5 мм и 250 г фракции -2,0+1,0 мм ( $\Phi 1,0$ );
- 250 г фракции -2,0+1,0 мм и 250 г фракции -5,0+2,0 мм ( $\Phi 2,0$ );
- 250 г фракции -5,0+2,0 мм и 250 г фракции -10,0+5,0 мм ( $\Phi 5,0$ ).

В таблице 4.Д Приложения Д представлены результаты ситового анализа проб узких фракций карьерного песка после испытаний на абразивность.

Анализ результатов проведенных испытаний дисперсных грунтов (карьерных песков разной фракции) на абразивность показал в основном затухающий экспоненциальный характер роста показателя абразивности  $LAC$ , описываемый функцией вида  $y = a[1 - \exp(-t/\tau)]$  в зависимости от длительности  $t$  воздействия зерен грунта на поверхность крыльчатки. При большом  $\tau$  она приближается к линейной. Такое поведение износа крыльчатки характерно для образцов карьерного песка ПСК (достигаемый  $LAC = 282$  г/т) и кварцевого песка ПКК (достигаемый  $LAC = 682$  г/т) (рисунки 3.15 и 3.16).

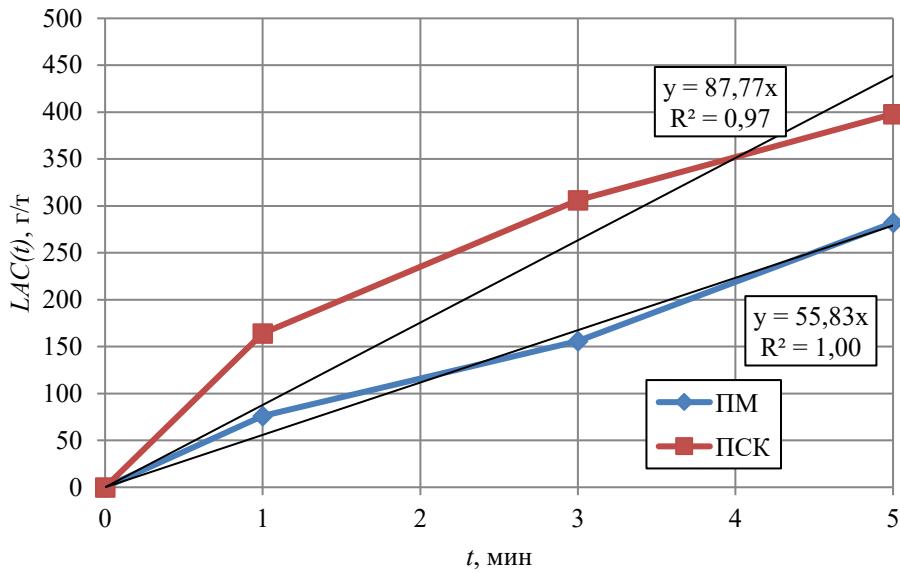


Рисунок 3.15 – Зависимость  $LAC(t)$  от времени опыта на пробах карьерного песка ПСК и ПМ

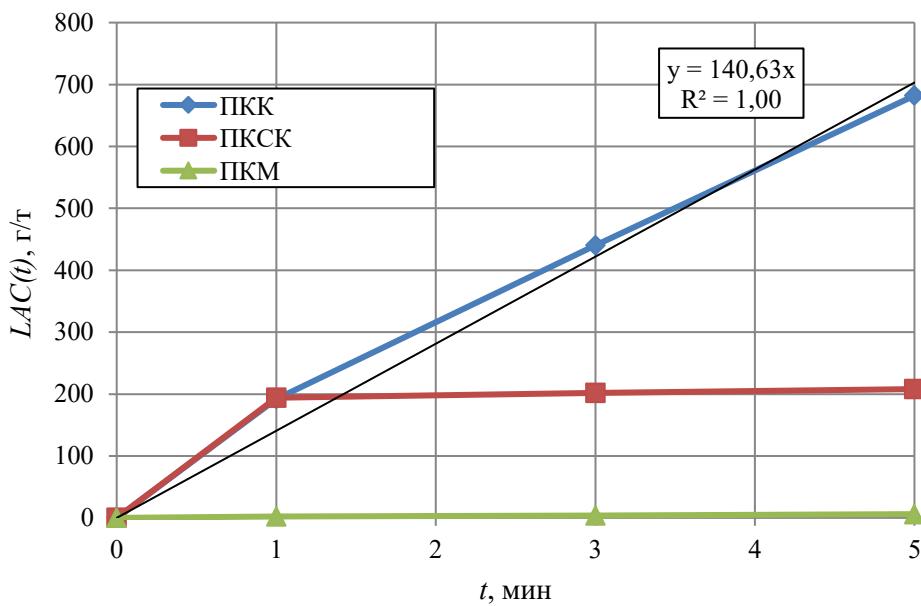


Рисунок 3.16 – Зависимость коэффициента  $LAC(t)$  от времени опыта на пробах кварцевого песка крупного (ПКК), средней крупности (ПКСК) и мелкого (ПКМ)

Затухающий характер  $LAC$  от длительности воздействия зерен грунта на поверхность крыльчатки наблюдается слабо на пробе карьерного песка ПСК (достигаемый  $LAC = 398$  г/т) и сильно – на пробе кварцевого песка

ПКСК (достигаемый  $LAC = 208$  г/т). Мелкий кварцевый песок ПКМ показал очень слабую абразивность ( $LAC = 6$  г/т).

Образцы карьерного песка различных фракций показывают затухание роста  $LAC$  от времени опыта (рисунок 3.17).

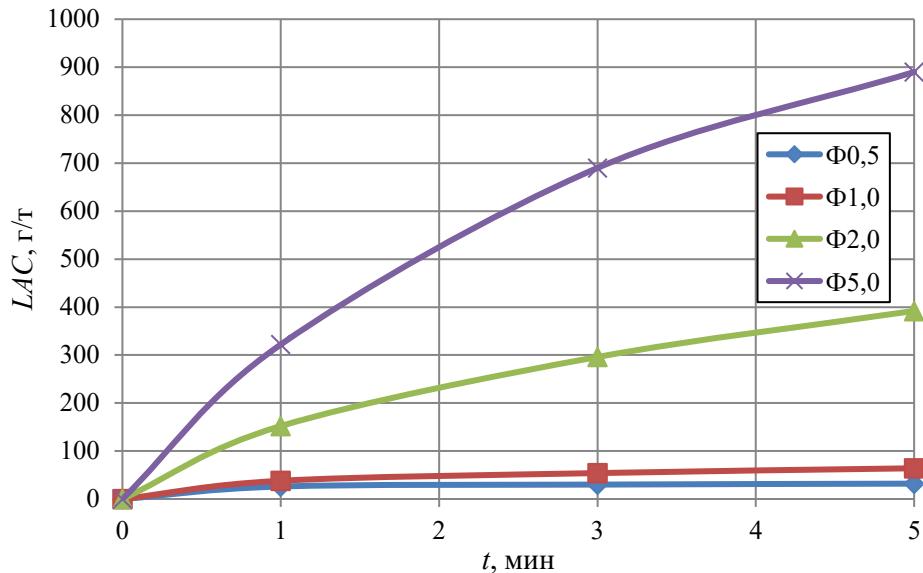
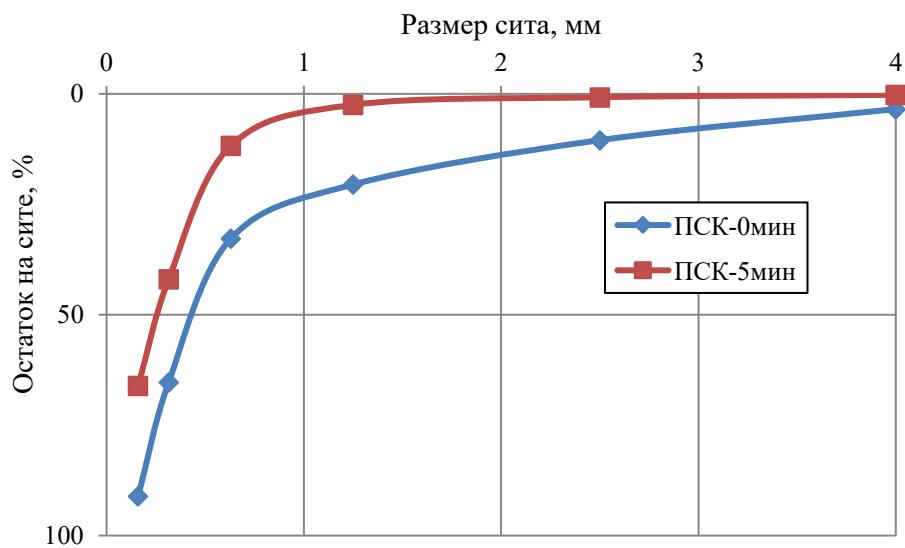


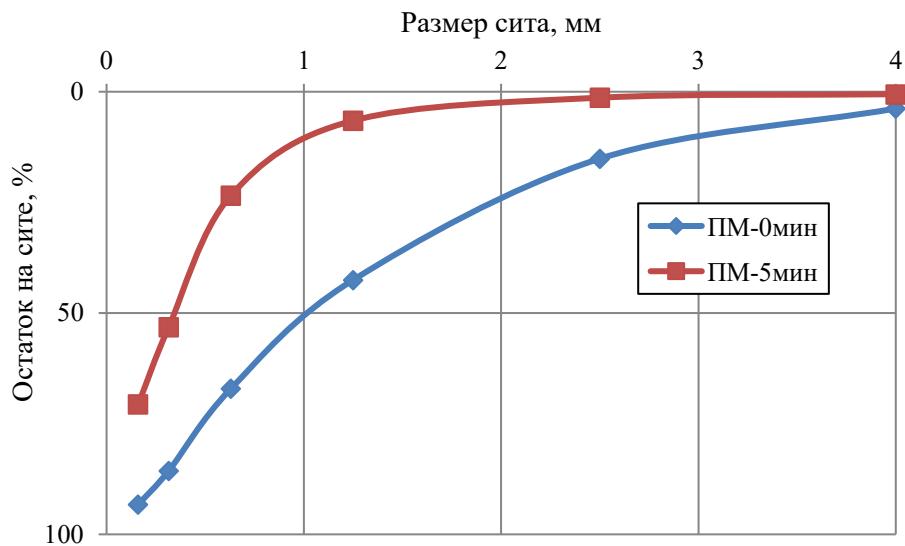
Рисунок 3.17 – Зависимость коэффициента  $LAC(t)$  от времени опыта на пробах узких фракций карьерного песка: 0,25-0,5-1 мм ( $\Phi 0,5$ ); 0,5-1-2 мм ( $\Phi 1,0$ ); 1-2-5 мм ( $\Phi 2,0$ ); 2-5-10 мм ( $\Phi 5,0$ )

Конечный  $LAC$  для фракции  $\Phi 0,5$  – 32 г/т, для фракции  $\Phi 1,0$  – 64 г/т, для фракции  $\Phi 2,0$  – 392 г/т, для фракции  $\Phi 5,0$  – 890 г/т.

Далее приведены результаты исследования гранулометрического состава исходных и конечных испытываемых проб с построением процентных графиков их полных весовых остатков на стандартных ситах для карьерных песков (рисунок 3.18), кварцевых песков (рисунок 3.19) и фракционированных карьерных песков (рисунок 3.20).

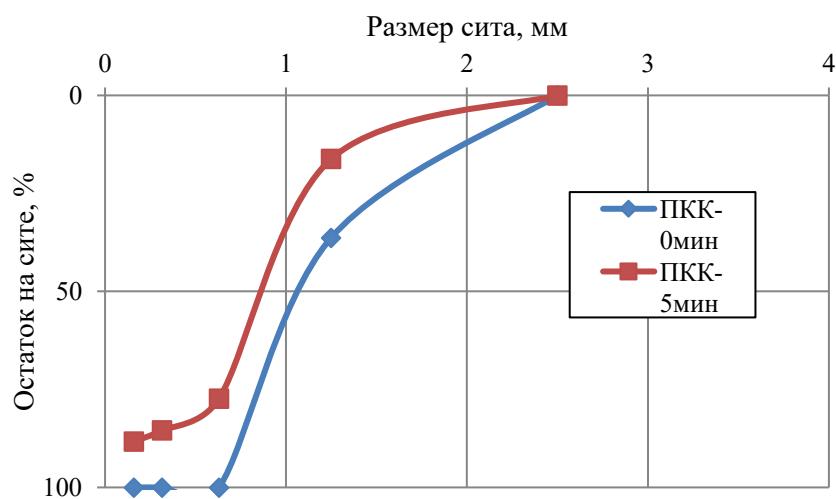


(а)

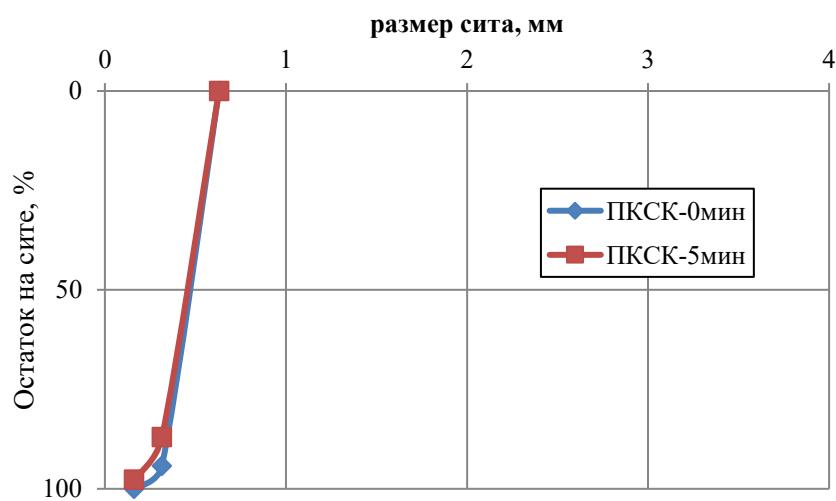


(б)

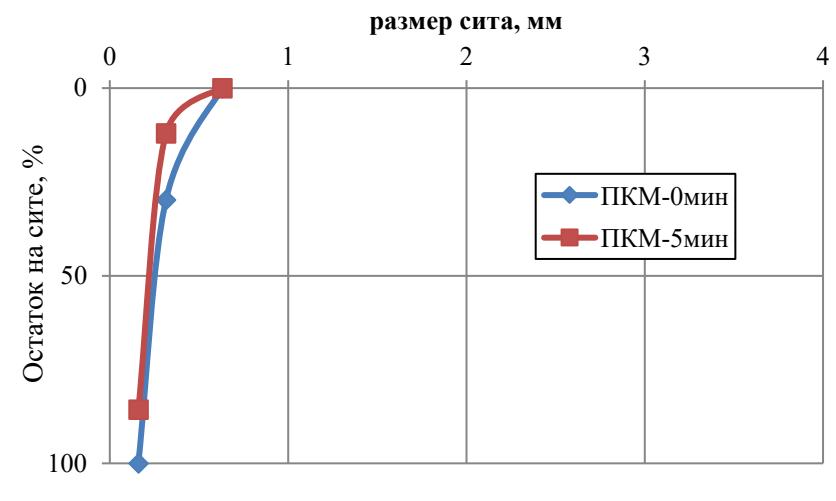
Рисунок 3.18 – Гранулометрический состав по полным остаткам проб карьерного песка ПСК (а), ПМ (б) через 0 и 5 минут опыта



(а)

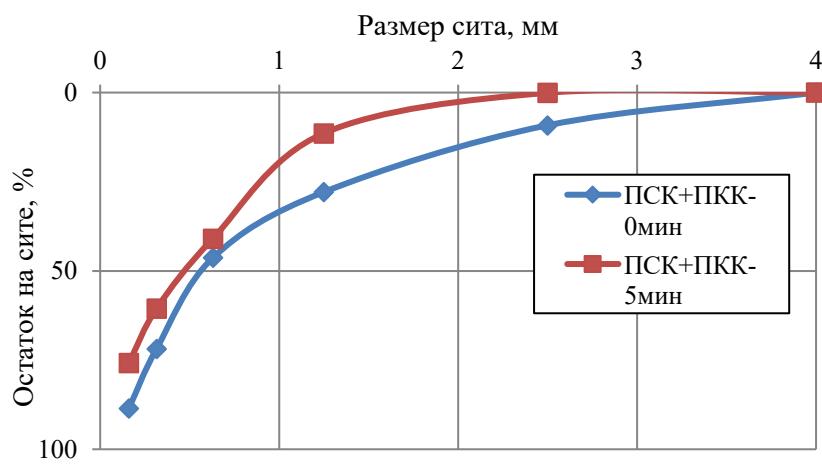


(б)

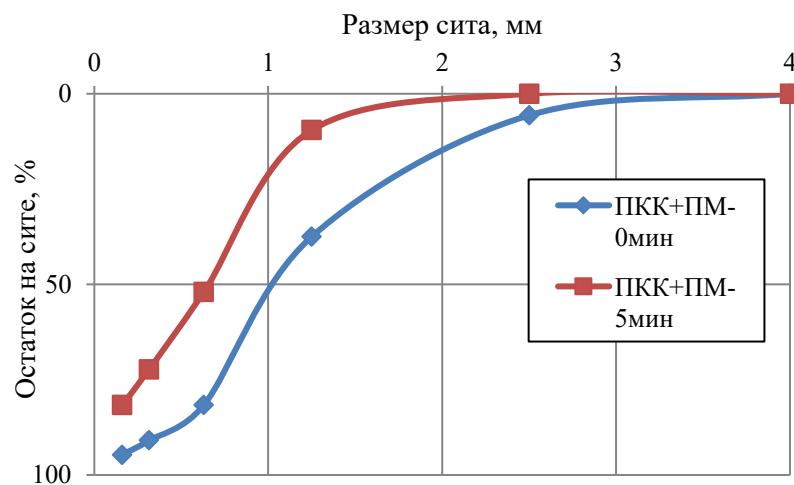


(в)

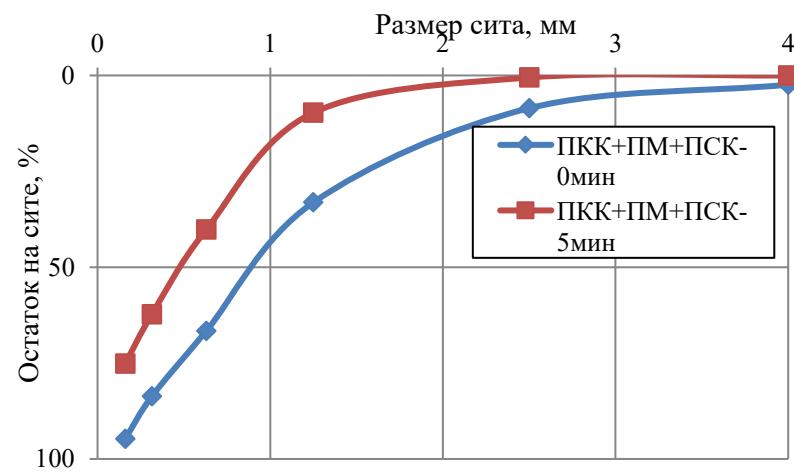
Рисунок 3.19 – Гранулометрический состав по полным остаткам проб кварцевого песка ПКК (а), (б) ПКСК, (в) ПКМ через 0 и 5 минут опыта



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.20 – Гранулометрический состав по полным остаткам проб из равных порций карьерного и кварцевого песка ПСК+ПКК (а), ПКК+ПМ (б), ПКК+ПМ+ПСК (в) через 0 и 5 минут опыта

По пересечению графиков с горизонтальной осью сетки со значением полного остатка 50% определяют значение среднего размера  $D50$  зерна в пробе. Также по известному, описанному ранее способу суммирования долей полных остатков на ситах размером 2,5 мм, 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм и 0,16 мм определяется модуль крупности  $MK$ .

Эти два показателя характеризуют крупность испытываемых зерен, которая сильно влияет на их абразивность. На рисунке 3.21 представлены полученные зависимости  $LAC$  от среднего размера  $D50$  зерна песков и модуля крупности  $MK$  в исходной пробе.

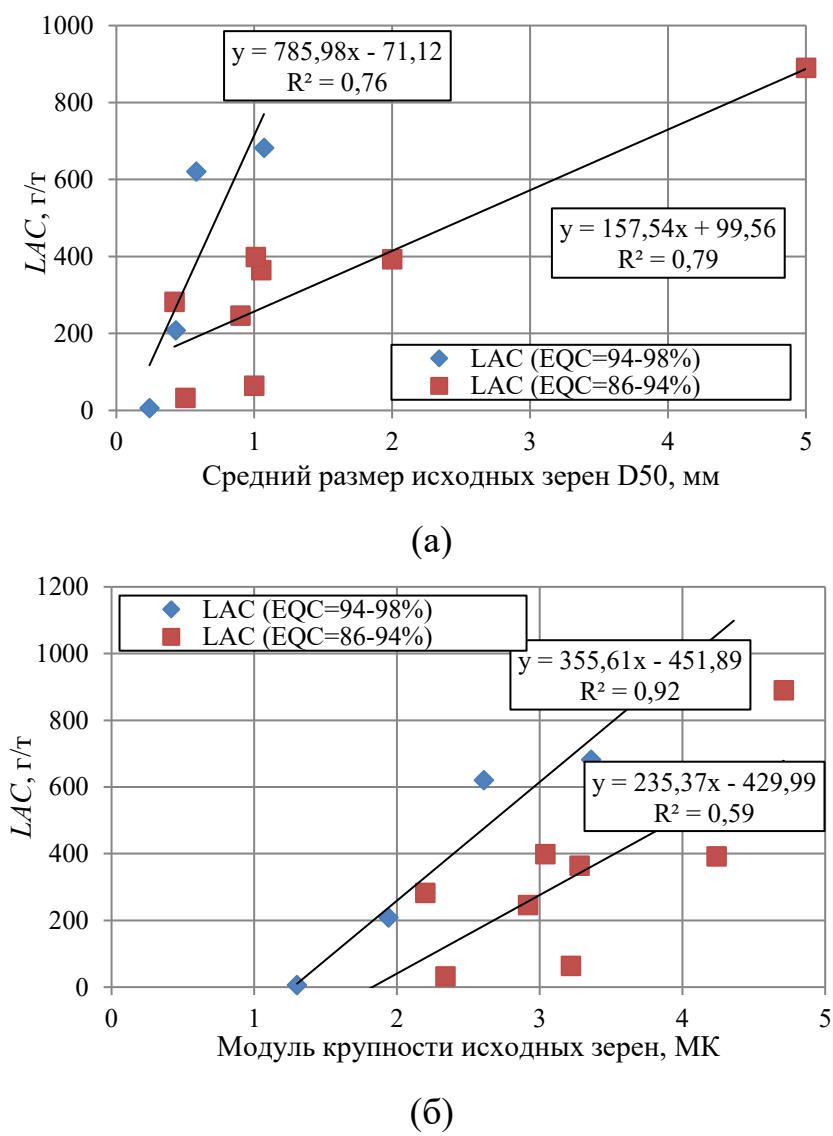


Рисунок 3.21 – Зависимость  $LAC$  от среднего размера  $D50$  (а), от модуля крупности  $MK$  (б) исходных зерен песков

Показатели для проб сгруппированы для двух диапазонов эквивалентного содержания кварца  $EQC$  – 94-98% (высокое) и 86-94% (повышенное). Показатель абразивности  $LAC$  при высоком содержании кварца линейно повышается от 100 г/т до 800 г/т при увеличении среднего размера исходного зерна с 0,24 мм до 1,0 мм и при увеличении модуля крупности с 1,3 до 3,4. Показатель абразивности  $LAC$  при повышенном содержании кварца линейно растет от 150 г/т до 900 г/т при увеличении среднего размера исходного зерна с 0,4 мм до 5,0 мм и при увеличении модуля крупности с 1,8 до 4,5. Наблюдается прямая связь между крупностью зерен и их абразивностью.

Положение графиков, соответствующих высокому содержанию кварца, над графиками для более низкого содержания кварца говорит о прямом влиянии эквивалентного содержания кварца в пробах песков на показатель абразивности  $LAC$ . При модуле крупности зерен  $МК = 3$  повышение эквивалентного содержания  $EQC$  с 90% до 96% приводит к увеличению показателя абразивности  $LAC$  с 270 г/т до 600 г/т.

Таким образом на базе сверлильного станка была разработана универсальная испытательная установка с изнашиваемыми инструментами для определения абразивности скальных и дисперсных грунтов по методу вращающейся крыльчатки (коэффициента  $LAC$ ), которая дооснащена инструментами для определения абразивности скальных грунтов по методу вращающегося полого стержня (коэффициента  $K_{ab}$ ). Универсальность установки и её исполнение в соответствии с требованиями обоих методов позволили определить и связать коэффициенты  $LAC$  и  $K_{ab}$  при испытаниях малоабразивных скальных грунтов, что повышает точность классификации скальных грунтов по абразивности.

Предварительно проведенное определение пределов прочности при сжатии и растяжении скальных грунтов (известняка и доломита) позволило установить прямую связь этих показателей с коэффициентами абразивности,

что в дальнейшем позволит в целом для других характерных типов скальных грунтов по их прочности прогнозировать абразивные свойства.

Предварительно проведенное определение минерального (фазового) состава проб скальных и дисперсных грунтов позволило установить прямую связь между параметром абразивности  $LAC$  и содержанием в них кварцевой компоненты, что создает возможность прогноза абразивности по известному содержанию кварца в минеральном составе грунта.

Показано, что более крупному составу грунта одного типа, определяемому ситовым анализом методом вращающейся крыльчатки, соответствует более значительный показатель абразивности, а при обработке проб в зависимости от времени увеличивается степень их измельчения и уменьшается скорость износа инструмента.

Полученные результаты изложены в [76].

Новизна исследований заключается в приспособлении и развитии известных отечественных и зарубежных методик с учетом особенностей грунтов применительно к проходке тоннелей с помощью ТПМК в России.

Полученные экспериментальные результаты будут использованы для разработки методики определения абразивности грунтов и для прогноза скорости износа режущего инструмента ТПМК на основе лабораторно-полевой классификации грунтов.

Тем самым подтверждается **первое научное положение**.

## Выводы

1 Установлено, что коэффициенты  $LAC$  прямо пропорциональны пределам прочности как известняка, так и доломита, при сжатии коэффициент детерминации 0,94, а при растяжении 0,97. Это дает возможность прогноза абразивности данных типов пород по их прочностным показателям.

2 Показано, что абразивность скальных грунтов по методу  $LCPC$  связана со средним размером  $D$  исходных кусков известняка и доломита. Указанные связи аппроксимированы линейными зависимостями, при этом установлено, что при увеличении среднего размера исходного куска доломита в 1,4 раза коэффициент абразивности  $LAC$  повышается в 2,4 раза, а для известняка  $LAC$  увеличивается в 3,2 раза. Т. е. несмотря на то, что показатель  $LAC$  для известняка меньше, чем для доломита, увеличение влияния среднего размера на  $LAC$  размеров кусков известняка больше, чем доломита.

3 На основании проведенных испытаний образцов скальных грунтов построена зависимость между показателем абразивности  $LAC$  по методу вращающейся крыльчатки  $LCPC$  и коэффициентом абразивности по методу вращающегося полого стержня  $K_{ab}$  по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову, которая имеет вид  $K_{ab} = 40,07LAC - 10,6$  при коэффициенте детерминации 0,9.

4 При оценке влияния содержания кварца  $EQC$  на абразивность дисперсных грунтов (песка) по методу вращающейся крыльчатки показатели сгруппированы для двух диапазонов эквивалентного содержания кварца  $EQC$  94-98% (высокое) и 86-94% (повышенное). Для каждого из диапазонов связь показателя  $LAC$  с содержанием кварца  $EQC$  аппроксимированы линейными зависимостями, при этом коэффициент пропорциональности для высокого содержания кварца больше, чем в 10 раз превосходит аналогичный

коэффициент для повышенного содержания, что говорит о сильном влиянии содержания кварца на абразивность песка.

5 Показатель абразивности  $LAC$  при высоком содержании кварца линейно повышается от 100 г/т до 800 г/т при увеличении среднего размера исходного зерна с 0,24 мм до 1,0 мм и при соответствующем увеличении модуля крупности с 1,3 до 3,4.

6 Показатель абразивности  $LAC$  при повышенном содержании кварца линейно растет от 150 г/т до 900 г/т при увеличении среднего размера исходного зерна с 0,4 мм до 5,0 мм и при увеличении модуля крупности с 1,8 до 4,5. Наблюдается прямая связь между крупностью зерен и их абразивностью.

7 Положение графиков, соответствующих высокому содержанию кварца, над графиками для более низкого содержания кварца говорит о прямом влиянии эквивалентного содержания кварца в пробах песков на показатель абразивности  $LAC$ . При модуле крупности зерен  $M_K = 3$  повышение эквивалентного содержания кварца с 90% до 96% приводит к увеличению показателя абразивности  $LAC$  с 270 г/т до 600 г/т.

## **4 Исследование особенностей взаимодействия режущего инструмента с дисперсными грунтами**

### **4.1 Результаты фракционного анализа проб при их обработке по методу LCPC**

Для проведения испытаний в качестве испытуемой пробы был выбран песок одного из карьеров Московской области. Пробу весом 500 граммов измельчили в лабораторной установке в течение одной, трех и пяти минут. Ситовый анализ проводился до начала и после каждого этапа испытаний.

В таблице 1.Е Приложения Е представлены результаты испытаний на абразивность проб карьерного песка. Каждая пробы испытывалась отдельно.

В таблице 1.Ж Приложения Ж представлены результаты ситового анализа проб песка после испытаний на абразивность.

По результатам проведения ситового анализа были построены интегральные гранулометрические кривые каждого этапа, представленные на рисунке 4.1.

Из рисунка видно, что при увеличении времени дробления происходит смещение массы материала из более крупных фракций в более мелкие, что может быть оценено количественно с помощью показателя модуля крупности песка  $M_k$ .

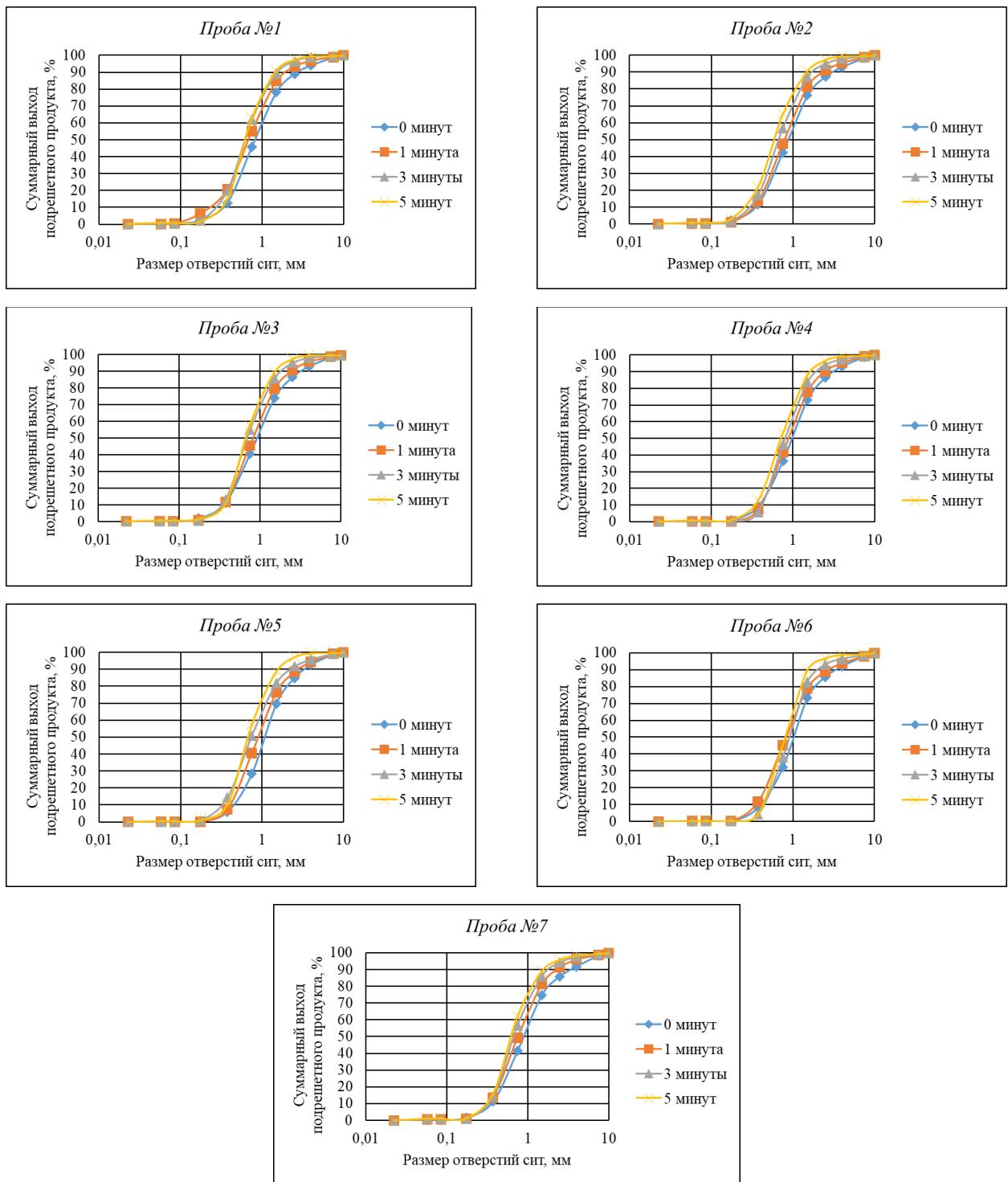


Рисунок 4.1 – Интегральные гранулометрические кривые до начала, после первой, третьей и пятой минуты испытаний соответственно

В таблице 4.1 представлены показания модуля крупности песка  $M_k$  для каждой пробы.

Таблица 4.1 – Расчет модуля крупности песка  $M_k$  для проб карьерного песка

№ пробы	Время испытания, мин	Модуль крупности $M_k$
1	0	2,11
	1	1,80
	3	1,65
	5	1,65
2	0	2,20
	1	2,02
	3	1,77
	5	1,57
3	0	2,25
	1	2,08
	3	1,84
	5	1,75
4	0	2,32
	1	2,17
	3	2,01
	5	1,80
5	0	2,48
	1	2,22
	3	1,97
	5	1,76
6	0	2,40
	1	2,14
	3	2,14
	5	1,93
7	0	2,21
	1	1,98
	3	1,81
	5	1,69

Как видно из таблицы 4.1 с увеличением времени обработки пробы значение модуля крупности песка  $M_k$  падает. С физической точки зрения это означает, что с уменьшением модуля крупности песка  $M_k$  уменьшается количество крупных зерен, что обусловлено дроблением частиц при взаимодействии с вращающейся крыльчаткой. Однако особенностью данного показателя является то, что две партии мелкого песка, обладающие зёрнами разной крупности, могут иметь равные значения  $M_k$ . В связи с этим, для

полной качественной характеристики песка применяют и иные показатели, которые позволяют оценить качество песка по совокупности всех имеющихся характеристик.

## 4.2 Анализ полигонов распределений

Данные ситового анализа, полученные при обработке проб песка на установке с вращающейся крыльчаткой приведены в таблице 1.Ж Приложения Ж.

На рисунке 4.2 в графическом виде показаны полигоны кумулятивных относительных частот результатов, отраженных в столбцах 5 (1), 7 (2), 9 (3) и 11 (4) таблицы 1.Ж Приложения Ж для каждой пробы, представляют собой выборочные функции распределения  $F(d)$  случайной величины – диаметра  $d$  частиц пробы.

На рисунке 4.3 графически представлены результаты измерений в виде полигонов, в которых высота столбика показывает вероятность  $P_i$  попадания случайной величины, размера частиц  $d$ , в соответствующий интервал от  $d_i$  до  $d_{i+1}$ . Поскольку кривые на этом рисунке размещены очень плотно и сливаются, для наглядности на рисунке 4.3 (справа) ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе.

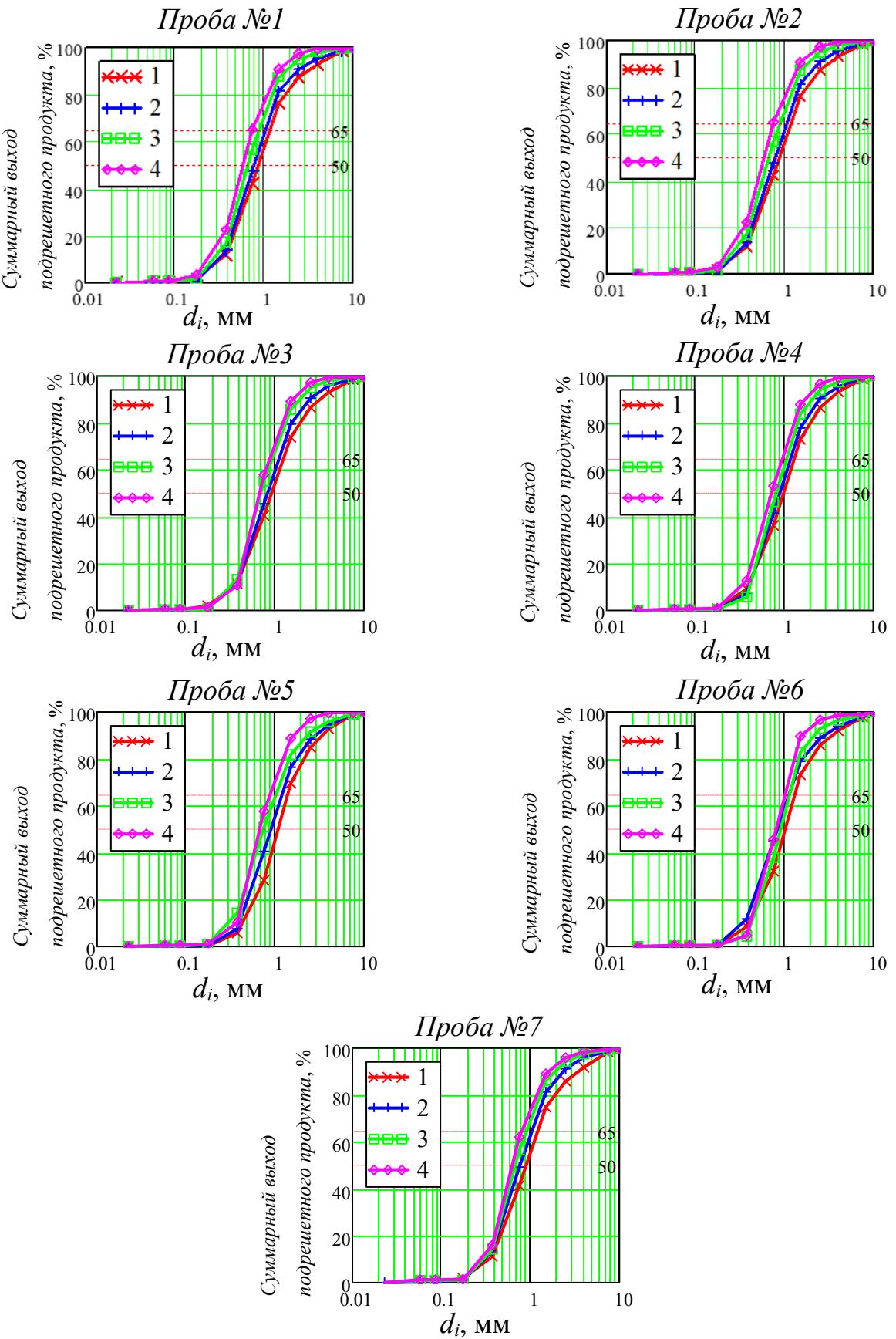
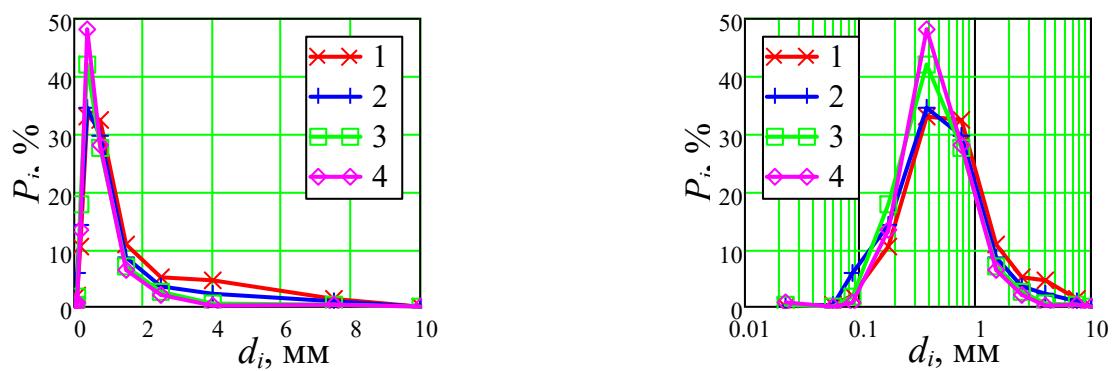
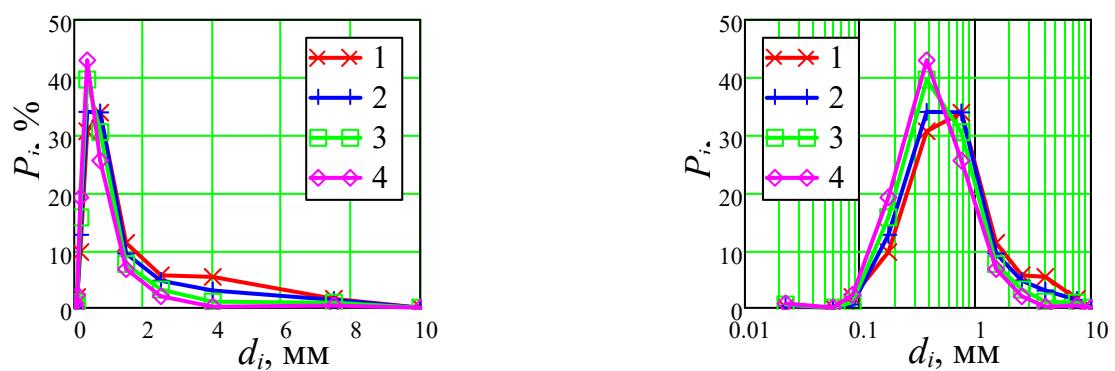


Рисунок 4.2 – Функции распределения размера частиц при оценке по просыпанию пробы  $F_n(d_i)$  без обработки пробы (1) и в зависимости от времени обработки в течение 1 (2), 3 (3), 5 (4) минут с уровнями 50 и 60 %

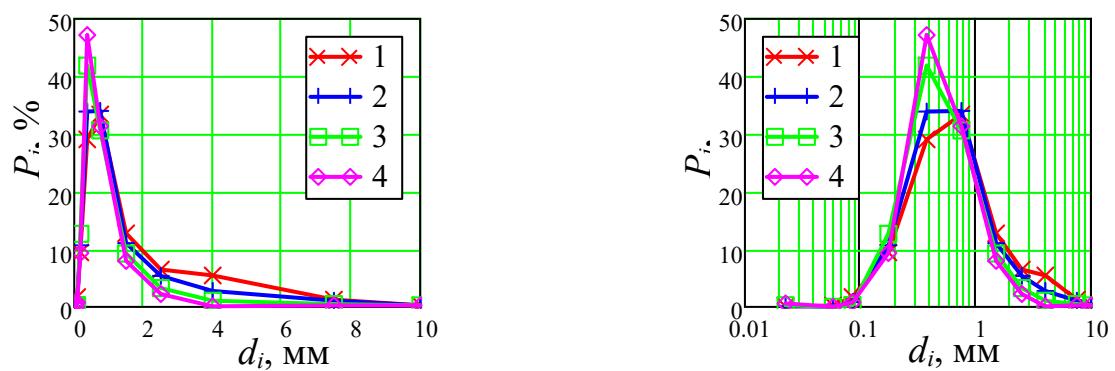
Проба №1



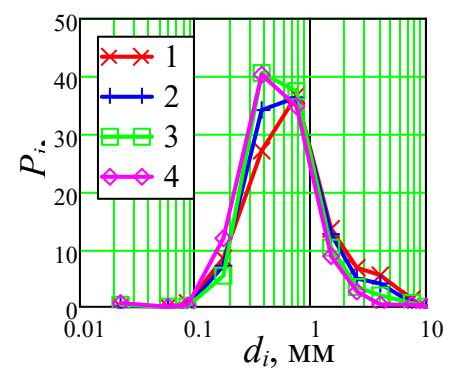
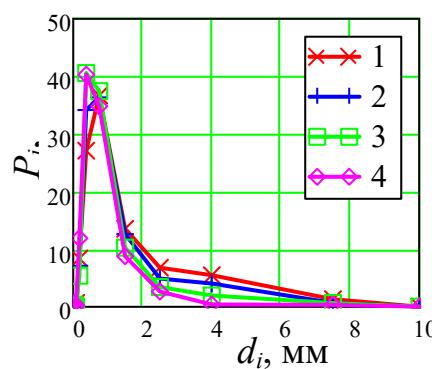
Проба №2



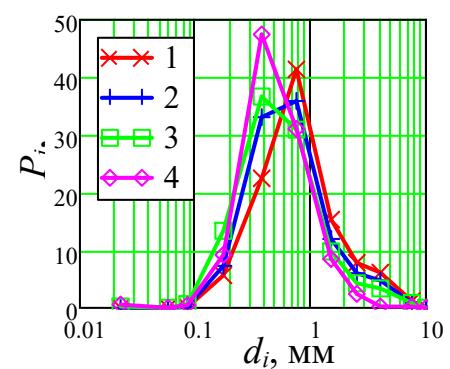
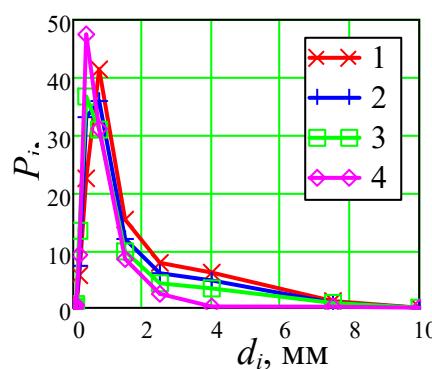
Проба №3



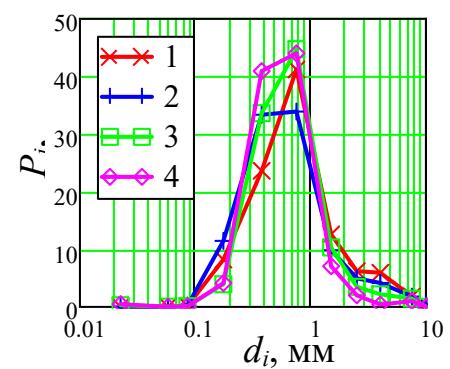
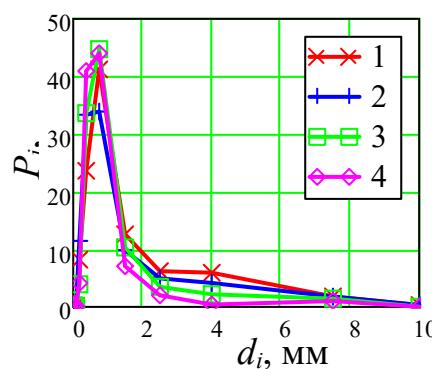
Проба №4



Проба №5



Проба №6



### Проба №7

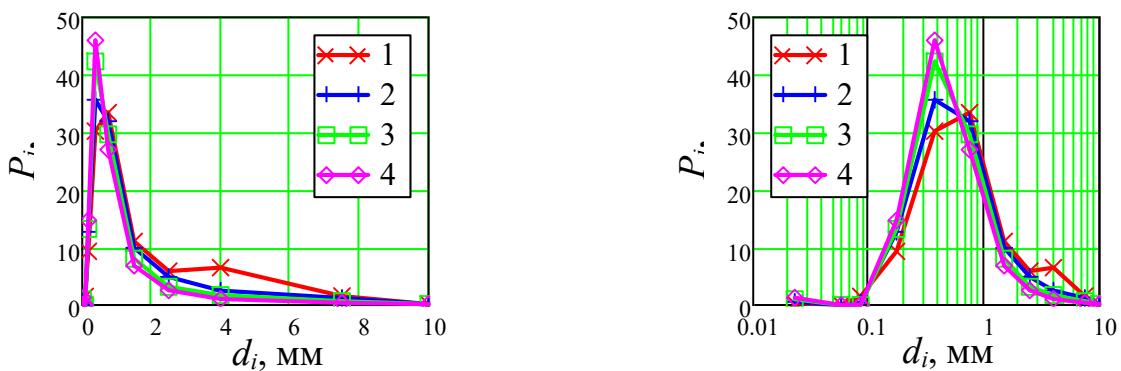


Рисунок 4.3 – Полигоны относительных частот по интервалам размеров при времени обработки проб 0, 1, 3, 5 минут, кривые 1, 2, 3, 4 приведены соответственно в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабах оси абсцисс

Из анализа форм кривых следует, что при увеличении времени обработки проб кривые распределения сужались, при этом максимальные значения вероятностей по оси ординат возрастили, что свидетельствует об уменьшении среднего размера частиц в пробе при увеличении времени обработки.

### 4.3 Построение гистограмм распределений вероятностей

Модули крупности дают обобщенную характеристику распределений частиц по размерам. При этом одинаковые значения модуля крупности могут быть получены для проб с различным распределением размеров. Поскольку модули крупности не дают детального отображения размеров частиц, был предпринят расчет плотностей вероятности, дающих более детальную картину распределения размеров частиц.

Согласно ГОСТ Р 50779.10-2000 гистограмма – графическое представление распределения частот для количественного признака, образуемое соприкасающимися прямоугольниками, основаниями которых служат интервалы классов, а площади пропорциональны частотам этих классов. Под классами в данном случае понимается определенный диапазон

сит. Следует отметить, что гистограмма характеризует плотность распределения вероятностей, что отличает ее от полигонов распределений частот попадания в интервалы, графически изображаемых столбиковой диаграммой или полигоном частот, как на рисунке 4.3.

Поскольку вероятность попадания случайной величины, размера частицы  $d$ , в интервал от  $d_i$  до  $d_{i+1}$  равна  $P_i = f_i(d_{i+1} - d_i)$ , значение выборочной плотности вероятности в  $i$ -той точке рассчитывалось по формуле

$$f_i = P_i / (d_{i+1} - d_i), \quad (4.1)$$

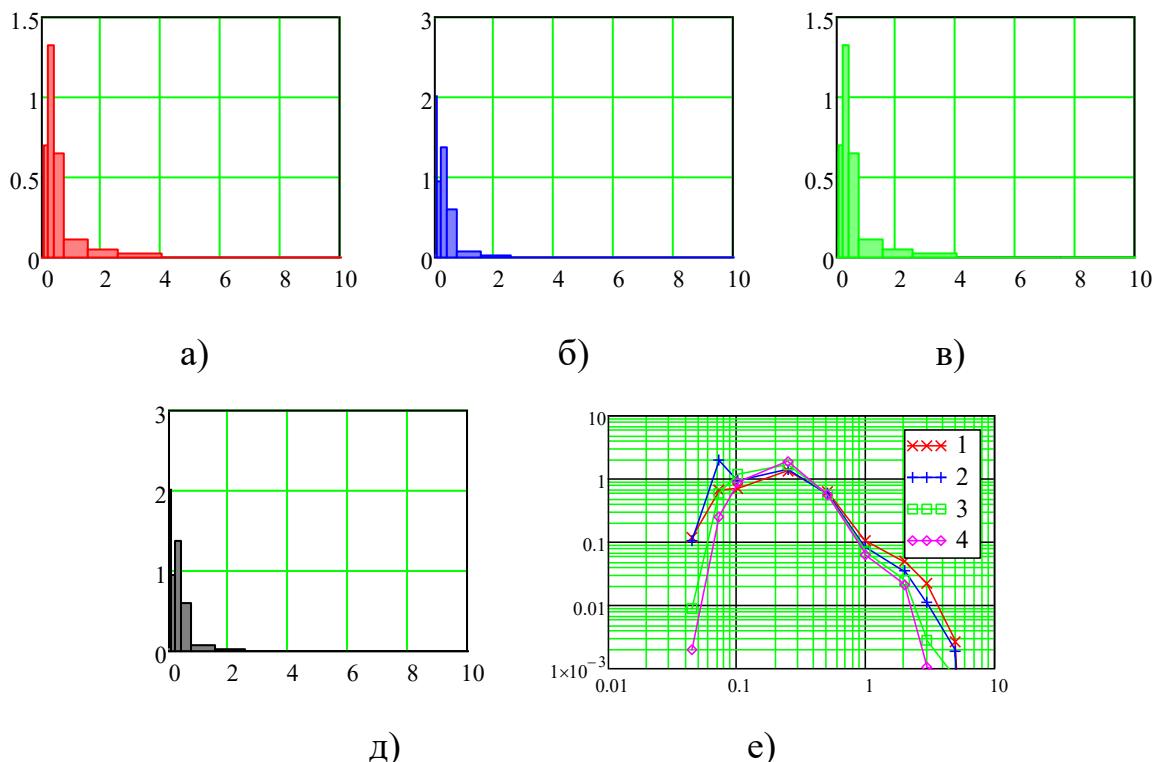
где  $P_i$  – вероятность попадания случайной величины  $d$  в интервал от  $d_i$  до  $d_{i+1}$ ;

$f_i$  – оценка плотности вероятности в  $i$ -той точке;

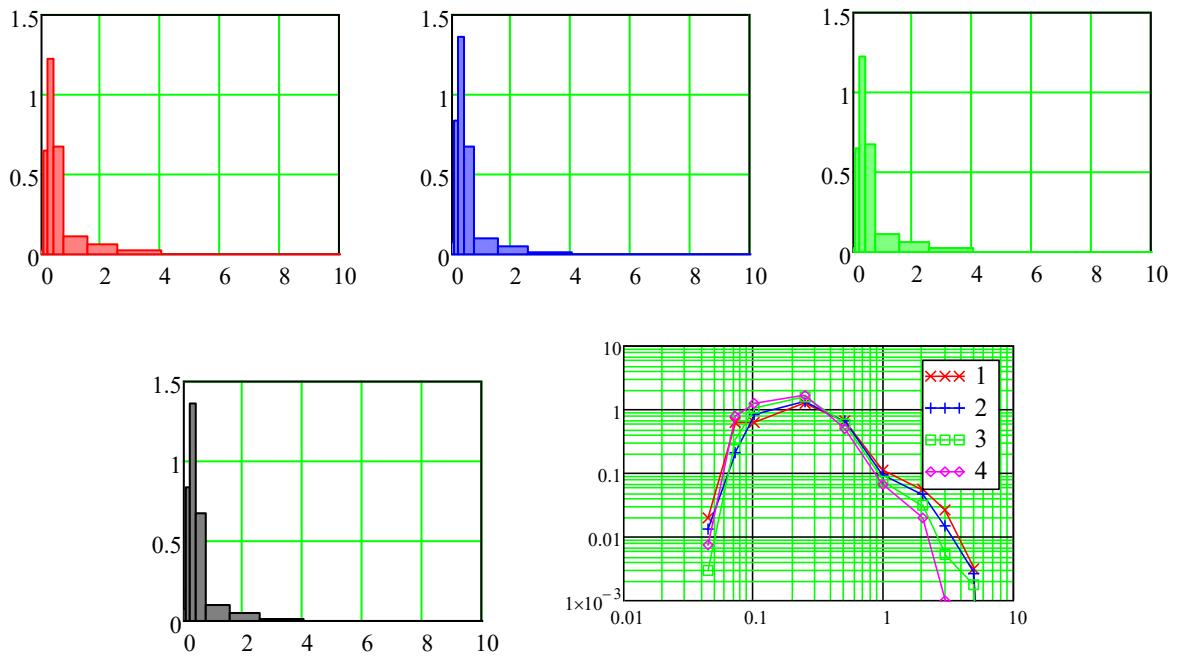
$(d_{i+1} - d_i)$  – ширина  $i$ -го интервала.

На рисунке 4.4 представлены гистограммы выборочных плотностей вероятности в виде столбиков для проб без обработки (а) и с обработкой 1 (б), 3 (в) и 5 (г) минут, а также то же в виде полигона в двойном логарифмическом масштабе (д).

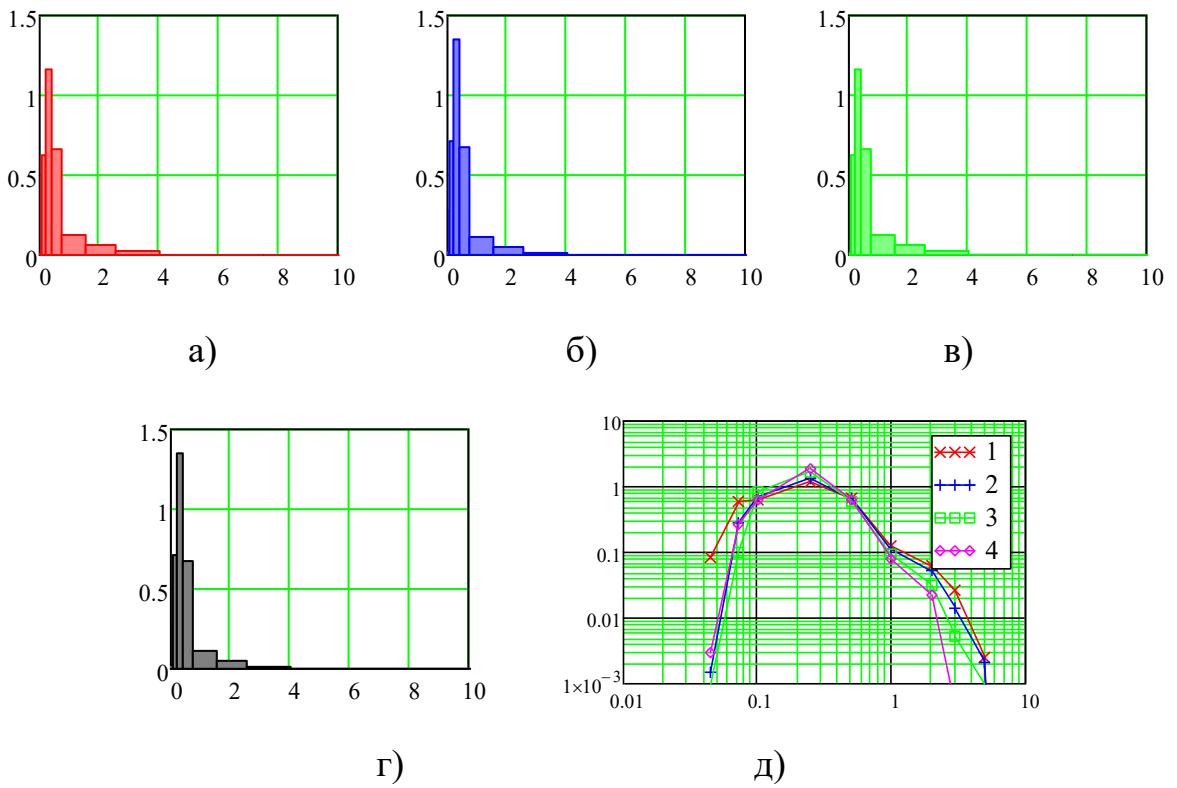
*Проба №1*



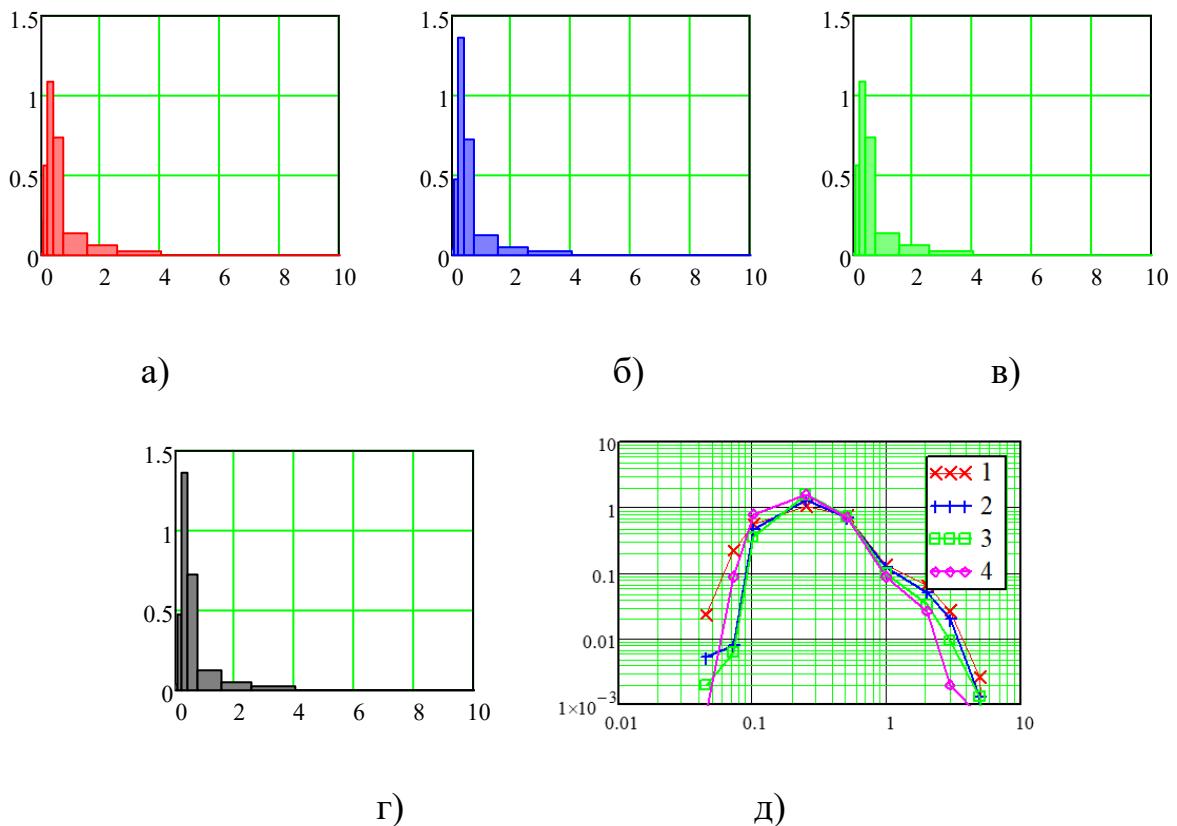
*Проба №2*



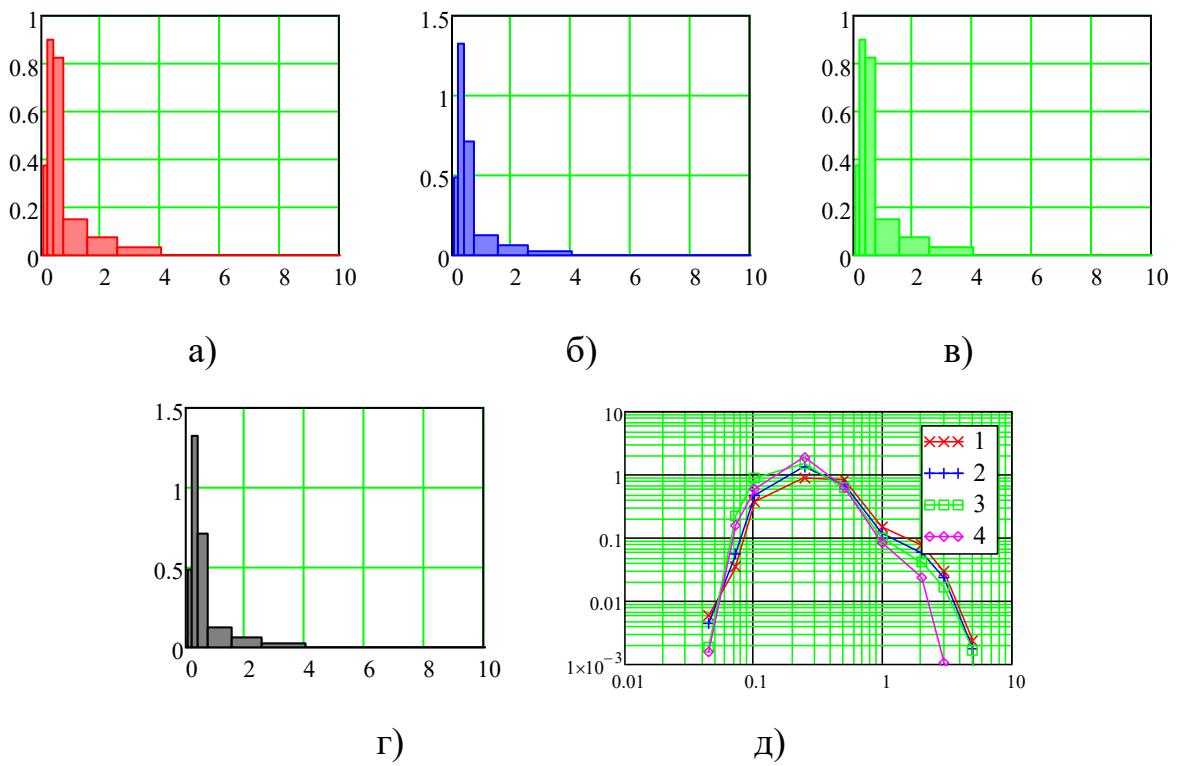
*Проба №3*



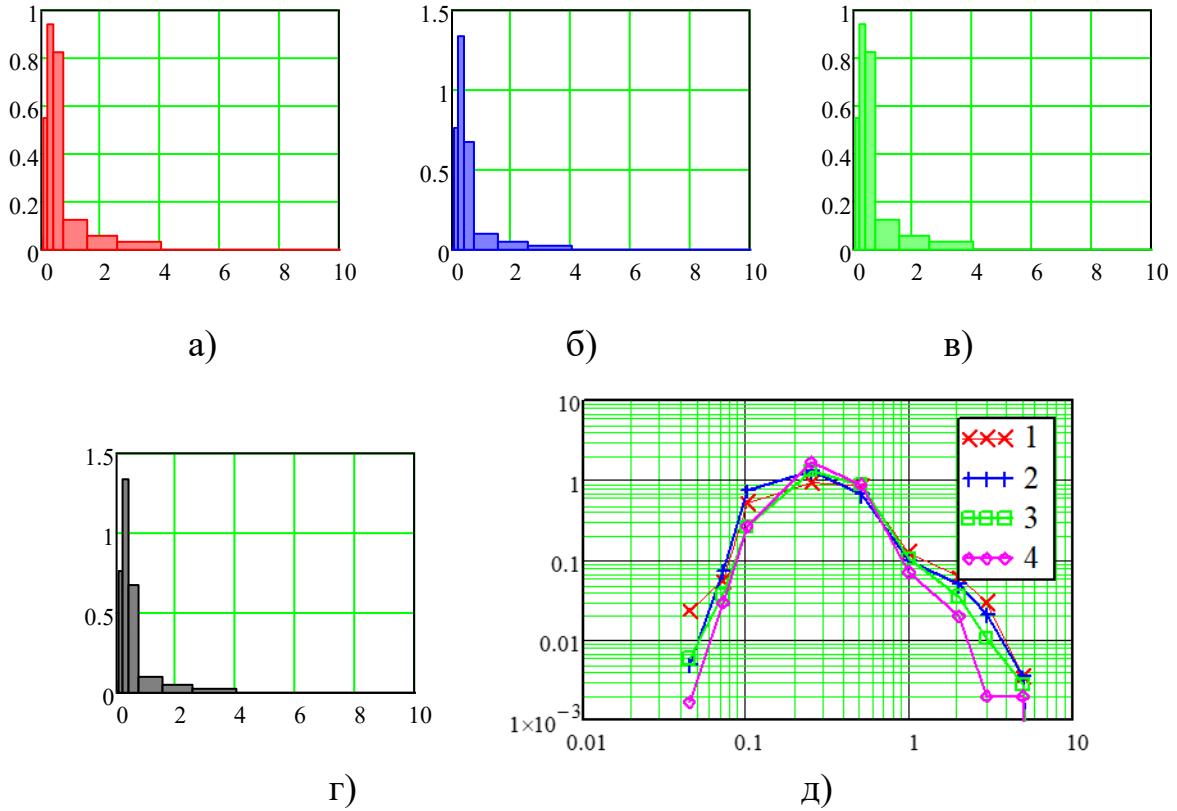
Проба №4



Проба №5



Проба №6



Проба №7

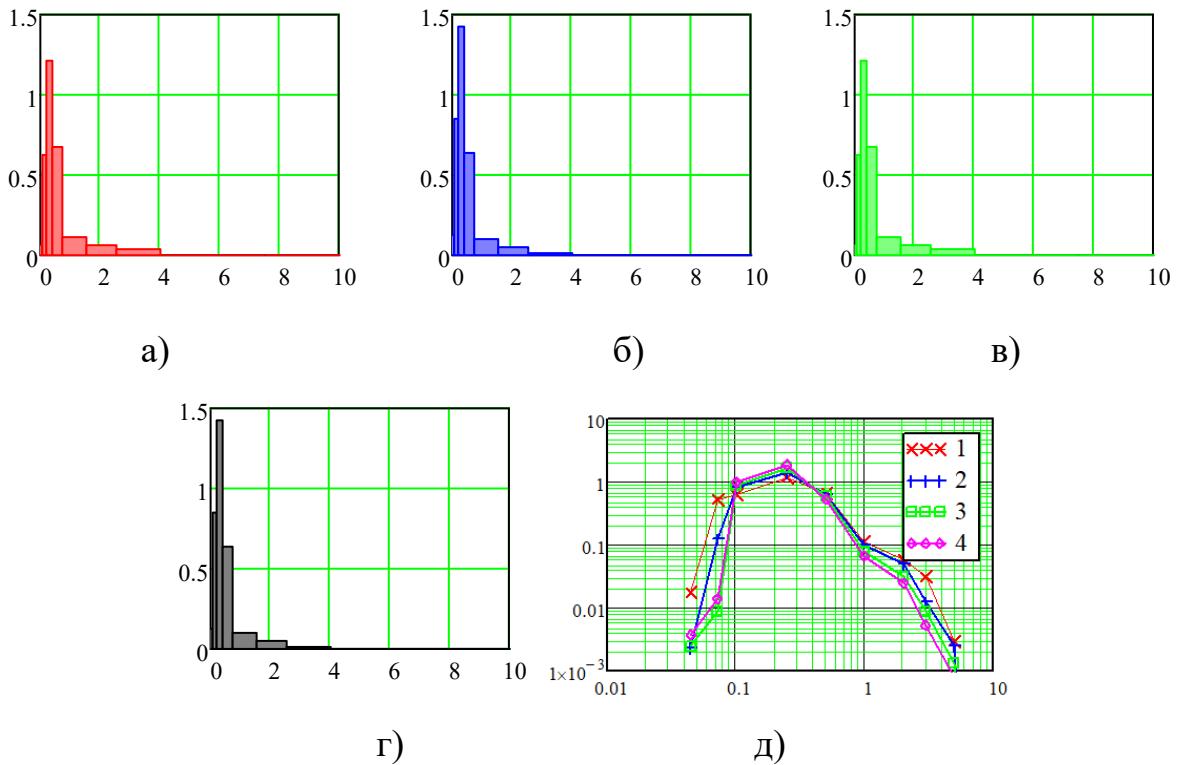


Рисунок 4.4 – Гистограммы выборочных плотностей вероятности для проб без обработки (а) и с обработкой 1 (б), 3 (в) и 5 (г) минут, то же в виде полигона в двойном логарифмическом масштабе (д)

Как следует из рисунка 4.4, увеличение времени обработки приводит к сужению распределений плотностей вероятностей и увеличению их моды.

#### 4.4 Подбор плотностей распределений вероятностей размера частиц

Как упоминалось в разделе 2.7 для обработки данных была написана программа в среде MathCAD. Подбор значений коэффициентов уравнений (2.6)–(2.10) методом наименьших квадратов для исходной (первой) пробы дает значения:

$\mu = 0.479$ ;  $\sigma = 0.341$  для нормального распределения (2.6);

$\mu = -0.627$ ;  $\sigma = 0.918$  для логнормального распределения (2.7); для логнормального первого коэффициент может быть меньше нуля, т.к. это логарифм среднего, а оно в данном случае меньше единицы. Второй параметр характеризует разброс. С увеличением времени обработки он будет уменьшаться.

$\sigma = 0.401$  для распределения Рэлея (2.8);

$m = 2.062$ ;  $\alpha = 0.293$  для гамма-распределения (2.9);

$\beta = 1.616$ ;  $\eta = 0.655$  для распределения Вейбулла (2.10).

Для оценки качества аппроксимации были рассчитаны разности между экспериментальными и теоретическими распределениями  $Z_i$ , т.н. остатки, а по ним – максимальные значения  $Z_{max}$  и среднеквадратические отклонения  $\sigma_Z$  остатков. Результаты приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Сравнительные характеристики аппроксимации экспериментальных данных различными распределениями

Вид распределения	$Z_{max}$	$\sigma_Z$	$R^2$
Нормальное	0.518	0.307	0.787
Логнормальное	0.236	0.133	0.965
Рэлея	0.781	0.285	0.864
Гамма	0.415	0.199	0.923
Вейбулла	0.446	0.232	0.891

По результатам таблицы 4.2 был сделан выбор логнормального распределения вида (2.7), для которого параметры  $Z_{max}$  и  $\sigma_Z$  минимальны, а параметр  $R^2$ , известный как коэффициент детерминации, максимальен в сравнении с другими распределениями. В дальнейшем приведены результаты обработки именно с ним. Для исследованных проб при аппроксимации опытных данных плотностью логнормального распределения получены значения параметров, приведенные в таблице 1.3 Приложения 3 и графически на рисунке 4.5 от времени обработки.

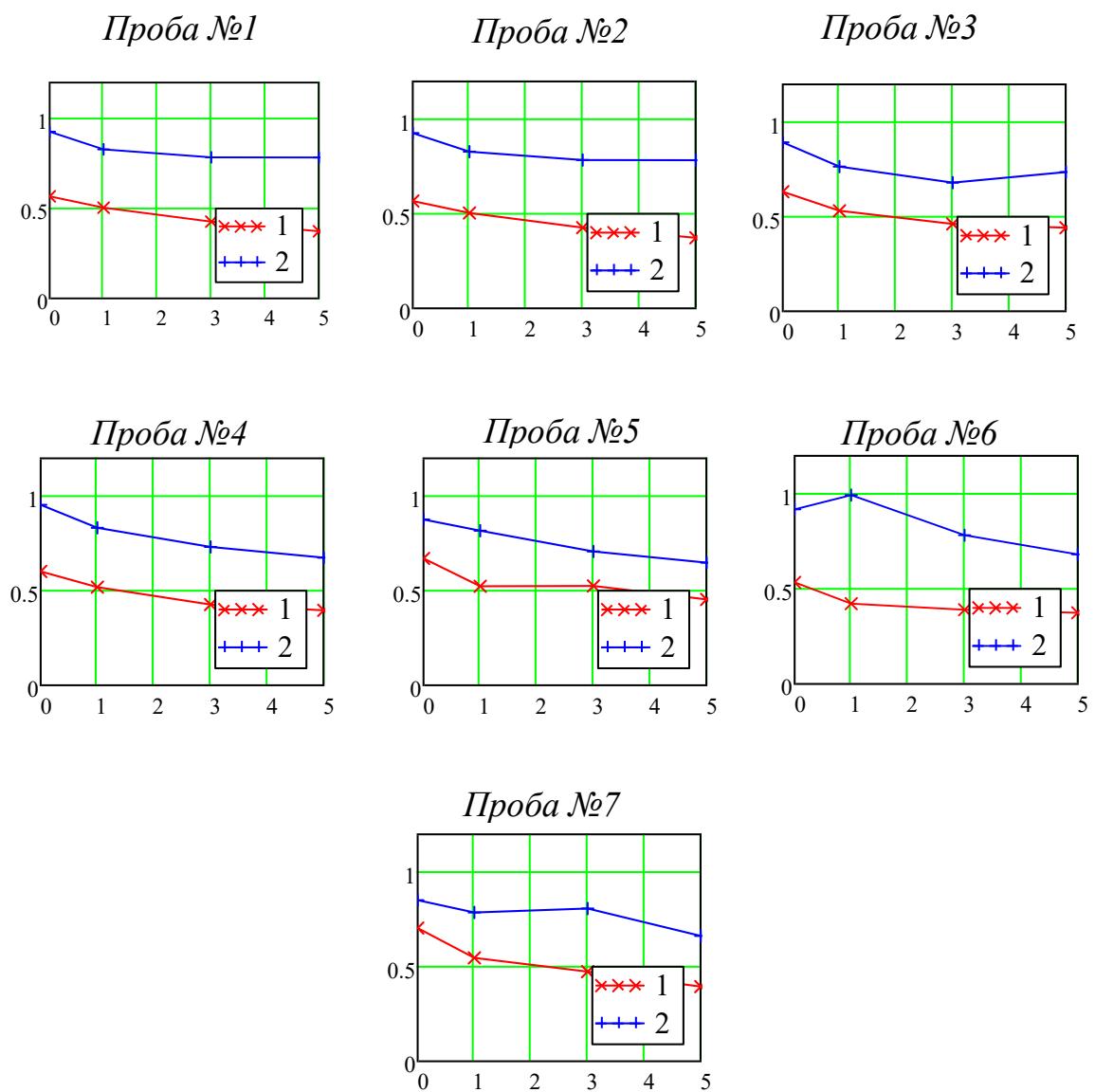


Рисунок 4.5 – Графики изменения параметров  $\exp(\mu)$  (1) и  $\sigma$  (2) логнормального распределения в зависимости от времени обработки каждой из исследованных проб

Из графиков рисунка 4.5 следует, что при увеличении времени обработки проб параметр  $\exp(\mu)$  и  $\sigma$  вероятностного распределения размеров частиц уменьшаются.

На рисунке 4.6 собраны распределения плотностей вероятности размеров частиц в зависимости от времени обработки для их сравнения между собой для всех проб.

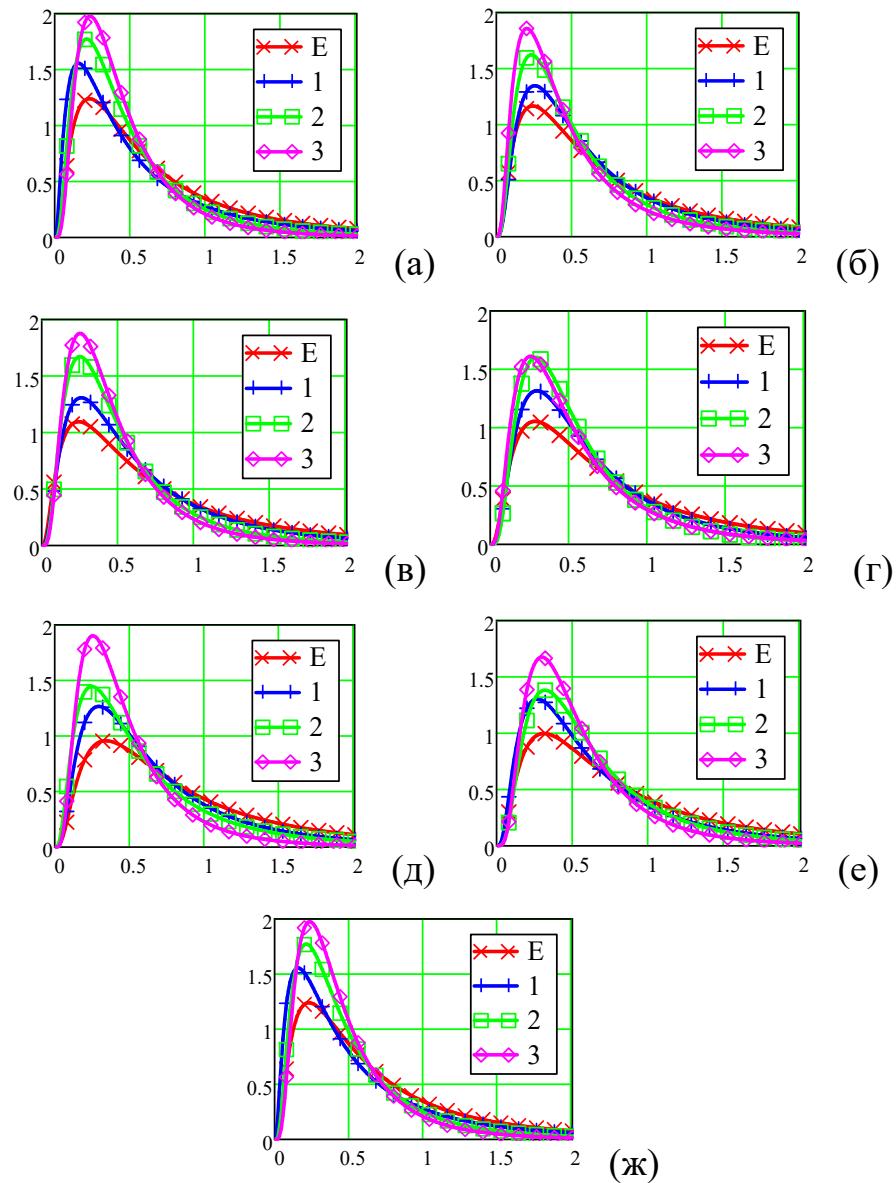


Рисунок 4.6 – Логнормальные аналитические распределения исходных размеров частиц для семи проб с первой (а) до седьмой (ж) на одной диаграмме для 0 ( $\times$ E), 1 (+1), 3 ( $\square$ 2) и 5 ( $\diamond$ 3) минут

Из представленных графиков следует, что при увеличении времени обработки распределения сужаются, а мода увеличивается.

Для количественной оценки влияния времени обработки проб были рассчитаны средние значения  $E$  и с.к.о.  $S$  логнормального распределения по формулам из ГОСТ Р ИСО 3534-2019.

$$E = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right), \quad (4.2)$$

$$S = \sqrt{\left(e^{\sigma^2} - 1\right)e^{2\mu + \sigma^2}}, \quad (4.3)$$

где  $E$  – среднее;  $S$  – среднеквадратическое отклонение.

Рассчитанные средние значения  $E$  и среднеквадратические отклонения логнормального распределения  $S$  при различных временах обработки для всех шести проб представлены в таблице 3.1 Приложения 3.

Графики зависимостей  $E$  (4.2) и  $S$  (4.3) от времени обработки проб приведены на рисунке 4.7.

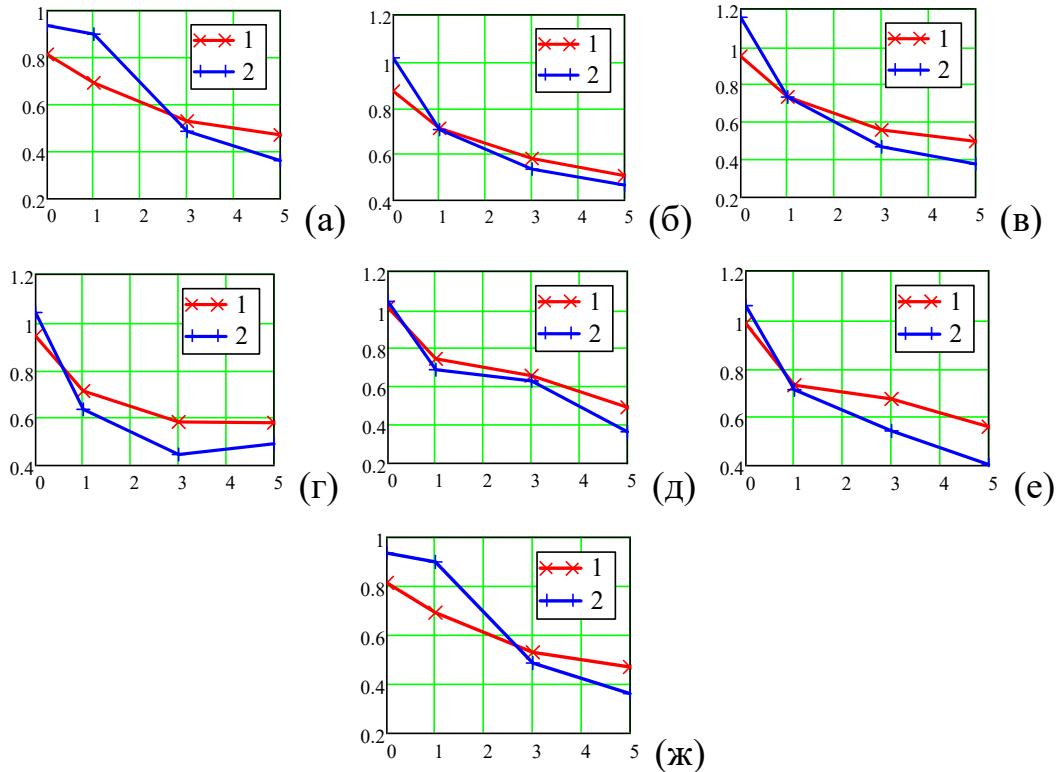


Рисунок 4.7 – Графики зависимостей средних значений  $E$  (1) и с.к.о.  $S$  (2) от времени обработки проб с первой (а) до седьмой (ж)

Из графиков рисунка 4.7 следует, что с увеличением времени обработки средний размер частиц уменьшается более чем в 1,6 раза, а разброс – более чем в 2,1 раза. Кроме того, можно отметить, что наиболее интенсивное воздействие происходит на первой минуте обработки.

Таким образом подтверждается обоснованность и достоверность **второго научного положения.**

## Выводы

1 В результате экспериментов с пробами карьерного песка по методу вращающейся крыльчатки (*LCPC*) установлено, что увеличение времени обработки (от 1 до 5 минут) приводит к смещению массы материала из крупных фракций в более мелкие. Это подтверждается снижением модуля крупности песка  $M_k$ , который уменьшается с ростом длительности взаимодействия с вращающейся крыльчаткой, указывая на дробление частиц и уменьшение количества крупных зерен.

2 Полигоны кумулятивных относительных частот и гистограммы плотностей вероятностей демонстрируют сужение распределений с увеличением времени обработки. Максимальные значения вероятностей возрастают, что свидетельствует об уменьшении среднего размера частиц и повышении однородности пробы.

3 Среди рассмотренных распределений (нормальное, логнормальное, Рэлея, гамма-распределение, Вейбулла) логнормальное распределение обеспечивает наилучшую аппроксимацию экспериментальных данных, с минимальными остатками ( $Z_{max}$  и  $\sigma_Z$ ) и максимальным коэффициентом детерминации  $R^2$ . Параметры распределения ( $exp(\mu)$  и  $\sigma$ ) уменьшаются с ростом времени обработки, подтверждая сдвиг к более мелким фракциям.

4 С увеличением времени обработки проб средний размер частиц уменьшается, что свидетельствует о дезинтеграции испытуемых проб. Также с увеличением времени обработки проб значение параметров логнормального распределения уменьшаются, что может служить для оценки абразивности грунтов, поскольку параметры непосредственно связаны с показателями абразивности. Наиболее интенсивное дробление наблюдается в первую минуту, что указывает на нелинейный характер процесса взаимодействия режущего инструмента с дисперсными грунтами.

5 Полученные результаты демонстрируют достоверность моделирования взаимодействия режущего инструмента с грунтами через анализ гранулометрических изменений и вероятностных распределений. Это позволяет глубже понять механизмы абразивного износа и оптимизировать параметры инструментов для работы с дисперсными материалами.

## 5 Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по коэффициентам абразивности

Результаты качественной классификации по показателям абразивности, получаемых лабораторными методами на образцах грунта, целесообразно использовать для сравнительного прогноза поведения режущего инструмента на соответствующих образцам участках проходимого массива, где можно предварительно оценить соотношение уровней количественного износа инструмента.

Для данного анализа будут использованы уже рассмотренные ранее методы: метод вращающегося полого стержня и метод вращающейся крыльчатки, а также широко распространенный метод Cerchar-индекса абразивности (*CAI*). Их описание приведено в п. 1.3.

В России с 1960-х гг. определяется коэффициент абразивности твердых горных пород и существует классификация горных пород по шкале абразивности, разработанная в Институте горного дела (ИГД) имени А.А. Скочинского [77], применимая для оценки абразивности горных пород по методу вращающегося полого стержня. Определение абразивности осуществляется при истирании торцевой части вращающегося стального стержня о поверхность образца горной породы [78]. Потеря массы эталонного стержня в миллиграммах за время проведения опыта (10 минут с каждой стороны стержня) принимается в качестве показателя абразивности испытываемых горных пород, по диапазонам значений которого, породы разделяют на восемь классов. Указанная классификация представлена в таблице 2.3 подраздела 2.3.

Лабораторией *LCPC* (Франция) разработан метод вращающейся крыльчатки для дробленых пород [79] (п. 1.3). Основу метода составляет

потеря веса истираемой стальной крыльчатки, вращающейся в контейнере с 500 г твердой породы.

Порода раздроблена до размера куска 4...6,3 мм, то есть представляет собой сыпучий грунт, по последним данным кусок может быть размером 2...8 мм [80]. Далее приводится сравнение перечисленных методов для создания универсальной классификации для скальных и сыпучих грунтов.

Более подробно методика проведения испытаний по упомянутым методам представлена в разделе 2 данной работы.

В публикации [81] представлено сопоставление результатов испытаний большого количества горных пород с использованием методов Cerchar и *LCPC*. Соотношение соответствующих коэффициентов абразивности значимо описывается формулой линейной зависимости с коэффициентом корреляции  $R = 0,91$ :

$$LAC = 273 \times CAI, \text{ г/т} \quad (5.1)$$

Благодаря полученной формуле (5.1), существует возможность оценки абразивности горных пород одного и того же минерального состава как в скальном куске, так и в сыпучей раздробленной массе с размером куска 0...12мм. При этом разработанную американскими учеными [14] расширенную 8-разрядную классификацию Cerchar-индекса абразивности *CAI* для скальных грунтов дополняем значениями коэффициента *LAC* для сыпучих грунтов, выводя в итоге универсальную табличную классификацию абразивности, представленную в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Универсальная классификация абразивности скальных грунтов [16]

Тип скальных грунтов	Классификация	<i>CAI</i>	<i>LAC</i> , г/т
Известняк мягкий	Весьма малоабразивные	<0,5	<140
Известняк твердый	Малоабразивные	<1,2	<330
Песчаник	Ниже средней абразивности	1,2-2,5	330-680
Гранит, долерит выветрившийся	Средней абразивности	2,5-3,5	680-960
Песчаник кварцевый	Выше средней абразивности	3,5-4,0	960-1090
Гранит, сланцевый пироксен	Повышенной абразивности	4,0-4,2	1090-1150
Амфиболит	Высокоабразивные	4,2-4,5	1150-1230
Кварцит, гнейс, пегматит	Высшей степени абразивности	>4,5	>1230

На основании практического опыта и проведенных исследований внесены дополнения в соответствии с восьмиразрядной шкалой российских коэффициентов абразивности  $K_{ab}$  (правая часть таблицы 5.2), используя таблицу 2.2 подраздела 2.3.

Таблица 5.2– Сравнительная классификация горных пород по абразивности [78]

Классификации по $CAI$ (по [83] с изменениями)			Российская версия классификации по $K_{ab}$ (по [Ошибка! Закладка не определена.] с изменениями)		
Классификация/Cla ssification	$CAI$	Тип пород / Type of rock	Классификация	$K_{ab}$	Тип пород
Не абразивные / Not abrasive	<0,5	Известняки / Young Limestone	Весьма малоабразивные	< 5	Известняки
Малоабразивные / Very slightly abrasive	<1,2	Известняки / Limestone	Малоабразивные	5–10	Мягкие (глинистые, хлористые) сланцы
Ниже средней абразивности / Slightly abrasive	1,2–2,5	Песчанники нелитифицированные / Young sandstone	Ниже средней абразивности	10–18	Магматические тонкозернистые породы, песчаники
Среднеабразивные / Medium abrasive	2,5–3,5	Выветрелые гранодиориты / Weathered granite–dolerite	Средней абразивности	18–30	Песчанники мелкозернистые аркозовые
Умеренно абразивные / Moderately abrasive	3,5–4,0	Песчанники литифицированные / Sandstone	Выше средней абразивности	30–45	Песчанники крупнозернистые кварцевые
Абразивные / Abrasive	4,0–4,2	Сланцы / Schist pyroxenite	Повышенной абразивности	45–65	Сланцы кварцевые и окварцованные
Высокоабразивные / Highly abrasive	4,2–4,5	Амфиболиты / Amphibolite	Высокоабразивные	65–80	Порфириты, диориты, граниты
Чрезвычайно абразивные / Extremely abrasive	> 4,5	Кварцит–гнейс–пегматит / Quartzite–gneiss–pegmatite	Высшей степени абразивности	> 80	Корундсодержащие породы

Это позволило найти зависимость между  $K_{ab}$  и  $CAI$ :

$$K_{ab} = 0,40 \times CAI \times CAI \times CAI - 0,39 \times CAI \times CAI + 4,80 \times CAI \quad (5.2)$$

Формула (5.2) наиболее точно описывает сходство результатов  $K_{ab}$  и  $CAI$  для испытаний грунтов как меньшей, так и высшей степени абразивности (рисунок 5.1).

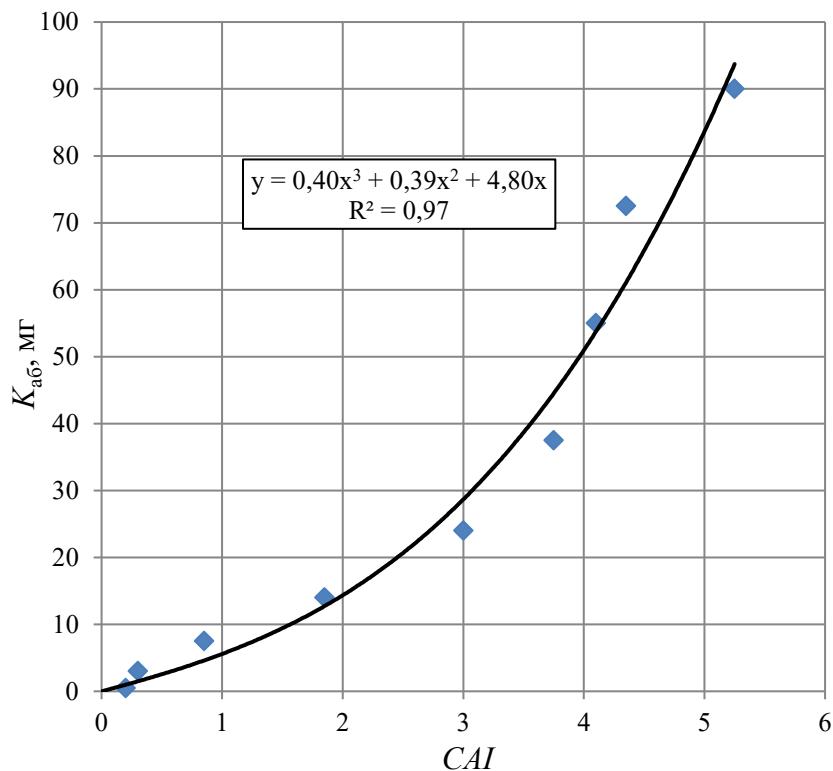


Рисунок 5.1 – Зависимость между коэффициентом абразивности  $K_{ab}$  и индексом абразивности  $CAI$

Таким образом, формулы (5.1) и (5.2) позволяют связать между собой коэффициенты абразивности  $K_{ab}$ ,  $CAI$  и  $LAC$ , определяемые соответствующими лабораторными методами, и уточнить границы 8-ми классов грунтов по абразивности (таблица 5.3). В таблицу были добавлены названия грунтов, для которых Colorado School of Mines (Горная школа Колорадо, США) и Istanbul Technical University (Стамбульский технический университет, Турция) были проведены исследования  $CAI$ , а также названия

горных пород, для которых были найдены  $K_{ab}$  автором работы совместно с другими исследователями [78].

Таблица 5.3 – Уточняемая сравнительная классификация грунтов по абразивности

Класс по $K_{ab}$	Грунт	$CAI$	$K_{ab}$ , мг	$LAC$ , г/т
Весьма малоабразивные		0,0	0,0	0
		0,1	0,5	27
		0,2	1,0	55
		0,3	1,5	82
		0,4	2,0	109
		0,5	2,5	137
		0,6	3,1	164
	Хлорит, серпентинит	0,7	3,7	191
		0,8	4,3	218
		0,9	4,9	246
Малоабразивные		1,0	5,6	273
	аргиллит	1,1	6,3	300
		1,2	7,0	328
	порфир	1,3	7,8	355
		1,4	8,6	382
		1,5	9,4	410
	гранито-гнейс, доломит	1,6	10	437
Ниже средней абразивности		1,7	11	464
		1,8	12	491
	габбро	1,9	13	519
		2,0	14	546
	базальт	2,1	15	573
		2,2	17	601
	щелочной базальт	2,3	18	628
Средней абразивности	долерит	2,4	19	655
	диабаз	2,5	21	683
		2,6	22	710
	известняк	2,7	24	737
		2,8	25	764
	амфиболит	2,9	27	792
		3,0	29	819
Выше средней абразивности		3,1	31	846
		3,2	32	874
		3,3	34	901
		3,4	37	928
	гнейс	3,5	39	956
		3,6	41	983
	диорит	3,7	43	1010

Продолжение таблицы 5.3

Класс по $K_{ab}$	Грунт	$CAI$	$K_{ab}$ , мг	$LAC$ , г/т
Повышенной абразивности		3,8	46	1037
		3,9	48	1065
		4,0	51	1092
		4,1	54	1119
	гранит	4,2	57	1147
		4,3	60	1174
		4,4	63	1201
Высокоабразивные		4,5	66	1229
		4,6	69	1256
		4,7	73	1283
		4,8	76	1310
		4,9	80	1338
	кварцит	5,0	84	1365
		5,1	88	1392
Высшей степени абразивности		5,2	92	1420
		5,3	96	1447
		5,4	100	1474
		5,5	105	1502
		5,6	109	1529
		5,7	114	1556
		5,8	119	1583
		5,9	124	1611
		6,0	129	1638

Пользуясь названиями классов абразивности по  $K_{ab}$ , были уточнены границы коэффициента абразивности  $LAC$  для каждого класса грунтов:

- 1) Весьма малоабразивные,  $LAC = 0 \dots 246$  ( $K_{ab} = 0 \dots 4,9$  мг);
- 2) Малоабразивные,  $LAC = 246 \dots 437$  ( $K_{ab} = 4,9 \dots 10$  мг);
- 3) Ниже средней абразивности,  $LAC = 437 \dots 628$  ( $K_{ab} = 10 \dots 18$  мг);
- 4) Средней абразивности,  $LAC = 628 \dots 819$  ( $K_{ab} = 18 \dots 29$  мг);
- 5) Выше средней абразивности,  $LAC = 819 \dots 1010$  ( $K_{ab} = 29 \dots 43$  мг);
- 6) Повышенной абразивности,  $LAC = 1010 \dots 1201$  ( $K_{ab} = 43 \dots 63$  мг);
- 7) Высоко абразивные,  $LAC = 1201 \dots 1392$  ( $K_{ab} = 63 \dots 88$  мг);
- 8) Высшей степени абразивности,  $LAC = 1392 \dots 1638$  ( $K_{ab} = 88 \dots 129$  мг).

На основании проведенных испытаний были определены коэффициенты абразивности для некоторых скальных и дисперсных образцов грунтов. Результаты испытаний были сведены в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты испытаний по определению коэффициентов абразивности для некоторых скальных и дисперсных образцов грунтов

Тип грунта	Дополнительные показатели грунта	Коэффициент абразивности $K_{ab}$ , мг	Коэффициент абразивности $LAC$ , г/т
Пески мелкие / средние	$d_{cp} = 0,25$ мм	-	50
Пески средние / крупные	$d_{cp} = 0,5$ мм	-	107
Пески крупные / грубые	$d_{cp} = 1,0$ мм	-	231
Гравий мелкий / песок грубый	$d_{cp} = 2,0$ мм	-	392
Гравий мелкий / крупный	$d_{cp} = 5$ мм	-	890
Известняк	$R=16$ МПа	1,1	20
Доломит	$R=74$ МПа	2,1	47

## 5.1 Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по скорости износа режущего инструмента ТПМК

Методика горнодобывающей и тоннелестроительной промышленности определяет скорость износа (Wear Rates ( $WR$ )) скоростью потери металла из инструмента, то есть количеством замен инструмента при разработке единицы объема породы. Величина, обратная скорости износа, – это буровой ресурс инструмента, выраженный в разработанных тысячах  $\text{м}^3$  породы на одно эталонное изделие [14]. Классификация скорости износа и её обратной

величины – ресурса режущего инструмента состоит из 6 классов и приведена в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Классификация скорости износа и ресурса режущего инструмента

Оценка скорости износа инструмента		Оценка ресурса инструмента	
количественно: шт. / тыс. м <sup>3</sup>	качественно:	количественно: тыс. м <sup>3</sup> породы / шт.	качественно:
< 0,5	очень низкая	> 2,0	очень высокий
0,5...0,7	низкая	1,5...2,0	высокий
0,7...1,0	средняя	1,0...1,5	средний
1,0...2,0	высокая	0,5...1,0	низкий
2,0...5,0	очень высокая	0,2...0,5	очень низкий
> 5,0	экстремально высокая	< 0,2	экстремально низкий

Так как классы с очень высокой и высокой скоростью износа имеют довольно широкие диапазоны, каждый из этих двух классов разделяется на два подкласса, чтобы получить такую же 8-разрядную классификацию для скорости износа дисков шарошек (Disk Wear Rates (*DWR*)), как и для абразивности грунтов (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Классификация скорости износа дисков *DWR* и коэффициентов абразивности  $K_{ab}$  и *LAC*

Оценка скорости износа инструмента		Оценка коэффициента абразивности $K_{ab}$ и <i>LAC</i>		
Количественно: <i>DWR</i> , шт. / тыс. м <sup>3</sup>	Качественно:	Количественно: $K_{ab}$ , мг		Качественно: <i>LAC</i> , г/т
< 0,5	очень низкая	0...4,9	0...246	весьма малоабразивные
0,5...0,7	низкая	4,9...10	246...437	малоабразивные
0,7...1,0	ниже средней	10...18	437...628	ниже средней абразивности
1,0...1,5	средняя	18...29	628...819	средней абразивности
1,5...2,0	выше средней	29...43	819...1010	выше средней абразивности
2,0...3,5 (гнейс до 3,9)	высокая	43...63	1010...1201	повышенной абразивности
3,5...5,0 (кварцит 4,6)	очень высокая	63...88	1201...1392	высоко абразивные
5,0...6,0	экстремально высокая	88...129	1392...1638	высшей степени абразивности

С учетом того, что вращающийся режущий диск чаще всего испытывает равномерный абразивный износ и его внедрение в забой идет с опережением и на более значительную глубину – до 35 мм глубже относительно других режущих инструментов. Поэтому в качестве эталонного изделия для определения скорости износа режущего инструмента ТПМК принимается режущий диск однодисковой или двухдисковой шарошки. Для такого диска далее определяется скорость его износа (замен) (Disk Wear Rates (*DWR*)), вычисляя количество его замен на 1 тыс. м<sup>3</sup> разработанного грунта.

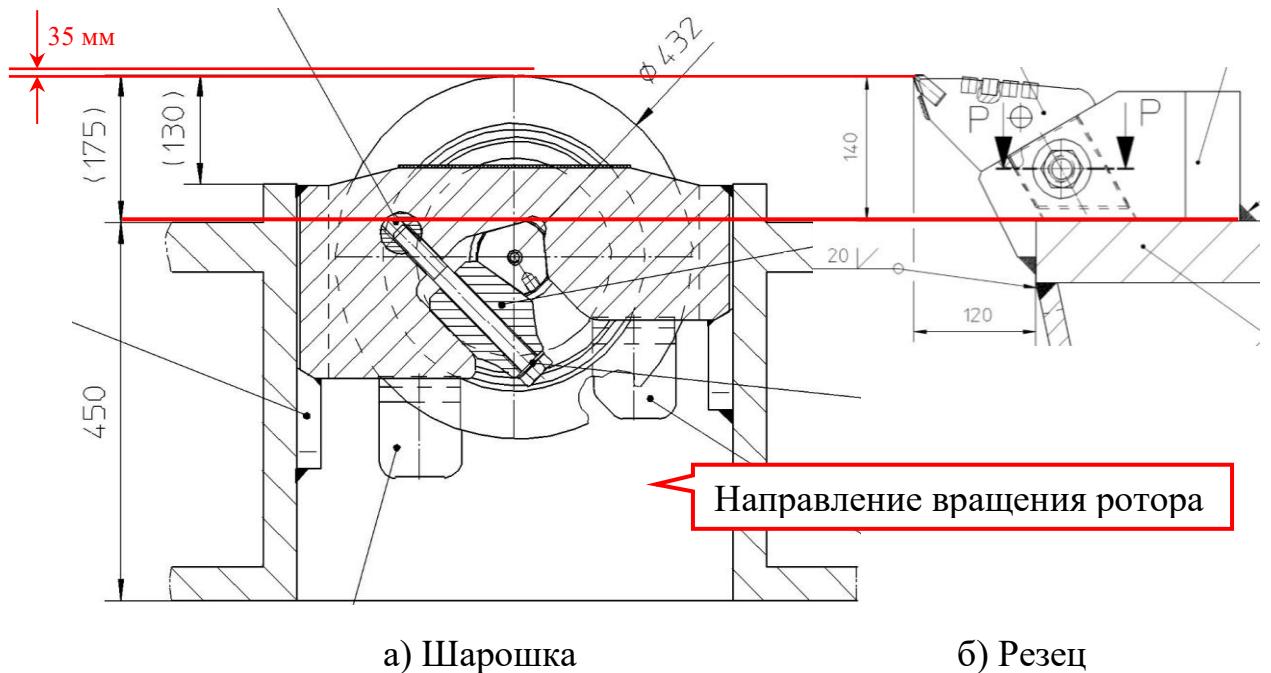


Рисунок 5.2 – Глубины внедрения режущего диска шарошки и резца в забой

Стандартными шарошками (с эталонным изделием – режущим диском), для которых статистически можно выявлять закономерности, были выбраны шарошки с режущими дисками диаметром  $D = 17$  дюймов и усредненной твердостью по Роквеллу  $HRC = 55$  на режущей поверхности диска. Диски с такими показателями наиболее часто используются для широкого диапазона диаметров ТПМК при строительстве транспортных тоннелей.

На участках проходки проектов ТПМК при строительстве объектов метрополитенов г. Москва и г. Санкт-Петербург было определено количество

изношенных шарошек, замененных после разработки вычисленного объема грунта в интервале тоннельной проходки между остановками ТПМК.

По геологическому разрезу вдоль трассы тоннеля через интервал 100 м была определена доля объемного содержания каждого геологического слоя в круглом сечении тоннеля.

Найденные объемные доли содержания разных грунтов усреднялись в рамках пройденного участка, и эти показатели были использованы как факторы влияния на скорость износа шарошек. Таким образом, скорость износа шарошек характеризуется как отношение числа замен режущего инструмента к объему разработанного грунта.

## **5.2 Итоговые скорости износа дисков шарошек ТПМК**

Таким образом, рассмотрев данные по заменам режущего инструмента [82, 83, 84] был проведен статистический анализ замен режущего инструмента, в частности дисковых шарошек и соответствующих им режущих дисков, на 25 интервалах проходки 7-ми ТПМК в различных грунтах: дисперсных - песках и глинах с суглинками, и скальных - известняках и мергелях, с нахождением объемов их разработки [85].

По итогам анализа скорости износа дисков на 25 интервалах проходки для 7-ми различных ТПМК, работавших на строительстве тоннелей метро в Москве и Санкт-Петербурге, составлена таблица 5.7, в состав которой входят: номер проекта ТПМК, наименование перегона, диаметр, пикеты и объем проходки, количество замен дисков и скорость износа (замен) DWR (шт. / тыс. м<sup>3</sup>), объемное содержание различных типов грунтов проходки.

Таблица 5.7 – Итоговые скорости износа (замен) дисков шарошек *DWR*

№ п/п	№ проекта	Наименование перегона (СПБ – Санкт-Петербург, М – Москва)	Проходка			Кол-во замен дисков	Скорость износа (замен), <i>DWR</i> шт./тыс.м <sup>3</sup>	Объемное содержание грунтов, %					
			Диаметр, м	Пикеты ПК	Объем, тыс.м <sup>3</sup>			Песок крупный	Песок мелкий	Суглинок	Глина	Мергель	Известняк
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	СПБ: Проспект Славы - Южная	10,6	243-250	63,5	38	0,60	58	0	32	10	0	0
2	2	М: Можайская – Давыдково	10,6	303-288	121,6	50	0,41	0	98	0	2	0	0
3	3	М: Текстильщики - Печатники	10,7	113-99	125,1	50	0,40	0	72	8	20	0	0
4	4	М: этап 11.3 КЖЛ	10,7	128-109	186,3	62	0,33	0	63	33	6	0	0
5	5	М: этап 11.4 КЖЛ	10,7	107-92	140,6	50	0,36	0	61	20	19	0	0
6	6	М: этап 11.2 КЖЛ	10,9	82-93	111,9	28	0,25	0	49	51	0	0	0
7	7	М: Озерная площадь – Мичуринский проспект (ЛПТ)	6,28	225-212	33,2	18	0,54	0	48	52	0	0	0
8	8	М: Озерная площадь – Мичуринский проспект (ЛПТ)	6,28	225-213	33,3	26	0,78	48	0	52	0	0	0
9	9	М: Нижние Мнёвники – Народное Ополчение	6,34	353-364	33	18	0,55	0	9	0	56	0	35
10	10	М, СВУ-2: пл.5.2 – пл.18 (ЛПТ)	6,28	203-207	24,5	8	0,33	6	0	0	44	25	25

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
11	S-755	M, СВУ-2: пл.5.2 – пл.18 (ЛПТ)	6,28	207-211	29,6	18	0,61	0	0	0	0	65	35
12	S-770	M, СВУ-2: пл.5.2 – пл.18 (ППТ)	6,28	203-207	23,6	11	0,47	8	0	0	52	15	25
13	S-770	M, СВУ-2: пл.5.2 – пл.18 (ППТ)	6,28	207-212	32,7	14	0,43	0	0	0	13	62	25
14	S-770	M, СВУ-2: пл.18 – Сокольники (ППТ)	6,28	213-219	32	34	1,06	0	0	0	0	21	79
15	S-770	M, СВУ-2: пл.18 – Сокольники (ППТ)	6,28	219-226	37,8	18	0,48	0	0	0	21	38	41
16	S-755	M, СВУ-2: пл.18 – Сокольники (ППТ)	6,28	213-221	27,7	28	1,01	0	0	0	21	24	56
17	S-755	M, СВУ-2: пл.18 – Сокольники (ППТ)	6,28	218-223	15,2	10	0,66	0	0	0	38	20	42
18	S-770	M, СВУ-2: Сокольники – пл.17 (ППТ)	6,28	237-251	38,9	40	1,03	0	0	0	4	79	17
19	S-755	M, СВУ-2: Сокольники – пл.17 (ЛПТ)	6,28	219-243	41,4	24	0,58	0	0	0	70	15	15
20	S-771	M, СВУ-2: пл.17 – Марьина Роща	6,28	273-276	7,5	8	1,07	0	0	0	23	2	75
21	S-755	M, СВУ-2: Сокольники – пл.17 (ЛПТ)	6,28	243-251	18,9	14	0,74	0	0	0	0	93	7

Продолжение таблицы 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
22	S-771	М, СВУ-2: пл.17- Марьина Роща	6,28	251-256	15,8	8	0,51	0	0	0	0	84	16
23	S-771	М, СВУ-2: пл.17- Марьина Роща	6,28	256-262	15	6	0,40	0	0	0	0	91	9
24	S-771	М, СВУ-2: пл.17- Марьина Роща	6,28	262-273	21,5	18	0,84	0	0	0	0	82	18
25	S-771	М, СВУ-2: пл.17- Марьина Роща	6,28	276-280	14,3	8	0,56	0	0	0	0	44	56

Из данных таблицы 5.7 строим графики, где в качестве аргумента выбираем объемное содержание грунтов, а в качестве функции - скорость износа (замен)  $DWR$ .

На рисунках 5.3 и 5.4 приведены графики зависимостей скорости износа дисков  $DWR$  от объемного содержания песка/гравия в суглинках.

Линейный тренд зависимостей показывает, что для 100% содержания грубых песчаных частиц и мелкого гравия в разрабатываемом грунте скорость износа дисков  $DWR$  достигает 1,1 шт./тыс.  $m^3$ , для грубого/крупного песка – 0,89 шт./тыс.  $m^3$ , для мелкого/среднего размера песка – 0,34 шт./тыс.  $m^3$ . Скорость износа  $DWR$  в суглинках (при 0% содержания песка) находится в пределах 0,43...0,49 шт./тыс.  $m^3$ , а в среднем – 0,46 шт./тыс.  $m^3$ .

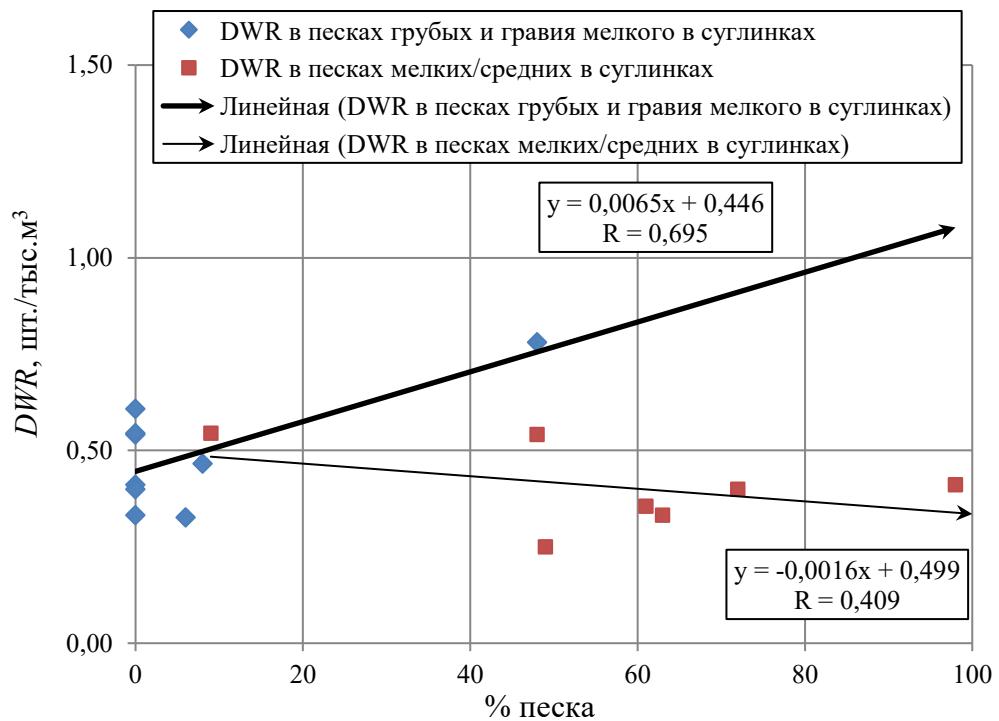


Рисунок 5.3 – Скорости износа дисков  $DWR$  от объемного содержания песков/гравия в суглинках

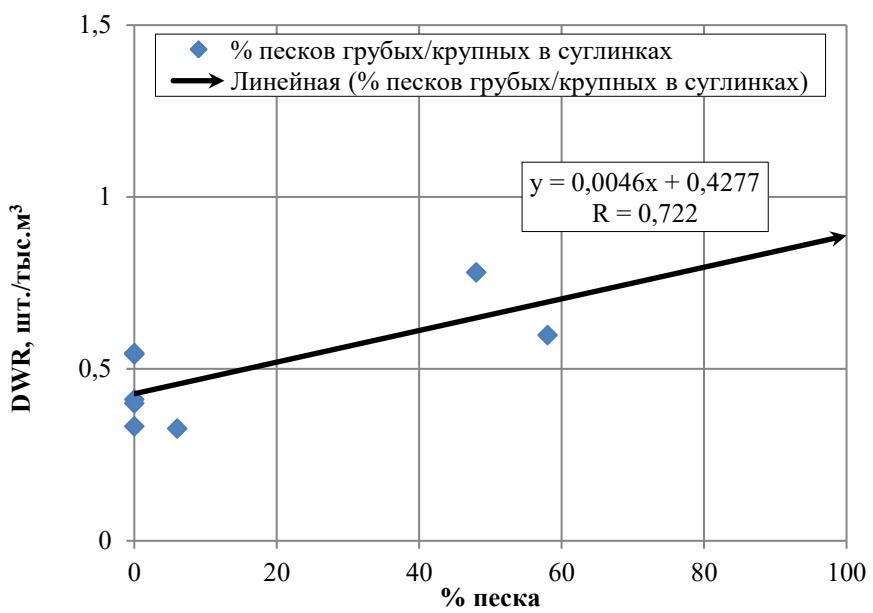


Рисунок 5.4 – Скорости износа дисков  $DWR$  от объемного содержания песков грубых/крупных в суглинках

На рисунке 5.5 приведен график зависимостей скорости износа дисков  $DWR$  от объемного содержания известняка в глинах и мергелях. Для 100% содержания известняка в разрабатываемом грунте скорость износа дисков достигает 1,06 шт./тыс.  $m^3$ .

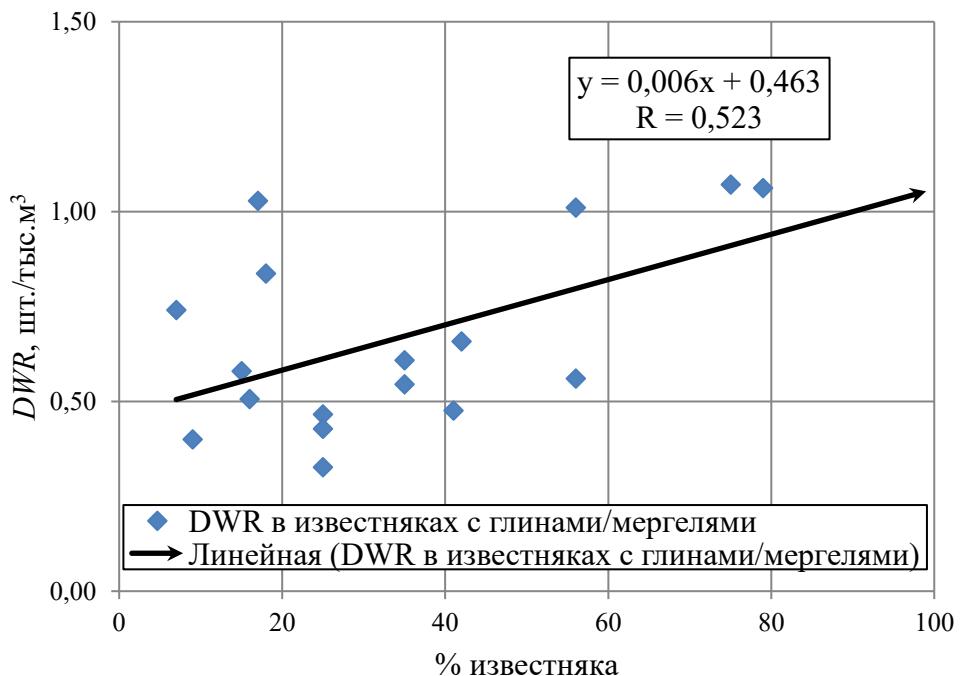


Рисунок 5.5 – Скорость износа дисков от объемного содержания известняка в глинах и мергелях

Зависимости скорости износа дисков от объемного содержания мергеля с включениями известняка и глины показывает отсутствие линейной связи, при этом скорость износа  $DWR$  находится на уровне 0,62 шт. / тыс.  $m^3$  при содержании мергеля от 0 до 100%.

Наконец, на рисунке 5.6 график линейной зависимости скорости износа дисков  $DWR$  от объемного содержания глины с включениями известняка и мергеля показывает, что при 100% содержании глины скорость износа дисков минимальна относительно других грунтов и составляет 0,27 шт./тыс.  $m^3$ .

Таким образом, скорости износа дисков, интерполируемые для каждого типа грунта, сведены в таблицу 5.8, и дана их квалификационная оценка по абразивности из таблицы 5.6.

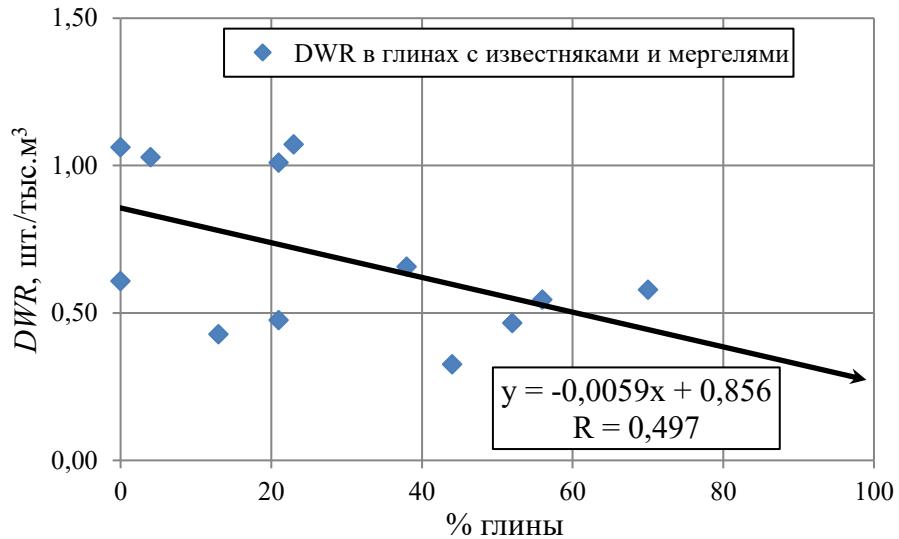


Рисунок 5.6 – Скорость износа дисков от объемного содержания глины в мергелях и известняках

Таблица 5.8 – Интерполируемые скорости износа дисков в грунтах и измеренные коэффициенты абразивности *LAC*

№	Тип грунта (средний размер зерна)	Скорость износа дисков <i>DWR</i> , шт./тыс.м³	Оценка скорости износа <i>DWR</i>	Коэффициент абразивности <i>LAC</i> , г/т
1	Глины	0,27	Очень низкая	47**
2	Пески мелкие/средние ( $d_{cp}=0,25$ мм)	0,34	Очень низкая	50 (60)
3	Суглинок	0,46	Очень низкая	107**
4	Пески средние / крупные ( $d_{cp}=0,5$ мм)	0,46**	Очень низкая	107 (80)
5	Известняк доломитовый ( $K_{ab}=1,6$ мг)	0,78-1,06	Очень низкая	20-47 (80-120)
6	Пески крупные / грубые ( $d_{cp}=1,0$ мм)	0,89	Ниже средней	231 (120)
7	Гравий мелкий / песок грубый ( $d_{cp} = 2,0$ мм)	1,1	Средняя	392 (200)
8	Гравий мелкий / крупный ( $d_{cp} = 5$ мм)	2,95**	Средняя	890 (500)
9	Гнейсы	3,9	Высокая	1147*
10	Гнейсы	4,0	Высокая	1092*
11	Кварциты	4,6	Очень высокая	1365*

\* - по данным литературы; \*\* - по данным интерполирования; ( ) – значения по [81] (рисунок 5.7).

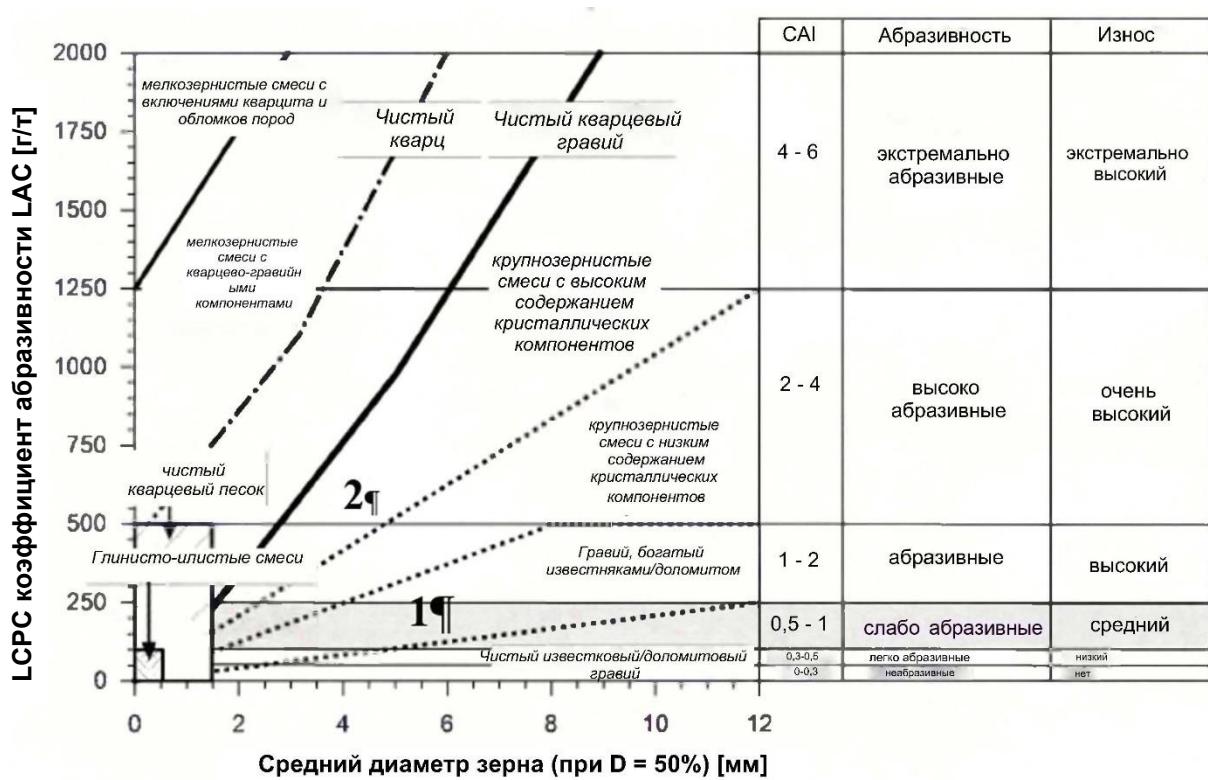


Рисунок 5.7 – Зависимости коэффициентов абразивности  $LAC$  и  $CAI$  от среднего размера зерна известняка (1) и песка/гальки (2) [81]

Исходя из данных таблицы 5.8, строится график зависимости скорости износа дисков  $DWR$ , шт./тыс. м<sup>3</sup> от коэффициента абразивности  $LAC$ , кг/т, дающий возможность прогнозирования скорости износа дисков от лабораторного показателя абразивности  $LAC$  (рисунок 5.8).

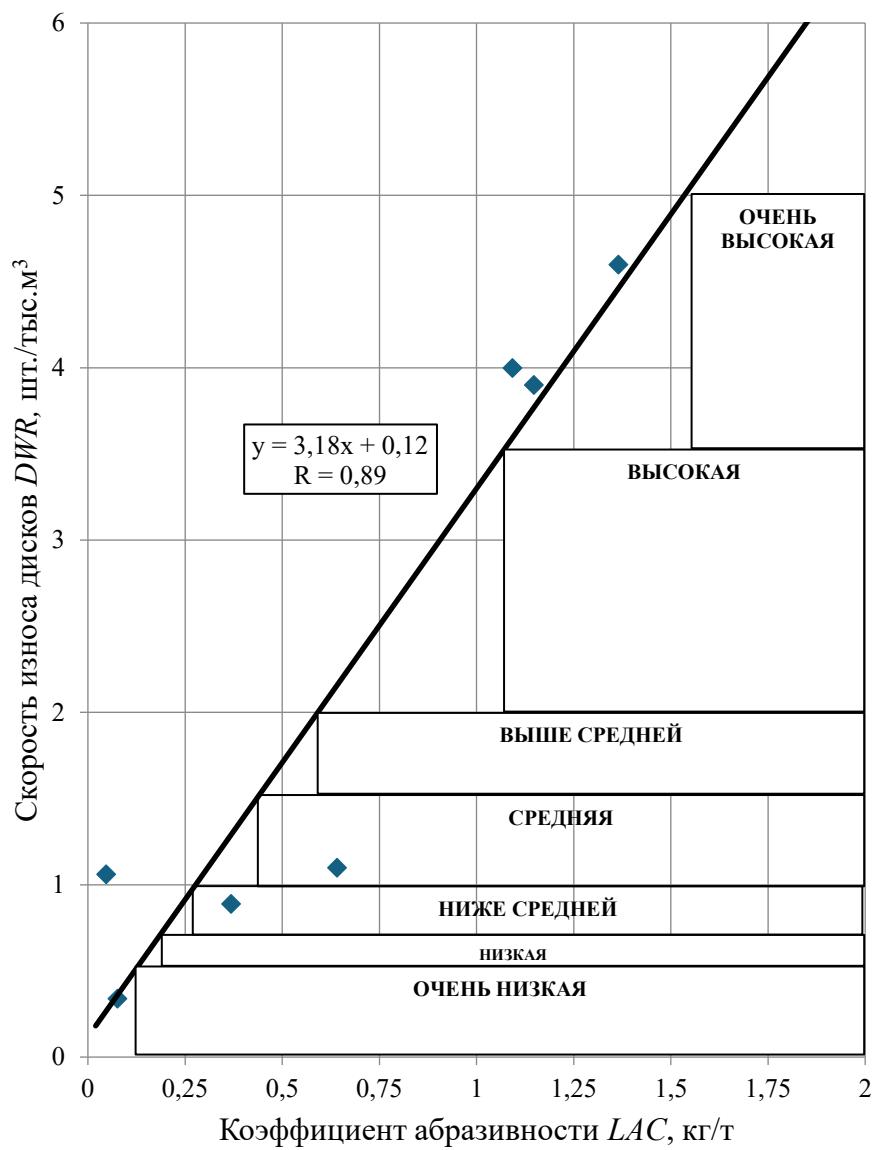


Рисунок 5.8 – Прогнозная зависимость скорости износа дисков шарошек  $DWR$  от показателя абразивности  $LAC$

Таким образом подтверждается обоснованность и достоверность **третьего научного положения**.

## **Выводы**

1 Проведен статистический анализ замен режущего инструмента, в частности дисковых шарошек и соответствующих им режущих дисков, в различных грунтах: дисперсных – песках и глинах с суглинками, и скальных – известняках и мергелях, с нахождением объемов их разработки.

2 Для каждого типа грунта дана их квалификационная оценка по абразивности для расчета скорости износа дисков на практике.

3 Установлены зависимости коэффициентов абразивности  $LAC$  и  $CAI$  от среднего размера зерна известняка и песка/гальки, позволяющие прогнозировать скорости износа дисков в зависимости от показателя абразивности  $LAC$ , определяемого в лабораторных условиях.

4 На основании проведенных исследований разработаны «Методические рекомендации по оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке», переданные в АО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс» для практического использования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи разработки метода оценки абразивных свойств скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке, что имеет важное значение для развития отечественного тоннелестроения и повышения его эффективности.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем.

1. Было установлено, что преобладающим типом грунта при проходке тоннелей с помощью ТПМК для исследованных участков является дисперсный грунт.

2. Была разработана экспериментальная лабораторная установка на базе сверлильного станка для оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов по методам Л. И. Барона – А. В. Кузнецова (метод вращающегося полого стержня) и *LCPC* (метод вращающейся крыльчатки).

3. Установлено влияние пределов прочности при сжатии и растяжении, а также размеров кусков на абразивность скальных грунтов. Кроме того, установлено влияние размеров зерен и содержание кварца дисперсных грунтов на абразивность. Увеличение численных значений указанных свойств соответствует увеличению коэффициентов абразивности, как по методу вращающегося эталона полого стержня, так и по методу вращающейся крыльчатки, имеющих взаимосвязь между собой.

4. Представлены взаимосвязи показателей абразивности грунтов, определяемых по методу вращающегося эталона полого стержня для скальных грунтов с показателем абразивности *LAC*, определяемым по методу

вращающейся крыльчатки, что позволяет оценивать абразивность дисперсных грунтов, наиболее часто встречающихся при проходке тоннелей с помощью ТПМК.

5. Испытания в разработанной установке способствуют уменьшению количества крупных зерен, что обусловлено дроблением частиц при взаимодействии с вращающейся крыльчаткой. При увеличении времени дробления происходит смещение массы материала из более крупных фракций в более мелкие.

6. Распределение размеров частиц при дроблении скальных и дисперсных грунтов удовлетворительно описывается логнормальным распределением, значения параметров которого, непосредственно связанные с показателями абразивности, определяемыми методом вращающейся крыльчатки, уменьшаются с увеличением времени обработки пробы в лабораторной установке.

7. Была разработана лабораторно-полевая классификация грунтов по коэффициентам абразивности и по скорости износа режущего инструмента ТПМК. Абразивные свойства грунтов каждого типа классифицируются по найденным соотношениям фактической скорости износа дисковых шарошек щита ТПМК и лабораторных показателей абразивности по методу вращающейся крыльчатки, что позволяет прогнозировать износ режущего инструмента при щитовой проходке.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.А. Козловский; Ред. кол.: М.И. Агошков, Н.К. Байбаков, А.С. Болдырев и др. – М.: Сов. Энциклопедия. Т. 1. Алава – Геосистема. 1984. 560 с.
- 2 ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.– М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992.– 21 с.
- 3 ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.– М.: Стандартинформ, 2016.– 28 с.
- 4 ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.– М.: Стандартинформ, 2020.– 41 с.
- 5 Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А. О необходимости введения государственного стандарта для определения абразивности горных пород // Уголь.– 2018.– №11.– С. 86–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-11-86-91>.
- 6 Аверин А.Е. Абразивность горных пород как необходимый параметр в оценке рисков применения горнoproходческих машин // Горный информационно-аналитический бюллетень.– 2019.– №3.– С. 184–191.
- 7 Zhang G., Konietzky H. Cerchar Abrasion Ratio (CAR) as a New Indicator for Assessing Rock Abrasivity, Rock–Stylus Interaction and Cutting Efficiency // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. № 7 (53). С. 3363–3371.
- 8 Пашкин Е. М. Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии / Е. М. Пашкин, А. А. Каган, Н. Ф. Кривоногова. М.: РГГРУ, 2011.
- 9 Меркин В.Е. Подземные сооружения транспортного назначения / В.Е. Меркин, М.Г. Зерцалов, Е.Н. Петрова.– М.: Вологда: Инфра-Инженерия.– 2020.– 432с.

- 10 Amoun S., Sharifzadeh M., Shahriar K., Rostami J. Soil abrasiveness for EPB-TBM along Tehran metro tunnel line 7, Iran «SEE Tunnel: Promoting Tunneling in SEE Region» ITA WTC 2015 Congress, Dubrovnik, Croatia.
- 11 Меркин В.Е. Руководство по проектированию и строительству тоннелей щитовым методом (Перевод с англ. В.Е. Меркина, В.П. Самойлова).— М.: Метро и тоннели.— 2009.— 448 с.
- 12 Мазеин С.В., Песков С.М. Опыт внедрения системы контроля режущего инструмента ротора на ТПМК «Херренкнехт» // Горный информационно-аналитический бюллетень.— 2005.— № 9.— С. 58-63.
- 13 Zhuo X.J., Lu Y.T, Ye L., Sun H. Shield machine cutterhead tools real-time wear monitoring system // Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art – Peila, Viggiani & Celestino (Eds) Taylor & Francis Group, London, 2019, 10 p.
- 14 Prieto, L.A. The Cerchar Abrasivity Index's Applicability to Dredging Rock // Proceeding of the Western Dredging Association (WEDA XXXII) Technical Conference and Texas A&M University (TAMU 43) Dredging Seminar, San-Antonio, Texas, June 10-13.
- 15 Frostad H.I., Bruland A., Jakobsen P.D. Macias F.J. 2019 Back-calculation model for instantaneous TBM cutter wear // Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art – Peila, Viggiani & Celestino (Eds) 2019 Taylor & Francis Group, London, 2019, 10 p.
- 16 Мазеин С.В., Вознесенский А.С., Прищепов В.В. Прогноз абразивности грунтов при первичном износе режущего инструмента для строительства тоннелей большого сечения // Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения: сборник статей ОАО «Ленметрогипротранс» / под ред. М.О. Лебедева. – М.: Издательство «Перо», 2021. – с. 177-183.

- 17 Zahiri Galeshi M., Goshtasbi K., Hamidi J.K., Ahangari K. A Numerical Investigation of TBM Disc Cutter Life Prediction in Hard Rocks // Journal of Mining and Environment. 11 (2020) 1095–1113.  
<https://doi.org/10.22044/JME.2020.9933.1922>.
- 18 Duan W., Zhang M., Gou B., Mo J., Zhou Z. Influence of Cross-Section Profile on Wear Behavior of TBM Cutters in Hard Rock Stratum // Mocaxue Xuebao/Tribology. 43 (2023) 738–749.  
<https://doi.org/10.16078/J.TRIBOLOGY.2022102>.
- 19 Hashemnejad A., Hassanpour J. Proposed soil classification based on the experiences of soft-ground tunneling in Iran // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. № 2 (76). C. 731–750.
- 20 Jakobsen P. D., Bruland A., Dahl F. Review and assessment of the NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT<sup>TM</sup>) for determination of abrasiveness of soil and soft ground // Tunnelling and Underground Space Technology. 2013. (37). C. 107–114.
- 21 Zhabin A. B. [и др.]. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment // Journal of Mining Institute. 2019. (240). C. 621–627.
- 22 Койфман М. И. Абразивные свойства минеральных частиц. М: тип. им. К. Маркса, 1932 (Калинин). – 64 с.
- 23 Барон Л.И., Кузнецов А.В. Абразивность горных пород при добывании. М.: Издательство АН СССР, 1961. 167 с.
- 24 Методические указания к лабораторным работам по курсу «Физика горных пород» / Винников В. А., Давиденко Б. Ю., Каркашадзе Г. Г. // Под ред. Янченко Г. А. М.:МГИ, 1990, 119 с.
- 25 Li Q., Li J., Duan L., Tan S. Prediction of rock abrasivity and hardness from mineral composition // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 140. P. 104658.

- 26 AFNOR Determination du pouvoir abrasif d'une roche – Partie 1: Essai de rayure avec une pointe (NF P 94-430-1) – 2000.
- 27 ASTM D7625-22. Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Abrasiveness Index Method.
- 28 ASTM Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. Designation: D7625-10 – 2010.
- 29 Alber M., Yarali O., Dahl F., Bruland A., Kaesling H., Michalakopoulos T., Cardu M., Hagan P., Aydin H., Ozarslan A. ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test // Rock Mechanics and Rock Engineering.– 47, 2014.– Pp 261–266. DOI: 10.1007/s00603-013-0518-0.
- 30 Käsling H., Thuro K. Determining rock abrasivity in the laboratory // Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering - Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010. 2010. C. 425–428.
- 31 Teymen A. The usability of Cerchar abrasivity index for the estimation of mechanical rock properties // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 128.
- 32 Zhang G. et al. Study of Cerchar abrasive parameters and their relations to intrinsic properties of rocks for construction // Constr. Build. Mater. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 244.
- 33 Hamzaban M.T., Karami B., Rostami J. Effect of pin speed on CERCHAR abrasion test results // Journal of Testing and Evaluation. 47 (2018) 121–139. <https://doi.org/10.1520/JTE20170406>.
- 34 P18-579. Décembre 1990. Granulats - Essai d'abrasivité et de broyabilité. (Norme Annulée). 6 p.
- 35 P18-579. Granulats - Détermination des coefficients d'abrasivité et de broyabilité. Février 2013. Norme en vigueur.

- 36 Standard NF P18-579:2013-02-09. Aggregate - Abrasiveness and grindability tests (German title Gesteinskörnungen - Bestimmung der Koeffizienten der Abrasivität und Mahlbarkeit). Publication date 2013-02-09. Original language French.– 12 P.
- 37 Nilsen, B., Dahl, F., Raleigh, P., Holzhäuser, J., 2006a. Abrasivity of soils in TBM tunneling. *Tunnels & Tunnelling International*, 36–38 (March).
- 38 Nilsen, B., Dahl, F., Raleigh, P., Holzhäuser, J., 2006b. Abrasivity testing for rock and soils. *Tunnels & Tunneling International*, 47–49 (April).
- 39 Nilsen, B., Dahl, F., Raleigh, P., Holzhäuser, J., 2006c. SAT: NTNU's new soil abrasion test. *Tunnels & Tunneling International*, 43–45 (May).
- 40 Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P., 2007. The new test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunnelling. In: *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, pp. 104–116.
- 41 Moradizadeh M., Cheshomi A. Results of Cerchar, LCPC, and equivalent quartz content from rolling indentation abrasion testing in plutonic rock // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. № 8 (80). С. 5979–6002.
- 42 Архипов А.Г. Разработка метода ускоренных испытаний алмазного породоразрушающего инструмента на основе спектрального анализа акустического поля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1993.
- 43 Архипов А.Г. Механизм разрушения горных пород при алмазном бурении и его акустико-спектральная диагностика // Методика и техника разведки.– СПб: ВИТР., 2000.– № 11–12.– С. 149–150.
- 44 Архипов А.Г. Классификация горных пород по формациям и типаж породоразрушающего инструмента: Методические рекомендации / А. Г. Архипов, Г. А. Блинов, П. Н. Курочкин. СПб: ВИТР, 1999.

- 45 Khoshouei M., Bagherpour R., Sadeghisorkhani H., Jalalian M.H. A New Look at Hard Rock Abrasivity Evaluation Using Acoustic Emission Technique (AET) // Rock Mechanics and Rock Engineering. (2022). <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02787-x>.
- 46 Vardhan H., Murthy C.S.N. An experimental investigation of jack hammer drill noise with special emphasis on drilling in rocks of different compressive strengths // Noise Control Engineering Journal. 55 (2007) 282–293. <https://doi.org/10.3397/1.2737667>.
- 47 Figarska-Warchał, B.; Rembi's, M. Lamination and Its Impact on the Physical and Mechanical Properties of the Permian and Triassic Terrestrial Sandstones. Resources 2021, 10, 42. <https://doi.org/10.3390/resources10050042>
- 48 Suana, M.; Peters, T. The Cerchar Abrasivity Index and its relation to rock mineralogy and petrography. Rock Mech. 1982, 15, 1–7.
- 49 Yaralı, O.; Ya,sar, E.; Bacak, G.; Ranjith, P.G. A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks. Int. J. Coal Geol. 2008, 74, 53–66.
- 50 Moradizadeh, M.; Cheshomi, A.; Ghafoori, M.; TrighAzali, S. Correlation of equivalent quartz content, Slake durability index and Is50 with Cerchar abrasiveness index for different types of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2016, 86, 42–47.
- 51 Tang S.H., Xiao-Ping Zhang, Quan-Sheng Liu, Wei-Qiang Xie, Hao-Jie Wang, Xin-Fang Li, Xin-Yue Zhang. New soil abrasion testing method for evaluating the influence of geological parameters of abrasive sandy ground on scraper wear in TBM tunneling // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 128.
- 52 Sirdesai N. N., Aravind A., Singh A. Correlation of abrasivity and physico-mechanical properties of rocks: an experimental, statistical and soft-computing analysis International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019.C. 151–156.

- 53 Gharahbagh E. A., Qiu T., Rostami J. Effect of Water Content on the Abrasivity of Granular Soils in Soft Ground Tunneling Applications 2014. № February. C. 485–494.
- 54 Sebastiani D. [и др.]. Experimental Study of Coarse Soil Properties Influencing Soil Abrasivity Elsevier Ltd, 2016. C. 9–14.
- 55 Hashemnejad A., Hassanpour J. Proposed soil classification based on the experiences of soft-ground tunneling in Iran // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. № 2 (76). C. 731–750.
- 56 Barzegari G., Shayan F., Chakeri H. Investigations on Geotechnical Aspects for TBM Specification on the Tabriz Metro Line 3, Iran // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. № 6 (36). C. 3639–3663.
- 57 Zhang G. [и др.]. In-situ investigation of drilling performance and bit wear on an electrical drill hammer // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. (122).
- 58 O'Connor E. [и др.]. Assessing the abrasivity characteristics of the central Dublin fluvio-glacial gravels – A laboratory study // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. (96).
- 59 Jin D. [и др.]. Probabilistic analysis of the disc cutter failure during TBM tunneling in hard rock // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. № March 2020 (109).
- 60 Cheshomi A., Moradizadeh M. The relationship between strength and abrasion characterizations in granite building stones // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2021. № 4 (54).
- 61 Majeed Y., Abu Bakar M. Z. Effects of variation in the particle size of the rock abrasion powder and standard rotational speed on the NTNU/SINTEF abrasion value steel test // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2019. № 3 (78). C. 1537–1554.

- 62 Majeed Y., Abu Bakar M. Z. A study to correlate LCPC rock abrasivity test results with petrographic and geomechanical rock properties // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2018. № 3 (51). C. 365–378.
- 63 Abu Bakar M.Z. et al. Wear mechanisms of LCPC rock abrasivity test impellers of materials equivalent to TBM cutter head face tools // Tunn. Undergr. Sp. Technol. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 116.
- 64 Ansari M., Hosseini M., Taleb Beydokhti A.R. A Correlation for Estimating LCPC Abrasivity Coefficient using Rock Properties // J. Min. Environ. Shahrood University of Technology, 2020. Vol. 11, № 3. P. 799–808.
- 65 Прищепов В. В. Разработка метода оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 11 (специальный выпуск 21). — С. 3–26. DOI:10.25018/0236\_1493\_2025\_11\_21\_3.
- 66 Русаков А.А. Рентгенография металлов: Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
- 67 Определение параметров элементарной ячейки кристаллов: Описание лабораторной работы по курсу «Рентгено-структурный анализ» / Сост.: Т.В. Панова, В.И. Блинов. – Омск: Омск. гос. ун-т, 2004. – 12 с.
- 68 Барон Л. И., Кузнецов А. В. Абразивность горных пород при добывании. — М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- 69 Танайно А. С. К проблеме тестирования горных пород на абразивность // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. — 2014. — № 6. — С. 87—95.
- 70 Аверин Е. А. Абразивность горных пород как необходимый параметр в оценке рисков применения горнoproходческих машин // Горный

информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 3. – С. 184–191.  
DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-184-191.

- 71 ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015, 22 с.
- 72 ГОСТ 8736–2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019, 21 с.
- 73 ГОСТ Р ИСО 3534-2019. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2005, 70 с.
- 74 ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534-1-93). Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2005, 46 с.
- 75 Вознесенский А.С., Мазеин С.В., Прищепов В.В., Куткин Я.О. Оценка абразивности дисперсных геоматериалов по параметрам акустической эмиссии при дезинтеграции // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 2024.– №3.– С. 47–57.  
DOI: 10.15372/FTPRPI20240305
- 76 Мазеин С. В., Прищепов В. В., Вознесенский А. С., Куткин Я. О. Взаимосвязь показателей абразивности скальных грунтов тоннельной проходки по методам врачающихся эталонов полого стержня и крыльчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11–1. – С. 116–128. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_111\_0\_116.
- 77 Барон Л.И., Глатман Л.Б., Губенков Е.К. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Том 1. Научно-методические основы. Разрушение резцовым инструментом. – М.: Наука, 1968. – 216 с.
- 78 Мазеин С.В., Вознесенский А.С., Прищепов В.В. Методы определения абразивности твердых горных пород при механизированной проходке

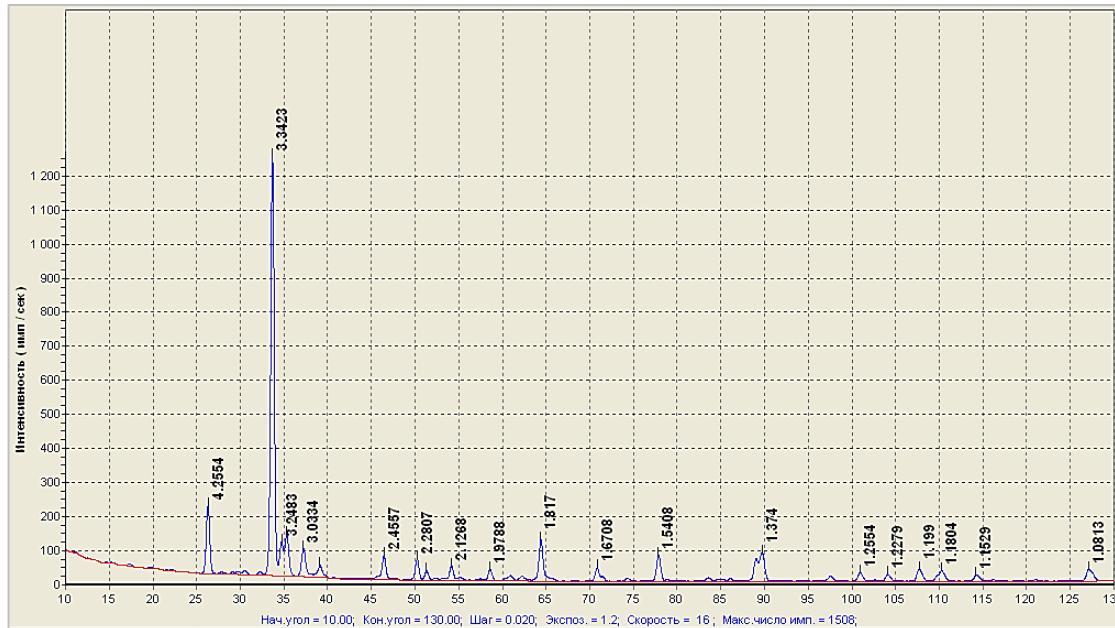
- протяженных тоннелей. Геотехника, Том XIV, № 3, с. 44-54, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-44-54>.
- 79 Thuro, K., Singer, J., Käsling, H., Bauer, M., 2007. Determining abrasiveness with the LCPC Test. *Proceedings of the 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium*, Vancouver.
- 80 Drucker P., Feinendegen M., Holzhäuser J., Richter A. 2024. Indexversuche zur Bestimmung der Abrasivität von Lockergestein // 19. Erdbaufachtagung „Verfahren und Projekte im Erd-, Grund- und Wasserbau“. 29. Februar – 1. März 2024. Bauakademie Sachsen. -13 S.
- 81 Thuro, K., Käsling, H. Classification of the abrasiveness of soil and rock // Geomechanics and Tunnelling 2. – 2009. – P. 179 – 188.
- 82 Гигиняк Е.И. Сбойка двух столиц // Метро и тоннели. – 2020. – №3. – С. 16 – 17.
- 83 Гигиняк Е.И. Два в одном // Метро и тоннели. – 2015. – №4. – С. 4 – 6.
- 84 Андреев С.Ф. Применение тампонажного раствора за тоннельной обделкой  $D_h = 10,3$  м // Метро и тоннели. – 2015. – №4. – С. 7 – 9.
- 85 Мазеин С. В., Прищепов В. В., Вознесенский А. С., Куткин Я. О. Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по коэффициентам абразивности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 10 (специальный выпуск 15). – С. 3–22. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_10\_15\_3.

## Приложение А

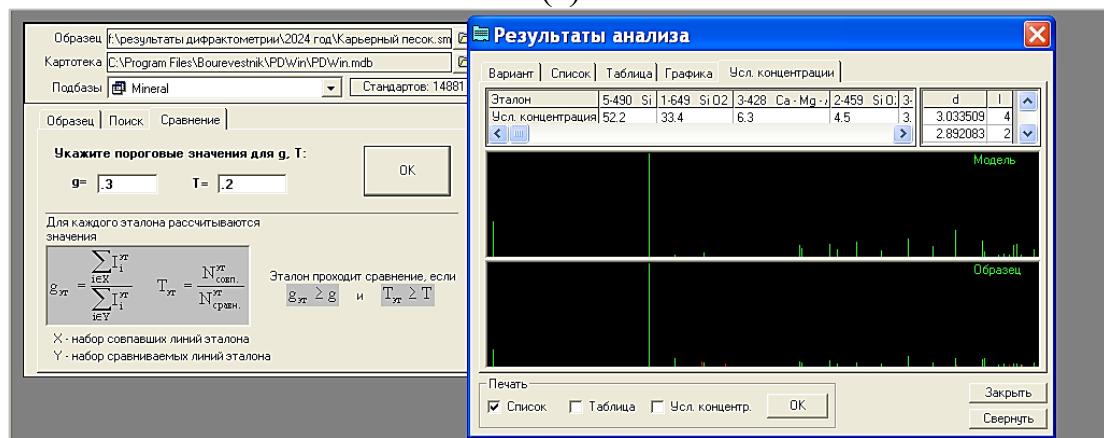
### Результаты исследования минерального состава проб

*Результаты исследования минерального состава пробы №1*

Образец: пробы №1, песок мелкий карьерный (ПМ).



(а)



(б)

Рисунок А.1 – Скриншоты спектрограммы (а) и результатов количественного анализа (б) минерального (фазового) состава пробы №1, песок мелкий карьерный (ПМ)

Количественный фазовый анализ показал, что исследуемый образец карьерного песка в качестве основных минералов содержит кварц SiO<sub>2</sub> – 93,7% и силикат кальция–магния–алюминия CaMgAlSiO – 6,3%.

## Результаты исследования минерального состава пробы №2

Образец: песок пылеватый (ПП).

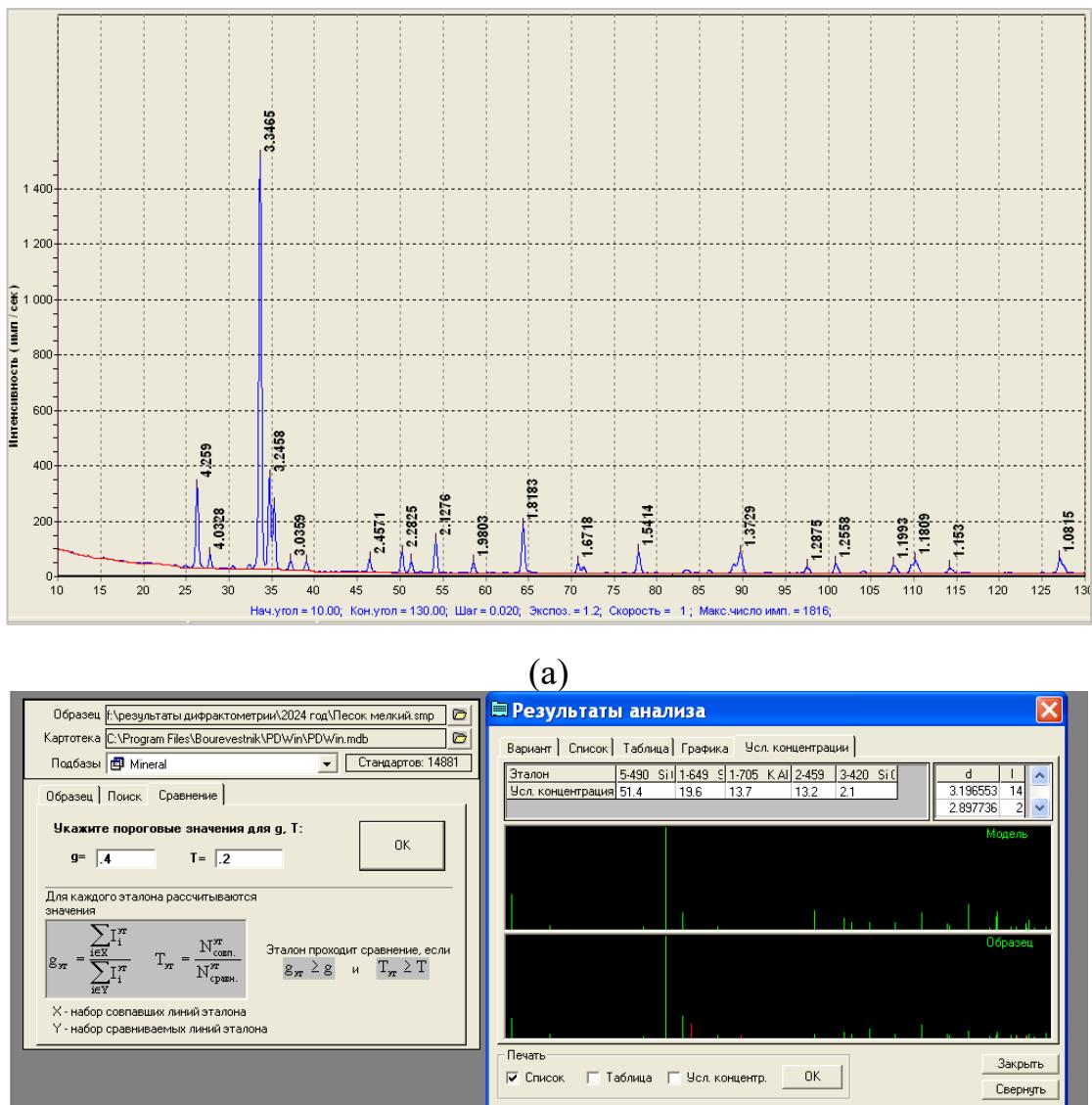


Рисунок А.2 – Скриншоты спектрограммы (а) и результатов количественного анализа (б) минерального (фазового) состава пробы №2, песок пылеватый (ПП)

Количественный фазовый анализ показал, что исследуемый образец песка мелкого состоит из кварца  $\text{SiO}_2$  – 86,3% и микроклина  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  – 13,7%.

## Результаты исследования минерального состава пробы №3

Образец: песок средней крупности карьерный (ПСК).

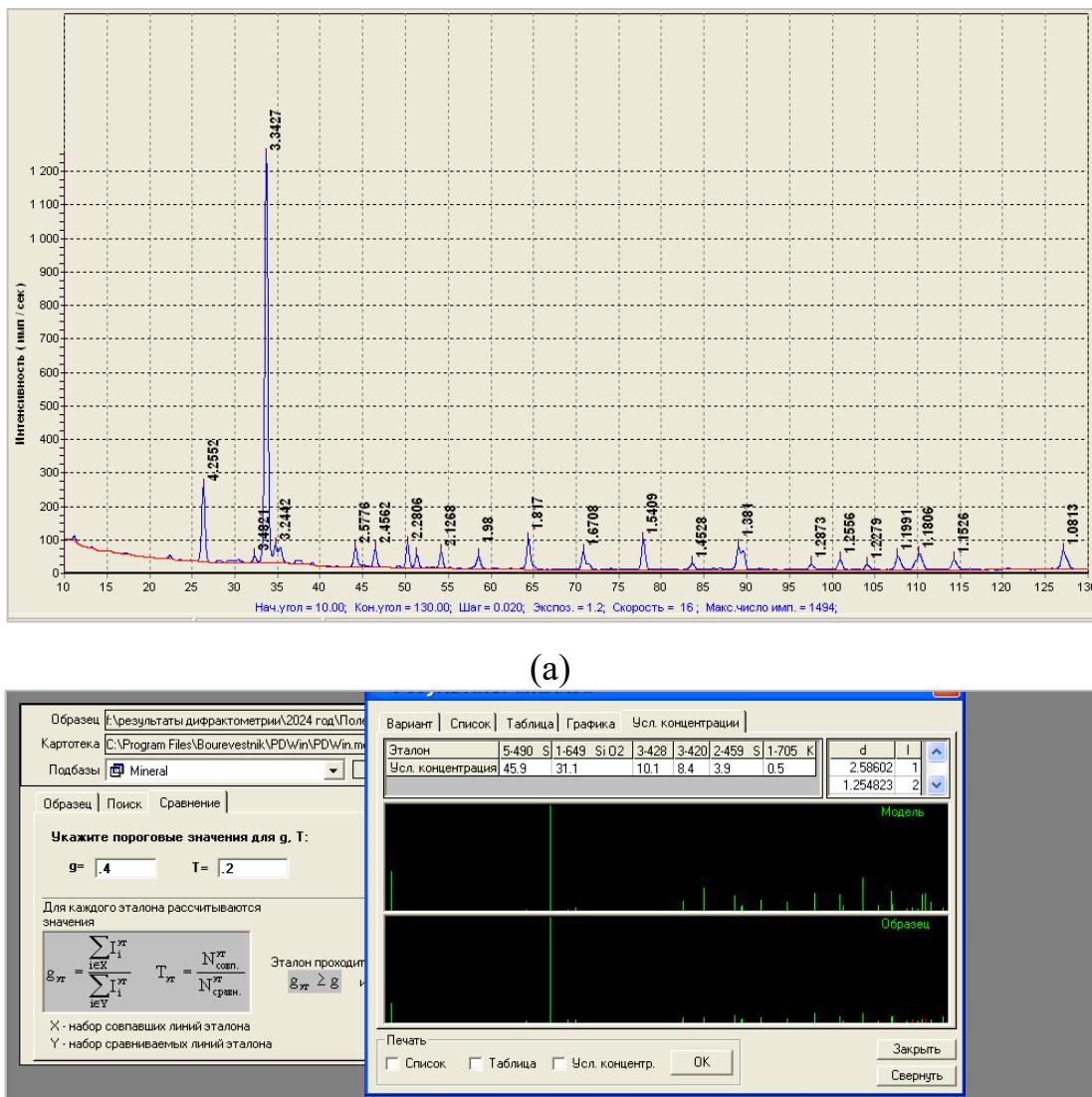


Рисунок А.3 – Скриншоты спектрограммы (а) и результатов количественного анализа (б) минерального (фазового) состава пробы №3, песок средней крупности карьерный (ПСК)

Количественный фазовый анализ показал, что исследуемый образец карьерного песка состоит из кварца  $\text{SiO}_2$  – 89,4%, силиката кальция магния алюминия  $\text{CaMgAlSiO}$  – 10,1%, микроклина  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  – 0,5%.

## Результаты исследования минерального состава пробы №4

Образец: известняк (скальный грунт) из массива при проходке тоннеля станции метро Рижская (R).

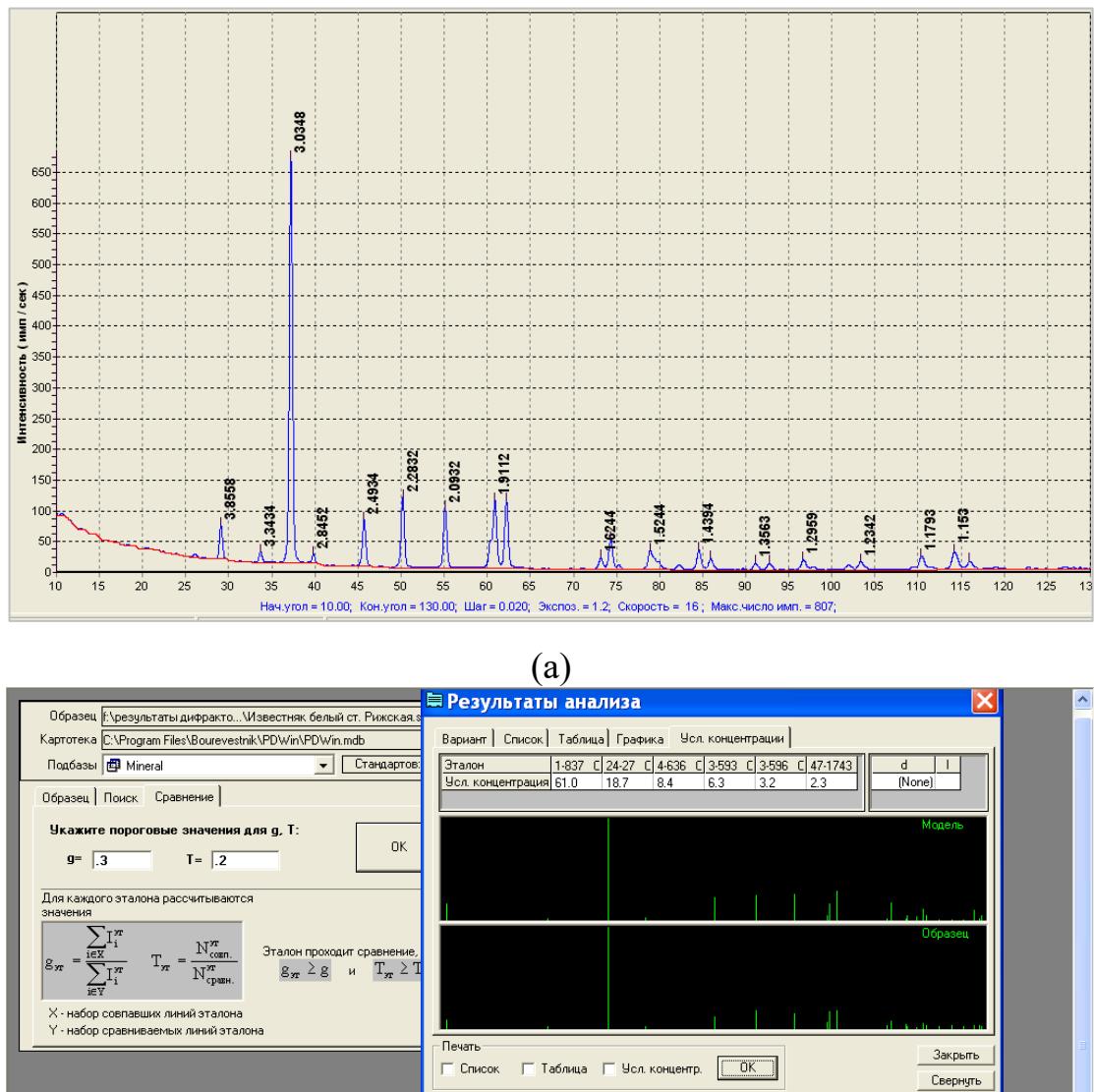


Рисунок А.4 – Скриншоты спектрограммы (а) и результатов количественного анализа (б) минерального (фазового) состава пробы №4, известняк (скальный грунт) ст. Рижская (R)

Количественный фазовый анализ показал, что исследуемый образец известняка ст. Рижская состоит из кальцита  $\text{CaCO}_3$  – 100,0%.

## Результаты исследования минерального состава пробы №5

Образец: доломит (скальный грунт) из массива при проходке тоннеля станции метро Суворовская (S).

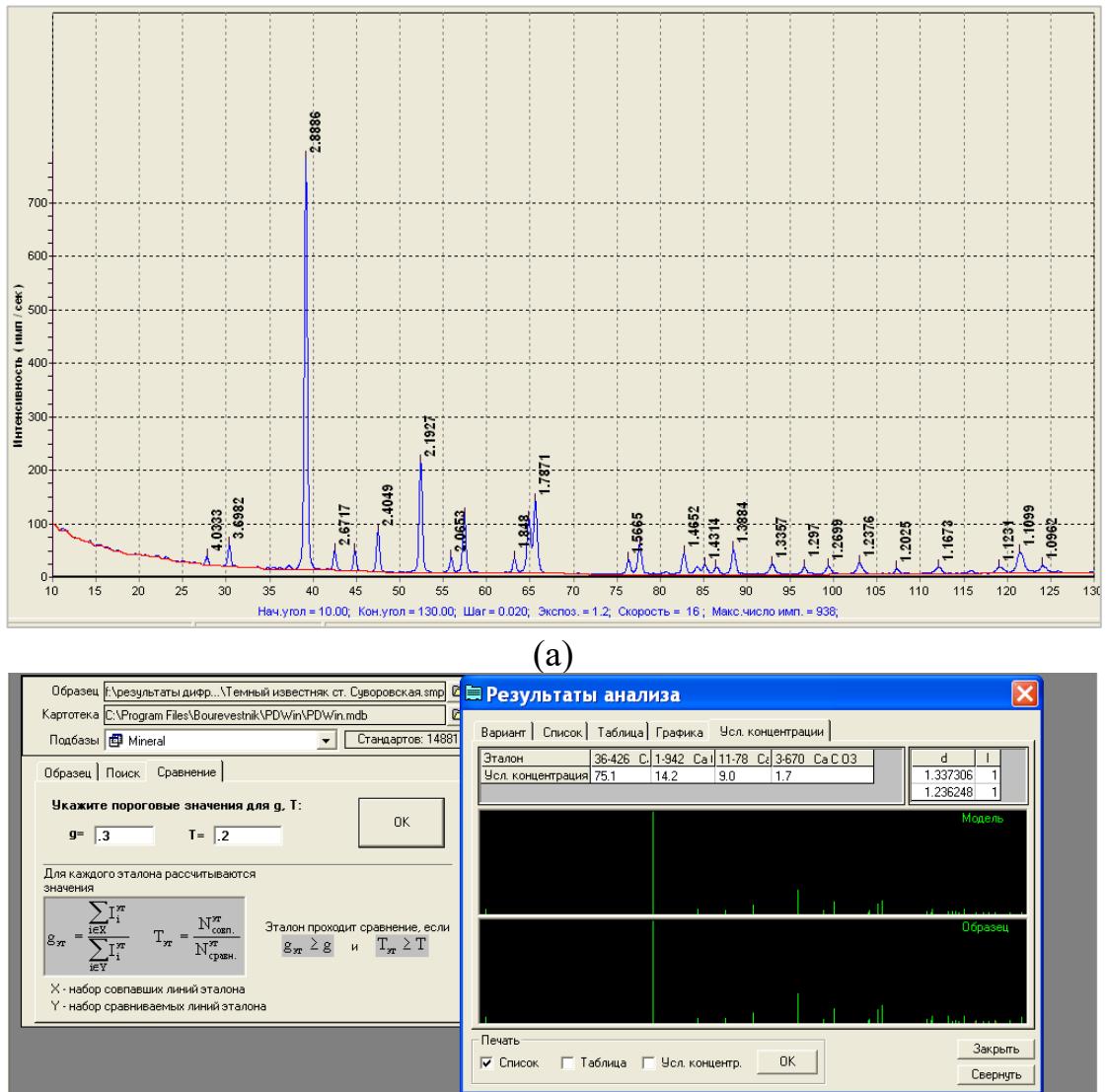


Рисунок А.5 – Скриншоты спектрограммы (а) и результатов количественного анализа (б) минерального (фазового) состава пробы №5, доломит (скальный грунт) из массива при проходке тоннеля «Суворовская» (S)

Количественный фазовый анализ показал, что исследуемый образец доломита ст. Суворовская состоит из доломита  $\text{Ca Mg (CO}_3\text{)}_2$  – 98,3%, кальцита  $\text{CaCO}_3$  – 1,7%.

## Приложение Б

### Результаты испытаний образцов на предел прочности при сжатии и растяжении

Таблица Б.1 – Результаты испытаний образцов известняка на предел прочности при сжатии

Образцы	Ширина, мм	Толщина, мм	Предел прочности при сжатии, МПа
R11	39,8	39,8	14,1
R12	39,8	39,7	18,6
R13	39,9	39,7	16,7
R14	39,9	39,6	14,8
R15	39,8	39,8	13,8
R16	39,8	39,8	19,5
<b>Среднее</b>			<b>16,25</b>
<b>С. к. о.</b>			<b>2,41</b>
<b>Коэффициент вариации</b>			<b>0,148</b>

Таблица Б.2 – Результаты испытаний образцов известняка на предел прочности при растяжении

Образцы	Длина, мм	Диаметр, мм	Предел прочности при растяжении, МПа
R01	40,4	40,6	2,8
R02	40,3	40,5	2,9
R03	40,3	40,3	2,5
R04	40,2	40,1	2,6
R05	40,2	40,4	3,1
R06	40,1	40,0	2,3
<b>Среднее</b>			<b>2,7</b>
<b>С. к. о.</b>			<b>0,290</b>
<b>Коэффициент вариации</b>			<b>0,107</b>

Таблица Б.3 – Результаты испытаний образцов доломита на предел прочности при сжатии

Образцы	Ширина, мм	Толщина, мм	Предел прочности при сжатии, МПа
S11	40,2	40,4	67,8
S12	39,9	40,1	65,0
S13	40,2	40,2	110,5
S14	40,2	40,4	67,2
S15	40,1	40,2	60,2
<b>Среднее</b>			<b>74,14</b>
<b>С. к. о.</b>			<b>20,54</b>
<b>Коэффициент вариации</b>			<b>0,277</b>

Таблица Б.4 – Результаты испытаний образцов доломита на предел прочности при растяжении

Образцы	Длина, мм	Диаметр, мм	Предел прочности при растяжении, МПа
S01	40,1	40,4	4,6
S02	40,5	40,2	6,7
S03	40,8	40,7	11,7
S04	40,9	40,3	6,3
S05	40,5	40,5	12,1
S06	40,4	38,5	8,9
<b>Среднее, МПа</b>			<b>8,38</b>
<b>С. к. о., МПа</b>			<b>3,05</b>
<b>Коэффициент вариации</b>			<b>0,36</b>

## Приложение В

### Результаты испытаний абразивности по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову

Таблица В.1 – Результаты испытаний абразивности известняка по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову

№ п/п	Скальный грунт	№ образца г. п.	Вес стержня до испытания, г.	Вес стержня после испытания, г.	Абразивность, мг
1	Известняк	R1.1	23,899	23,898	1
2	Известняк	R1.2	23,628	23,627	1
3	Известняк	R1.1	23,898	23,897	1
4	Известняк	R1.2	23,627	23,626	1
5	Известняк	R1.1	23,897	23,896	1
Среднее $M_0$ , мг					1
С.к.о. $s$ , мг					0
Коэффициент вариации					0
Верхний допуск $M_b$ , мг					1
6	Известняк	R2.1	23,826	23,824	2
7	Известняк	R2.2	23,896	23,895	1
8	Известняк	R2.1	23,624	23,623	1
9	Известняк	R2.2	23,895	23,894	1
10	Известняк	R2.1	23,623	23,623	0
Среднее $M_0$ , мг					1
С.к.о $s$ , мг					0,707
Коэффициент вариации					0,707
Верхний допуск $M_b$ , мг					3,12
11	Известняк	R3.1	23,894	23,893	1
12	Известняк	R3.2	23,623	23,622	1
13	Известняк	R3.1	23,893	23,892	1
14	Известняк	R3.2	23,622	23,620	2
15	Известняк	R3.1	23,892	23,890	2
Среднее $M_0$ , мг					1,40
С.к.о. $s$ , мг					0,548
Коэффициент вариации					0,391
Верхний допуск $M_b$ , мг					3,04

Таблица В.2 – Результаты испытаний абразивности доломита по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову

№ п/п	Скальный грунт	№ образца г. п.	Вес стержня до испытания, г.	Вес стержня после испытания, г.	Абразивность, мг
16	Доломит	S1.1	24,012	24,011	1
17	Доломит	S1.2	23,824	23,822	2
18	Доломит	S1.1	24,011	24,010	1
19	Доломит	S1.2	23,822	23,820	2
20	Доломит	S1.1	24,010	24,008	2
Среднее $M_0$ , мг					1,6
С.к.о. $s$ , мг					0,548
Коэффициент вариации					0,342
Верхний допуск $M_b$ , мг					3,24
21	Доломит	S2.1	23,820	23,819	1
22	Доломит	S2.2	24,008	24,005	3
23	Доломит	S2.1	23,019	23,017	2
24	Доломит	S2.2	24,005	24,003	2
25	Доломит	S2.1	23,817	23,815	2
Среднее $M_0$ , мг					2
С.к.о. $s$ , мг					0,707
Коэффициент вариации					0,354
Верхний допуск $M_b$ , мг					4,12
26	Доломит	S3.1	24,003	24,000	3
27	Доломит	S3.2	23,815	23,811	4
28	Доломит	S3.1	24,000	23,997	3
29	Доломит	S3.2	23,811	23,809	2
30	Доломит	S3.1	23,997	23,995	2
Среднее $M_0$ , мг					2,8
С.к.о. $s$ , мг					0,837
Коэффициент вариации					0,299
Верхний допуск $M_b$ , мг					5,3

## Приложение Г

### Результаты испытаний образцов скального грунта на абразивность методом вращающейся крыльчатки (LCPC)

Таблица Г.1 – Результаты испытаний образцов доломита и известняка на абразивность

№ образца	Крупн., мм.	Время исп., мин.	Вес крыльч. до испытания, г	Вес крыльч. после испытания, г	Потеря веса кр., г	LAC, кг/т	LAC, текущий, г/т	LAC, конечный, г/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
S1.1	6,3 – 4,0	0	45,247	45,247	0	0	0	
S1.1	6,3 – 4,0	1	45,247	45,078	0,169	0,034	34	
S1.1	6,3 – 4,0	3	45,078	45,013	0,065	0,013	47	
S1.1	6,3 – 4,0	5	45,013	44,997	0,016	0,003	50	50
					<b>Всего</b>	0,05		
S1.2	6,3 – 4,0	0	44,997	44,997	0	0	0	
S1.2	6,3 – 4,0	1	44,997	44,856	0,141	0,028	28	
S1.2	6,3 – 4,0	3	44,856	44,78	0,076	0,015	43	
S1.2	6,3 – 4,0	5	44,78	44,762	0,018	0,004	47	47
					<b>Всего</b>	0,05		
S2.1	7,0 – 6,3	0	46,22	46,22	0	0	0	
S2.1	7,0 – 6,3	1	46,22	45,999	0,221	0,044	44	
S2.1	7,0 – 6,3	3	45,999	45,854	0,145	0,029	73	
S2.1	7,0 – 6,3	5	45,854	45,823	0,031	0,006	79	79
					<b>Всего</b>	0,079		
S2.2	7,0 – 6,3	0	45,823	45,823	0	0	0	
S2.2	7,0 – 6,3	1	45,823	45,654	0,169	0,034	34	
S2.2	7,0 – 6,3	3	45,654	45,563	0,081	0,016	50	
S2.2	7,0 – 6,3	5	45,563	45,542	0,021	0,004	54	54
					<b>Всего</b>	0,054		
S3.1	4,0 – 2,5	0	45,402	45,402	0	0	0	
S3.1	4,0 – 2,5	1	45,402	45,318	0,084	0,017	17	
S3.1	4,0 – 2,5	3	45,318	45,284	0,034	0,007	24	
S3.1	4,0 – 2,5	5	45,284	45,265	0,019	0,004	28	28
					<b>Всего</b>	0,028		
S3.2	4,0 – 2,5	0	45,265	45,265	0	0	0	
S3.2	4,0 – 2,5	1	45,265	45,204	0,061	0,012	12	
S3.2	4,0 – 2,5	3	45,204	45,165	0,039	0,008	20	
S3.2	4,0 – 2,5	5	45,165	45,159	0,006	0,001	21	21
					<b>Всего</b>	0,021		47
R1.1	6,3 – 4,0	0	44,719	44,719	0	0	0	
R1.1	6,3 – 4,0	1	44,719	44,654	0,065	0,013	13	
R1.1	6,3 – 4,0	3	44,654	44,613	0,041	0,008	21	
R1.1	6,3 – 4,0	5	44,613	44,605	0,008	0,002	23	23
					<b>Всего</b>	0,023		

Продолжение таблицы Г.1

R1.2	6,3 – 4,0	0	44,605	44,605	0	0	0	
R1.2	6,3 – 4,0	1	44,605	44,537	0,068	0,014	14	
R1.2	6,3 – 4,0	3	44,537	44,495	0,042	0,008	22	
R1.2	6,3 – 4,0	5	44,495	44,484	0,011	0,002	24	24
					<b>Всего</b>	0,024		
R2.1	7,0 – 6,3	0	44,656	44,656	0	0	0	
R2.1	7,0 – 6,3	1	44,656	44,578	0,078	0,016	16	
R2.1	7,0 – 6,3	3	44,578	44,522	0,055	0,011	27	
R2.1	7,0 – 6,3	5	44,522	44,503	0,019	0,004	31	31
					<b>Всего</b>	0,031		
R2.2	7,0 – 6,3	0	44,503	44,503	0	0	0	
R2.2	7,0 – 6,3	1	44,503	44,427	0,076	0,015	15	
R2.2	7,0 – 6,3	3	44,427	44,375	0,052	0,01	25	
R2.2	7,0 – 6,3	5	44,375	44,357	0,018	0,004	29	29
					<b>Всего</b>	0,029		
R3.1	4,0 – 2,5	0	45,746	45,746	0	0	0	
R3.1	4,0 – 2,5	1	45,746	45,725	0,021	0,004	4	
R3.1	4,0 – 2,5	3	45,725	45,715	0,010	0,002	6	
R3.1	4,0 – 2,5	5	45,715	45,711	0,005	0,001	7	7
					<b>Всего</b>	0,007		
R3.2	4,0 – 2,5	0	45,711	45,711	0	0	0	
R3.2	4,0 – 2,5	1	45,711	45,689	0,022	0,004	4	
R3.2	4,0 – 2,5	3	45,689	45,679	0,010	0,002	6	
R3.2	4,0 – 2,5	5	45,679	45,673	0,006	0,001	7	7
					<b>Всего</b>	0,007		20

Таблица Г.2 – Ситовый анализ образцов доломита и известняка после испытания на абразивность

№ образца	Размеры фракций, мм	Параметры фракций в испытываемых образцах							
		До испытания		После 1 мин		После 3 мин		После 5 мин	
		Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S1.1	6,3 – 4,0	500,000	100	54,937	10,99	16,328	3,27	-	-
	4,0 – 2,5	-	-	158,754	31,75	125,683	25,14	71,325	14,27
	2,5 – 1,25	-	-	139,215	27,85	149,978	29,99	191,732	38,35
	1,25 – 0,63	-	-	49,971	9,99	47,564	9,51	45,893	9,18
	0,63 – 0,315	-	-	15,312	3,06	13,109	2,62	10,240	2,05
	0,315 – 0,160	-	-	7,134	1,43	5,987	1,20	4,995	0,99
	-0,160	-	-	74,677	14,93	141,351	28,27	175,815	35,16
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
S1.2	6,3 – 4,0	500,000	100	55,683	11,13	17,217	3,44	-	-
	4,0 – 2,5	-	-	161,346	32,27	124,731	24,95	73,670	14,74
	2,5 – 1,25	-	-	138,783	27,75	152,345	30,47	190,585	38,12
	1,25 – 0,63	-	-	48,976	9,80	47,764	9,55	46,497	9,30
	0,63 – 0,315	-	-	13,985	2,80	12,348	2,47	10,658	2,13
	0,315 – 0,160	-	-	6,789	1,36	5,892	1,18	5,121	1,02
	-0,160	-	-	74,438	14,89	139,703	27,94	173,469	34,69
	Всего	-	-	500,000	100	500,000	100	500,000	100
S2.1	7,0 – 6,3	100,000	20	16,475	3,30	7,845	1,60	2,116	0,42
	6,3 – 4,0	400,000	80	47,103	9,42	22,683	4,54	5,410	1,08
	4,0 – 2,5	-	-	172,285	34,46	121,587	24,32	102,633	20,57
	2,5 – 1,25	-	-	142,698	28,54	148,218	29,61	158,652	31,77
	1,25 – 0,63	-	-	40,742	8,15	39,249	7,85	38,102	7,62
	0,63 – 0,315	-	-	15,922	3,18	12,576	2,51	10,360	2,07
	0,315 – 0,160	-	-	7,818	1,56	6,491	1,30	5,510	1,10
	-0,160	-	-	56,957	11,39	141,351	28,27	176,640	35,37
S2.2	7,0 – 6,3	100,000	20	18,012	3,61	8,523	1,70	-	-
	6,3 – 4,0	400,000	80	49,488	9,90	24,538	4,91	9,482	1,89
	4,0 – 2,5	-	-	175,540	35,08	123,527	24,70	101,054	20,21
	2,5 – 1,25	-	-	137,460	27,49	149,106	29,82	157,445	31,49
	1,25 – 0,63	-	-	39,493	7,91	40,984	8,20	41,699	8,34
	0,63 – 0,315	-	-	16,507	3,31	12,931	2,59	9,428	1,89
	0,315 – 0,160	-	-	8,511	1,71	7,512	1,50	7,372	1,47
	-0,160	-	-	54,989	10,99	132,879	26,58	173,520	34,71
S3.1	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
	4,0 – 2,5	500,000	100	167,504	33,50	82,742	16,55	17,445	3,49
	2,5 – 1,25	-	-	143,385	28,68	175,387	35,08	232,372	46,47
	1,25 – 0,63	-	-	83,793	16,76	76,945	15,39	70,012	14,00
	0,63 – 0,315	-	-	27,836	5,57	23,379	4,67	13,833	2,77
	0,315 – 0,160	-	-	9,861	1,97	6,857	1,37	4,388	0,88
	-0,160	-	-	67,621	13,52	134,690	26,94	161,950	32,39
Всего		500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100

Продолжение таблицы Г.2

S3.2	4,0 – 2,5	500,000	100	168,937	33,79	93,765	18,75	24,813	4,96
	2,5 – 1,25			142,739	28,55	179,538	35,91	239,315	47,86
	1,25 – 0,63			82,794	16,56	75,487	15,09	67,695	13,54
	0,63 – 0,315			25,859	5,17	21,436	4,29	16,100	3,22
	0,315 – 0,160			8,968	1,79	6,791	1,36	5,295	1,06
	-0,160			70,70	14,14	122,98	24,60	146,782	29,36
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
S4.1	7,0 – 6,3	121,280	24,30	12,870	2,6	-	-	-	-
	6,3 – 4,0	-	-	40,303	8,9	8,024	1,6	-	-
	4,0 – 2,5	378,720	75,70	185,505	37,1	83,600	16,7	45,741	9,15
	2,5 – 1,25	-	-	144,513	28,1	200,080	40,0	207,632	41,53
	1,25 – 0,63	-	-	36,880	7,4	57,675	11,6	61,590	12,32
	0,63 – 0,315	-	-	16,217	3,2	19,170	3,8	14,940	2,99
	0,315 – 0,160	-	-	8,200	1,6	7,420	1,5	5,878	1,17
	-0,160	-	-	55,512	11,1	124,031	24,8	164,219	32,84
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
R1.1	6,3 – 4,0	500,000	100	106,016	21,20	55,721	11,14	28,385	5,68
	4,0 – 2,5	-	-	158,431	31,69	74,535	14,92	38,961	7,79
	2,5 – 1,25	-	-	111,447	22,29	69,973	13,99	36,318	7,26
	1,25 – 0,63	-	-	26,759	5,35	24,395	4,88	21,413	4,28
	0,63 – 0,315	-	-	21,684	4,34	19,932	3,97	18,711	3,74
	0,315 – 0,160	-	-	21,983	4,39	20,138	4,04	18,833	3,77
	-0,160	-	-	53,680	10,74	235,306	47,06	337,379	67,48
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
R1.2	6,3 - 4,0	500,000	100	107,231	21,44	54,974	10,99	27,430	5,49
	4,0 – 2,5	-	-	157,632	31,51	73,689	14,74	37,564	7,50
	2,5 – 1,25	-	-	112,298	22,49	71,573	14,31	37,653	7,52
	1,25 – 0,63	-	-	25,894	5,18	23,659	4,73	21,679	4,36
	0,63 – 0,315	-	-	20,893	4,18	19,136	3,83	18,632	3,73
	0,315 – 0,160	-	-	21,351	4,27	20,542	4,11	18,258	3,65
	-0,160	-	-	54,701	10,93	236,427	47,29	338,784	67,75
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
R2.1	7,0 – 6,3	100,000	20	27,837	5,57	5,112	1,02	-	-
	6,3 – 4,0	400,000	80	132,583	26,52	59,453	11,89	2,350	0,47
	4,0 – 2,5			91,787	18,36	48,784	9,76	17,741	3,55
	2,5 – 1,25			88,264	17,65	72,865	14,57	67,664	13,53
	1,25 – 0,63			49,682	9,94	46,467	9,29	44,970	8,99
	0,63 – 0,315			27,556	5,51	26,738	5,35	24,395	4,88
	0,315 – 0,160			22,474	4,49	21,349	4,27	18,902	3,78
	-0,160			59,817	11,96	219,232	43,85	323,978	64,80
R3.1	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
	4,0 – 2,5	500,000	100	169,574	33,91	94,745	18,95	36,516	7,31
	2,5 – 1,25			141,687	28,34	175,732	35,15	57,358	11,47
	1,25 – 0,63			84,692	16,94	69,463	13,89	34,710	6,94
	0,63 – 0,315			28,875	5,78	21,736	4,35	19,467	3,89
	0,315 – 0,160			5,861	1,17	6,573	1,31	16,101	3,22
	-0,160			69,311	13,86	131,751	26,35	335,848	67,17
	Всего			500,000	100	500,000	100	500,000	100

## Приложение Д

### Результаты испытаний образцов дисперсного грунта на абразивность методом вращающейся крыльчатки (LCPС)

Таблица Д.1 – Результаты испытаний образцов песка на абразивность методом вращающейся крыльчатки

№ п/п	№ образца песка	Фракции песка, мм.	Содержани е фракций песка в образце, г.	Время испыта ния, мин.	Вес крыльчатки до испытания, г.	Вес крыльчатк и после испытания , г.	Потеря веса крыльчатк и, г.	Показ а-тель LAC, г/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПСК 500	6,3 – 4,0	17,248	0	45,247	45,247	0	282
		4,0 – 2,5	35,206					
		2,5 – 1,25	50,172	1	45,919	45,881	0,038	
		1,25 – 0,63	61,310					
		0,63 – 0,315	162,676	3	45,881	45,841	0,04	
		0,315 – 0,160	128,818					
		- 0,160	44,570	5	45,841	45,818	0,063	
2	ПМ 500	6,3 – 4,0	19,072	0	45,818	45,818	0	398
		4,0 – 2,5	56,601					
		2,5 – 1,25	136,971	1	45,818	45,736	0,082	
		1,25 – 0,63	122,921					
		0,63 – 0,315	92,763	3	45,736	45,665	0,071	
		0,315 – 0,160	38,145					
		- 0,160	33,527	5	45,665	45,619	0,046	
3	ПКК 500	6,3 – 4,0	-	0	45,573	45,573	0	682
		4,0 – 2,5	-					
		2,5 – 1,25	181,446	1	45,573	45,477	0,096	
		1,25 – 0,63	318,554					
		0,63 – 0,315	-	3	45,477	45,353	0,124	
		0,315 – 0,160	-					
		- 0,160	-	5	45,353	45,232	0,121	
4	ПКМ 500	6,3 – 4,0	-	0	45,232	45,232	0	6
		4,0 – 2,5	-					
		2,5 – 1,25	-	1	45,232	45,232	0,001	
		1,25 – 0,63	-					
		0,63 – 0,315	148,997	3	45,232	45,232	0,001	
		0,315 – 0,160	351,003					
		- 0,160	-	5	45,232	45,231	0,001	
5	ПКС К 500	6,3 – 4,0	-	0	44,312	44,312	0	208
		4,0 – 2,5	-					
		2,5 – 1,25	-	1	44,312	44,305	0,097	
		1,25 – 0,63	-					
		0,63 – 0,315	471,127	3	44,305	44,301	0,004	
		0,315 – 0,160	28,873					
		- 0,160	-	5	44,301	44,298	0,003	

Продолжение таблицы Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	ПСК 250 + ПКК 250	6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	18,248 45,900 93,572 92,120 127,719 83,480 39,049	0 1 3 5	44,744 44,744 44,420 44,420 44,363 44,363 44,312	44,744 44,420 0,324 0,057 0,051	0	620
7	ПКК 250 +ПМ 250	6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	9,536 28,300 159,208 220,738 46,381 19,073 16,764	0 1 3 5	47,123 47,123 47,037 47,037 46,983 46,983 46,941	47,123 47,037 0,086 0,054 0,042	0	364
8	ПКК 167 + ПМ 167 + ПСК 167	6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	12,107 30,602 122,863 167,595 85,146 55,654 26,033	0 1 3 5	46,106 46,106 46,013 46,013 45,997 45,997 45,883	46,106 46,013 0,93 0,016 0,014	0	246

Таблица. Д.2 – Ситовый анализ образцов песка после испытания на абразивность

№ образца	Размеры фракций, мм	Параметры фракций в испытываемых образцах							
		До испытания		После 1 мин		После 3 мин		После 5 мин	
		Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПСК 500	6,3 – 4,0	17,248	3,45	2,541	0,51	1,427	0,29	1,077	0,22
	4,0 – 2,5	35,206	7,04	2,920	0,58	2,810	0,56	2,755	0,55
	2,5 – 1,25	50,172	10,03	10,141	2,03	9,133	1,83	8,577	1,72
	1,25 – 0,63	61,310	12,26	53,439	10,69	49,653	9,93	46,358	9,27
	0,63 – 0,315	162,676	32,54	147,420	29,48	142,083	28,42	151,158	30,23
	0,315 – 0,160	128,818	25,77	133,572	26,72	130,006	26,00	120,447	24,09
	-0,160	44,570	8,91	149,967	29,99	164,888	32,98	169,628	33,92
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
ПМ 500	6,3 – 4,0	19,072	3,81	3,187	0,64	2,898	0,58	2,861	0,57
	4,0 – 2,5	56,601	11,32	7,584	1,52	4,090	0,82	3,901	0,78
	2,5 – 1,25	136,971	27,39	39,134	7,83	28,191	5,64	25,864	5,17
	1,25 – 0,63	122,921	24,58	113,323	22,63	93,261	18,64	84,657	16,93
	0,63 – 0,315	92,763	18,55	174,233	34,84	161,003	32,19	148,701	29,74
	0,315 – 0,160	38,145	7,63	87,824	17,55	89,237	17,84	87,295	17,46
	-0,160	33,527	6,71	74,715	14,97	121,320	24,29	146,721	29,35
	Всего	500	100	500	100	500	100	500	100
ПКК 500	7,0 – 6,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,3 – 4,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	4,0 – 2,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,5 – 1,25	181,446	36,29	126,256	25,25	95,313	19,06	81,023	16,20
	1,25 – 0,63	318,554	63,71	323,697	64,74	315,686	61,14	305,591	61,12
	0,63 – 0,315	-	-	23,535	4,71	34,374	6,94	40,445	8,09
	0,315 – 0,160	-	-	7,550	1,51	14,378	2,88	14,467	2,89
	-0,160	-	-	18,962	3,79	40,249	8,05	58,474	11,70
ПКМ 500	Всего	500	100	500	100	500	100	500	100
	4,0 – 2,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,5 – 1,25	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,25 – 0,63	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,63 – 0,315	148,997	29,80	65,338	13,07	63,223	12,67	60,531	12,11
	0,315 – 0,160	351,003	70,20	375,442	75,09	377,342	75,48	367,990	73,59
	-0,160	-	-	59,220	11,94	59,425	11,85	71,479	14,30
ПКСК 500	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
	4,0 – 2,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,5 – 1,25	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,25 – 0,63	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,63 – 0,315	471,127	94,23	453,540	90,71	443,227	88,64	435,038	87,01
	0,315 – 0,160	28,873	5,77	41,825	8,37	49,040	9,81	53,292	10,66
	-0,160	-	-	4,635	0,92	7,733	1,55	11,670	2,33
ПСК 250 + ПКК 250	Всего	500	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
	7,0 – 6,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	6,3 – 4,0	18,248	3,65	0,393	0,08	0,125	0,03	-	-
	4,0 – 2,5	45,900	9,18	1,336	0,27	0,749	0,15	0,387	0,08
	2,5 – 1,25	93,572	18,71	70,835	14,17	62,493	12,50	56,628	11,33
	1,25 – 0,63	92,120	18,42	197,238	39,44	187,921	37,58	187,658	37,53
	0,63 – 0,315	127,719	25,54	77,621	15,52	80,807	16,16	78,205	15,64
	0,315 – 0,160	83,480	16,70	64,706	12,94	59,102	11,82	56,218	11,24
	-0,160	39,049	7,81	87,488	17,50	108,803	21,76	120,904	24,18
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100

Продолжение таблицы Д.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ПКК 250 + ПМ 250	6,3 - 4,0	9,536	1,91	0,630	0,13	0,510	0,10	-	-
	4,0 - 2,5	28,300	5,66	2,215	0,44	1,512	0,30	-	-
	2,5 - 1,25	159,208	31,84	71,519	14,31	53,860	10,77	47,706	9,54
	1,25 - 0,63	220,738	44,15	229,940	45,99	220,127	44,03	212,278	42,46
	0,63 - 0,315	46,381	9,28	100,619	20,13	101,155	20,23	101,566	20,31
	0,315 - 0,160	19,073	3,81	47,198	9,41	48,672	9,73	46,839	9,37
	-0,160	16,764	3,35	47,879	9,59	74,164	14,83	91,611	18,32
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100
ПКК 167 + ПМ 167 + ПСК 167	6,3 - 4,0	12,107	2,42	-	-	-	-	-	-
	4,0 - 2,5	30,602	6,12	4,650	0,93	3,132	0,62	2,720	0,54
	2,5 - 1,25	122,863	24,57	63,785	12,76	51,683	10,34	45,917	9,18
	1,25 - 0,63	167,595	33,52	165,135	33,03	158,469	31,70	152,334	30,47
	0,63 - 0,315	85,146	17,03	114,143	22,83	111,744	22,36	110,367	22,08
	0,315 - 0,160	55,654	11,13	71,720	14,34	69,825	13,95	64,409	12,88
	-0,160	26,033	5,21	80,567	16,11	105,147	21,03	124,253	24,85
	Всего	500,000	100	500,000	100	500,000	100	500,000	100

Таблица Д.3 – Результаты испытаний образцов фракций песка на абразивность методом крыльчатки

№ п/п	№ Образ- ца песка	Фракции песка, мм.	Содержа- ние фракций песка в образце, г.	Время испыта- ния, мин.	Вес крыль- чатки до испытани- я, г.	Вес крыль- чатки после испыта- ния, г.	Потеря веса крыль- чатки, г.	Показат- ель LAC, г/т
1	Φ0,5	6.3 – 4.0 4.0 – 2.5 2.5 – 1.25 1.25 – 0.63 0.63 – 0.315 0.315 – 0.160 - 0.160	0 0 0 200 275 30 0	0 1 3 5	44,625 44,625 44,612 44,61 44,609	44,625 44,6124 4,61 44,609	0 0,013 0,002 0,001	32
2	Φ1,0	6.3 – 4.0 4.0 – 2.5 2.5 – 1.25 1.25 – 0.63 0.63 – 0.315 0.315 – 0.160 - 0.160	0 0 180 250 71 0 0	0 1 3 5	44,609 44,609 44,59 44,59 44,582 44,577	44,609 44,59 44,582 44,577	0 0,019 0,008 0,005	64
3	Φ2,0	6.3 – 4.0 4.0 – 2.5 2.5 – 1.25 1.25 – 0.63 0.63 – 0.315 0.315 – 0.160 - 0.160	62 150 200 90 0 0 0	0 1 3 5	44,577 44,577 44,501 44,429 44,429 44,381	44,577 44,501 44,429 44,381	0 0,076 0,072 0,048	392
4	Φ5,0	10 - 6,3 6.3 – 4.0 4.0 – 2.5 2.5 – 1.25 1.25 – 0.63 0.63 – 0.315 0.315 – 0.160 - 0.160	150 180 110 60 0 0 0 0	0 1 3 5	45,177 45,177 45,016 45,016 44,832 44,732	45,177 45,016 44,832 44,732	0 0,161 0,184 0,100	890

Таблица Д.4 – Ситовый анализ проб узких фракций карьерного песка после испытания на абразивность

№ образца	Размеры фракций, мм	Параметры фракций в испытываемых образцах							
		До испытания		После 1 мин		После 3 мин		После 5 мин	
		Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %	Вес фракции, г.	Вес фракции, %
Φ0,5	6,3 – 4,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4,0 – 2,5	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,5 – 1,25	200	39,60	235,70	47,15	152,90	30,58	139,70	28,04
	1,25 – 0,63	275	54,46	207,20	41,45	270,00	54,00	275,00	55,20
	0,63 – 0,315	30	5,94	41,00	8,20	69,21	13,84	68,00	13,65
	0,315 – 0,160	0	0,00	16,00	3,20	6,89	1,38	15,50	3,11
	-0,160	505	100	499,90	100	499,00	99,80	498,20	100
	Всего	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Φ1,0	6,3 – 4,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4,0 – 2,5	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,5 – 1,25	180	35,93	82,60	16,49	79,20	15,86	75,10	15,04
	1,25 – 0,63	250	49,90	287,10	57,31	279,80	56,02	282,50	56,58
	0,63 – 0,315	71	14,17	102,35	20,43	105,40	21,10	102,40	20,51
	0,315 – 0,160	0	0,00	9,25	1,85	15,40	3,08	21,80	4,37
	-0,160	0	0,00	19,62	3,92	19,70	3,94	17,50	3,50
	Всего	501	100	500,92	100	499,50	100	499,30	100
Φ2,0	7,0 – 6,3	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6,3 – 4,0	62	12,35	33,70	6,75	11,50	2,31	7,70	1,55
	4,0 – 2,5	150	29,88	220,80	44,20	162,50	32,60	150,40	30,24
	2,5 – 1,25	200	39,84	159,30	31,89	172,60	34,63	163,40	32,86
	1,25 – 0,63	90	17,93	24,80	4,96	38,40	7,70	38,60	7,76
	0,63 – 0,315	0	0,00	14,10	2,82	32,40	6,50	29,90	6,01
	0,315 – 0,160	0	0,00	41,90	8,39	69,30	13,90	88,30	17,76
	-0,160	0	0,00	5,00	1,00	11,70	2,35	19,00	3,82
	Всего	502	100	499,60	100	498,40	100	497,30	100
Φ5,0	7,0 – 6,3	150	30,00	13,30	2,66	6,10	1,22	6,00	1,20
	6,3 – 4,0	180	36,00	21,40	4,28	4,40	0,88	2,20	0,44
	4,0 – 2,5	110	22,00	127,00	25,41	50,80	10,20	34,80	6,99
	2,5 – 1,25	60	12,00	188,00	37,61	202,90	40,73	192,40	38,63
	1,25 – 0,63	0	0,00	44,80	8,96	61,60	12,36	64,70	12,99
	0,63 – 0,315	0	0,00	21,60	4,32	25,70	5,16	23,70	4,76
	0,315 – 0,160	0	0,00	13,80	2,76	17,80	3,57	18,30	3,67
	-0,160	0	0,00	70,00	14,00	128,90	25,87	156,00	31,32
	Всего	500	100	499,90	100	498,20	100	498,10	100

## Приложение Е

### Результаты испытаний образцов песка на абразивность методом вращающейся крыльчатки

Таблица Е.1 – Результаты испытаний образцов карьерного песка на абразивность методом вращающейся крыльчатки

№ образца песка	Фракции песка мм	Содержание фракций песка в образце, г	Время испытания, мин	Масса крыльчатки до испытания, г	Масса крыльчатки после испытания, г	Потеря массы крыльчатки г	Показатель LAC, г/т
1	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	1,778 12,621 21,731 32,645 82,669 162,870 153,458 32,229	0 1 3 5	45,193 45,193 45,089 45,036 44,999	45,193 45,089 45,036 44,999	0 0,104 0,053 0,037	304
2	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	2,030 14,645 25,046 35,177 86,155 165,064 142,333 29,551	0 1 3 5	45,001 45,001 44,958 44,913 44,913	45,001 44,958 44,913 44,875	0 0,043 0,045 0,038	172
3	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	2,920 13,594 26,306 40,164 91,197 161,343 135,790 28,685	0 1 3 5	46,073 46,073 46,011 45,971 45,971	46,073 46,011 45,971 45,943	0 0,062 0,040 0,028	197
4	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	1,713 13,889 26,764 42,298 98,364 170,848 125,403 20,721	0 1 3 5	45,939 45,939 45,898 45,898 45,860	45,939 45,898 45,860 45,832	0 0,041 0,038 0,028	152
5	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	1,529 14,419 30,194 48,396 111,194 182,317 100,078 11,874	0 1 3 5	46,180 46,180 46,084 46,084 46,050	46,180 46,084 46,050 45,974	0 0,096 0,034 0,076	289

Продолжение таблицы Е.1

№ образца песка	Фракции песка мм	Содержание фракций песка в образце, г	Время испытания, мин	Масса крыльчатки до испытания, г	Масса крыльчатки после испытания, г	Потеря массы крыльчатки г	Показатель LAC, г/т
6	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	3,876 16,395 27,512 38,919 100,708 183,102 111,965 17,524	0 1 3 5	45,970 45,970 45,932 45,879	45,970 45,932 45,879 45,839	0 0,038 0,053 0,040	174
7	+ 6,3 6,3 – 4,0 4,0 – 2,5 2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,315 0,315 – 0,160 – 0,160	2,858 16,385 29,127 35,958 85,030 163,058 139,797 27,787	0 1 3 5	45,651 45,651 45,616 45,583	45,651 45,616 45,583 45,567	0 0,035 0,068 0,084	169

## Приложение Ж

### Данные ситового анализа, полученные при обработке проб песка на установке с вращающейся крыльчаткой

Таблица Ж.1 – Исходные данные ситового анализа при обработке проб песка на установке с вращающейся крыльчаткой

№	i	$d_i$ , мм	До обработки		После 1 мин.		После 3 мин.		После 5 мин.	
			$P(d_i)$ , %	$F_{\text{п}}(d_i)$ , %						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	2	5	1,37	98,63	0,94	99,06	0,37	99,63	0,36	99,64
	3	3	4,58	94,05	2,25	96,81	0,57	99,06	0,21	99,43
	4	2	5,10	88,95	3,53	93,28	2,58	96,48	2,06	97,37
	5	1	10,80	78,14	8,54	84,73	7,01	89,47	6,39	90,99
	6	0,5	32,42	45,72	29,66	55,07	27,55	61,92	28,05	62,94
	7	0,25	33,00	12,72	34,54	20,53	42,03	19,89	48,13	14,80
	8	0,1	10,45	2,26	14,20	6,33	17,77	2,12	13,32	1,48
	9	0,071	1,93	0,33	5,87	0,47	1,75	0,37	0,73	0,75
	10	0,045	0,32	0,01	0,28	0,19	0,02	0,34	0,01	0,74
	11	0	0,01	0,00	0,19	0,00	0,34	0,00	0,74	0,00
2	1	10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	2	5	1,56	98,44	1,35	98,65	0,88	99,12	0,38	99,62
	3	3	5,37	93,06	3,01	95,64	1,06	98,06	0,20	99,42
	4	2	5,63	87,43	4,70	90,94	3,16	94,90	2,01	97,41
	5	1	11,24	76,19	9,41	81,53	7,58	87,32	6,72	90,70
	6	0,5	33,85	42,34	33,92	47,62	30,47	56,85	25,57	65,13
	7	0,25	30,64	11,71	34,01	13,60	39,62	17,23	42,94	22,19
	8	0,1	9,66	2,05	12,65	0,95	15,71	1,52	19,17	3,02
	9	0,071	1,86	0,19	0,60	0,35	0,97	0,55	2,25	0,77
	10	0,045	0,05	0,13	0,04	0,31	0,01	0,55	0,02	0,75
	11	0	0,13	0,00	0,31	0,00	0,55	0,00	0,75	0,00

Продолжение таблицы Ж.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	10	0,26	99,74	0,26	99,74	0,26	99,74	0,26	99,74
	2	5	1,25	98,49	1,06	98,68	0,46	99,28	0,26	99,48
	3	3	5,44	93,05	2,76	95,91	1,07	98,21	0,09	99,39
	4	2	6,46	86,59	5,36	90,55	3,25	94,97	2,23	97,16
	5	1	12,74	73,85	11,06	79,49	9,26	85,71	7,98	89,17
	6	0,5	33,40	40,45	34,01	45,48	30,62	55,09	31,34	57,84
	7	0,25	29,05	11,40	33,89	11,60	41,85	13,24	47,16	10,68
	8	0,1	9,43	1,96	10,66	0,93	12,67	0,57	9,33	1,35
	9	0,071	1,69	0,27	0,82	0,11	0,29	0,27	0,75	0,60
	10	0,045	0,21	0,06	0,00	0,11	0,00	0,27	0,01	0,59
	11	0	0,06	0,00	0,11	0,00	0,27	0,00	0,59	0,00
4	1	10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	2	5	1,32	98,68	0,68	99,32	0,65	99,35	0,34	99,66
	3	3	5,46	93,22	4,03	95,29	1,93	97,42	0,40	99,27
	4	2	6,77	86,45	4,89	90,40	3,42	94,00	2,63	96,63
	5	1	13,52	72,93	12,61	77,79	10,26	83,74	8,77	87,86
	6	0,5	36,66	36,27	36,33	41,46	37,42	46,32	34,79	53,07
	7	0,25	27,08	9,18	34,13	7,32	40,56	5,75	40,29	12,78
	8	0,1	8,40	0,79	7,11	0,21	5,40	0,36	11,89	0,89
	9	0,071	0,66	0,12	0,02	0,19	0,02	0,34	0,26	0,63
	10	0,045	0,06	0,06	0,01	0,17	0,01	0,33	0,00	0,63
	11	0	0,06	0,00	0,17	0,00	0,33	0,00	0,63	0,00
5	1	10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	2	5	1,18	98,82	0,87	99,13	0,83	99,17	0,20	99,80
	3	3	6,10	92,72	4,74	94,39	3,35	95,82	0,21	99,59
	4	2	7,80	84,92	6,01	88,38	4,25	91,57	2,41	97,18
	5	1	15,31	69,61	11,95	76,43	9,76	81,81	8,46	88,71
	6	0,5	41,38	28,23	35,89	40,54	30,91	50,90	31,06	57,65
	7	0,25	22,48	5,76	33,07	7,47	36,66	14,24	47,44	10,21
	8	0,1	5,64	0,12	7,28	0,18	13,36	0,88	9,19	1,02
	9	0,071	0,10	0,02	0,16	0,02	0,65	0,23	0,47	0,55
	10	0,045	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,22	0,00	0,55
	11	0	0,00	0,00	0,01	0,00	0,22	0,00	0,55	0,00

Продолжение таблицы Ж.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	1	10	0,31	99,69	0,31	99,69	0,00	100,00	0,00	100,00
	2	5	1,80	97,89	1,78	97,91	1,42	98,58	1,00	99,00
	3	3	5,90	91,99	4,15	93,77	2,15	96,43	0,39	98,60
	4	2	6,19	85,80	4,95	88,82	3,46	92,97	1,99	96,62
	5	1	12,58	73,23	9,84	78,97	10,29	82,68	7,05	89,57
	6	0,5	41,19	32,04	33,89	45,09	44,72	37,95	44,00	45,56
	7	0,25	23,62	8,42	33,35	11,74	33,61	4,34	40,91	4,66
	8	0,1	8,19	0,23	11,45	0,29	3,92	0,42	4,10	0,56
	9	0,071	0,16	0,07	0,22	0,08	0,11	0,31	0,09	0,47
	10	0,045	0,06	0,01	0,01	0,06	0,02	0,29	0,00	0,46
	11	0	0,01	0,00	0,06	0,00	0,29	0,00	0,46	0,00
7	1	10	0,17	99,83	0,17	99,83	0,17	99,83	0,17	99,83
	2	5	1,53	98,29	1,24	98,59	0,65	99,18	0,39	99,44
	3	3	6,49	91,80	2,51	96,07	1,74	97,44	1,04	98,41
	4	2	5,90	85,90	4,89	91,18	3,16	94,27	2,56	95,85
	5	1	11,08	74,83	9,94	81,24	8,04	86,23	6,81	89,04
	6	0,5	33,46	41,37	31,96	49,28	29,66	56,57	27,02	62,03
	7	0,25	30,20	11,17	35,65	13,63	42,31	14,26	45,98	16,04
	8	0,1	9,36	1,81	12,72	0,91	13,24	1,02	14,70	1,34
	9	0,071	1,51	0,31	0,37	0,54	0,03	0,99	0,04	1,30
	10	0,045	0,05	0,26	0,01	0,54	0,01	0,98	0,01	1,29
	11	0	0,26	0,00	0,54	0,00	0,98	0,00	1,29	0,00

### Приложение 3

#### Данные аппроксимации результатов ситового анализа плотностью логнормального распределения

Таблица 3.1 – Сводная таблица параметров аппроксимации плотностью логнормального распределения, а также средних и среднеквадратических отклонений логнормального распределения при различном времени обработки для всех шести проб

№ пробы	Параметр	До обработки	После 1 минуты	После 3 минуты	После 5 минуты
1	$\mu$	-0.627	-0.861	-0.940	-0.984
	$\sigma$	0.918	0.994	0.782	0.681
	$Z_{max}$	0.236	0.596	0.420	0.509
	$\sigma_Z$	0.133	0.400	0.177	0.196
	$R^2$	0.965	0.840	0.968	0.964
	$E$	0.814	0.693	0.530	0.471
	$S$	0.936	0.900	0.487	0.362
2	$\mu$	-0.567	-0.685	-0.852	-0.987
	$\sigma$	0.926	0.828	0.784	0.783
	$Z_{max}$	0.245	0.285	0.387	0.438
	$\sigma_Z$	0.138	0.159	0.181	0.193
	$R^2$	0.957	0.956	0.958	0.962
	$E$	0.871	0.710	0.580	0.506
	$S$	1.015	0.705	0.534	0.466
3	$\mu$	-0.508	-0.657	-0.852	-0.927
	$\sigma$	0.954	0.832	0.731	0.674
	$Z_{max}$	0.236	0.278	0.453	0.487
	$\sigma_Z$	0.118	0.138	0.194	0.183
	$R^2$	0.966	0.967	0.955	0.967
	$E$	0.948	0.733	0.557	0.497
	$S$	1.156	0.732	0.468	0.377
4	$\mu$	-0.459	-0.633	-0.773	-0.818
	$\sigma$	0.893	0.765	0.680	0.736
	$Z_{max}$	0.256	0.313	0.416	0.373
	$\sigma_Z$	0.107	0.156	0.173	0.178
	$R^2$	0.971	0.957	0.963	0.958
	$E$	0.942	0.711	0.582	0.579
	$S$	1.040	0.635	0.446	0.491

Продолжение таблицы 3.1

№ пробы	Параметр	До обработки	После 1 минуты	После 3 минуты	После 5 минуты
5	$\mu$	-0.351	-0.605	-0.747	-0.930
	$\sigma$	0.851	0.786	0.807	0.662
	$Z_{max}$	0.277	0.291	0.368	0.509
	$\sigma_Z$	0.107	0.149	0.174	0.190
	$R^2$	0.919	0.904	0.954	0.965
	$E$	1.011	0.744	0.656	0.491
	$S$	1.043	0.688	0.629	0.364
6	$\mu$	-0.400	-0.648	-0.645	-0.791
	$\sigma$	0.876	0.817	0.707	0.648
	$Z_{max}$	0.284	0.298	0.269	0.337
	$\sigma_Z$	0.123	0.170	0.131	0.151
	$R^2$	0.956	0.948	0.973	0.975
	$E$	0.984	0.730	0.674	0.559
	$S$	1.057	0.712	0.542	0.404
7	$\mu$	-0.543	-0.715	-0.865	-0.954
	$\sigma$	0.916	0.805	0.720	0.688
	$Z_{max}$	0.255	0.352	0.483	0.539
	$\sigma_Z$	0.130	0.183	0.229	0.253
	$R^2$	0.960	0.942	0.933	0.931
	$E$	0.884	0.676	0.546	0.488
	$S$	1.013	0.646	0.450	0.380

Таблица 3.2 – Сводная таблица параметра  $\mu$  логнормального распределения при различных временах обработки для всех проб

№ пробы	До обработки	После 1 минуты	После 3 минуты	После 5 минуты
1	-0.627	-0.861	-0.940	-0.984
2	-0.567	-0.685	-0.852	-0.987
3	-0.508	-0.657	-0.852	-0.927
4	-0.459	-0.633	-0.773	-0.818
5	-0.351	-0.605	-0.747	-0.930
6	-0.400	-0.648	-0.645	-0.791
7	-0.543	-0.715	-0.865	-0.954
Среднее	-0.494	-0.686	-0.811	-0.913

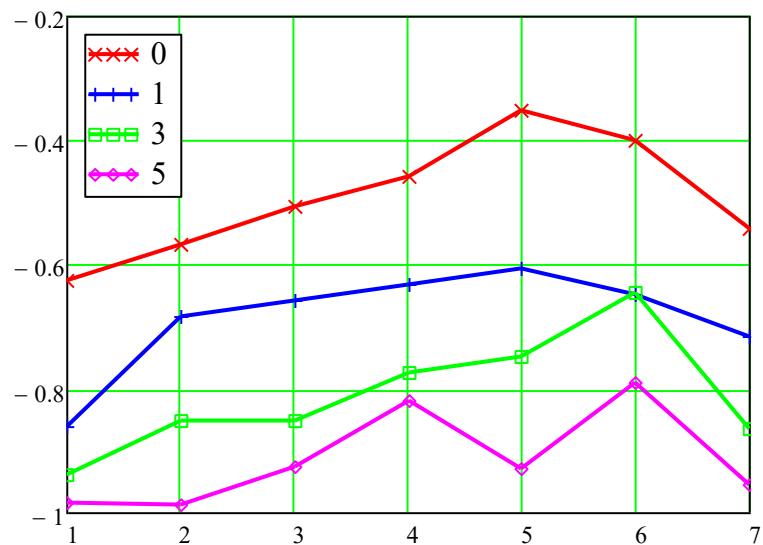


Рисунок 3.1 – Графики изменения параметра  $\mu$  логнормального распределения для всех проб без обработки (1), с обработкой 1 (2), 3 (3), 5 (4) минут

Таблица 3.3 – Сводная таблица параметра  $\sigma$  логнормального распределения при различных временах обработки для всех проб

№ пробы	До обработки	После 1 минуты	После 3 минуты	После 5 минуты
1	0.918	0.994	0.782	0.681
2	0.926	0.828	0.784	0.783
3	0.954	0.832	0.731	0.674
4	0.893	0.765	0.680	0.736
5	0.851	0.786	0.807	0.662
6	0.876	0.817	0.707	0.648
7	0.916	0.805	0.720	0.688
Среднее	0.905	0.832	0.744	0.696

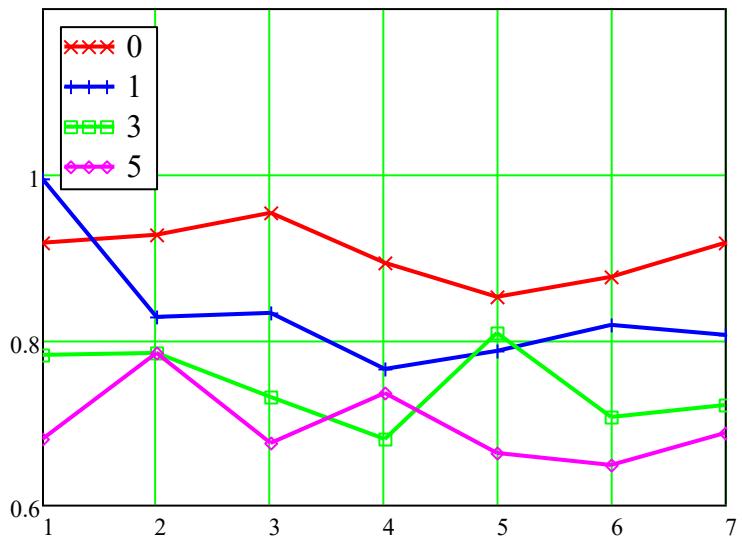


Рисунок 3.2 – Графики изменения параметра  $\sigma$  логнормального распределения для всех проб без обработки (1), с обработкой 1 (2), 3 (3), 5 (4) минут

Таблица 3.4 – Сводная таблица среднего значения  $E$  логнормального распределения при различных временах обработки для всех шести проб

№ пробы	До обработки	После 1 минуты	После 3 минуты	После 5 минуты
1	0.814	0.693	0.530	0.471
2	0.871	0.710	0.580	0.506
3	0.948	0.733	0.557	0.497
4	0.942	0.711	0.582	0.579
5	1.011	0.744	0.656	0.491
6	0.984	0.730	0.674	0.559
7	0.884	0.676	0.546	0.488
Среднее	0.922	0.714	0.589	0.513

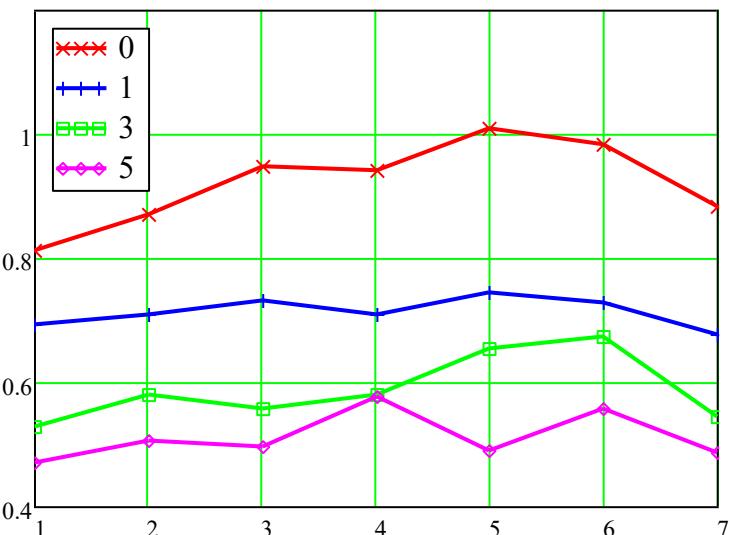


Рисунок 3.3 – Графики изменения среднего значения  $E$  логнормального распределения для всех проб без обработки (1), с обработкой 1 (2), 3 (3), 5 (4) минут

Таблица 3.5 – Сводная таблица среднеквадратического отклонения  $S$  логнормального распределения при различных временах обработки для всех шести проб

№ пробы	До обработки	После 1 минуты	После 3 минуты	После 5 минуты
1	0.936	0.900	0.487	0.362
2	1.015	0.705	0.534	0.466
3	1.156	0.732	0.468	0.377
4	1.040	0.635	0.446	0.491
5	1.156	0.732	0.468	0.377
6	1.057	0.712	0.542	0.404
7	1.013	0.646	0.450	0.380
Среднее	1.053	0.723	0.485	0.408

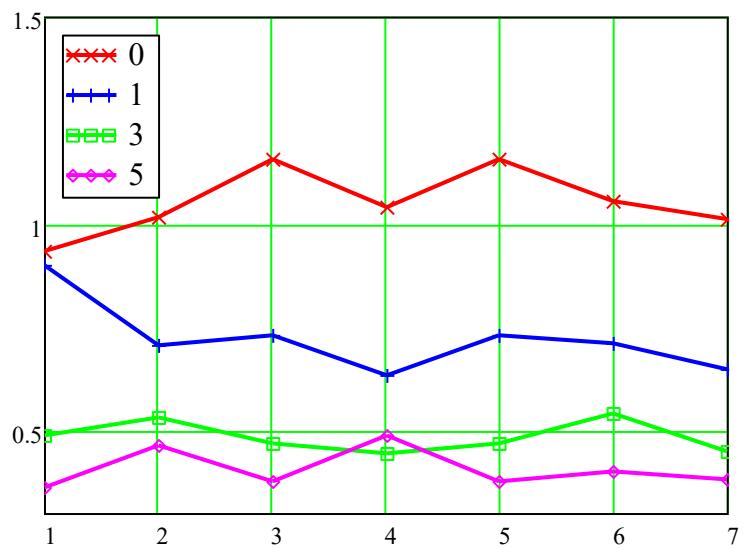


Рисунок 3.4 – Графики изменения среднеквадратического отклонения  $S$  логнормального распределения для всех проб без обработки (1), с обработкой 1 (2), 3 (3), 5 (4) минут

## Приложение И

### Методические рекомендации по оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям  
НИТУ «МИСИС», д.т.н., проф.

М.Р. Филонов

« 27 » ноябрь 2025 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ АБРАЗИВНОСТИ СКАЛЬНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ**

Москва, 2025

## Составители

Аспирант кафедры ФизГео П.В. В.В. Прищепов  
«25» июль 2025 г.

Заместитель руководителя исполнительной дирекции

Тоннельной ассоциации России,  
доктор технических наук С.В. Мазеин

«25» июль 2025 г.

Профессор кафедры ФизГео, профессор,

доктор технических наук А.С. Вознесенский

«25» июль 2025 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	6
1. Общие положения	7
2 Методы оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов	10
3 Лабораторно-полевая классификация грунтов по коэффициентам абразивности	18
ЛИТЕРАТУРА	23

## ВВЕДЕНИЕ

Резкое увеличение тоннелепроходческих работ с использованием тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) требует разработки новых и совершенствования существующих способов и средств разрушения горных пород механическими воздействиями. При широком в настоящее время фронте работ по прокладке тоннелей с помощью ТПМК особенно остро ставится вопрос о прогнозе износа и своевременной замене режущего инструмента – шарошек. Изнашивание режущих элементов тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) во многой степени определяется средой, в которой ведутся работы, а именно – горными породами и грунтами, среди свойств которых в данном случае наибольшее значение имеет абразивность. В соответствии с ГОСТ 25100-2020 они подразделяются на следующие классы: скальные, дисперсные и мерзлые. Из этих трех классов для данного случая имеют значения первые два.

Согласно упомянутому ГОСТу, скальным называется грунт, в котором преобладают структурные связи химической природы, а дисперсным грунт, в котором преобладают механические, физические и физико-химические структурные связи.

Следует отметить, что за рубежом уже существуют методы оценки абразивности, которые успешно используются на практике. Существуют стандарты и методические рекомендации, позволяющие делать оценку абразивности и дробимости грунтов, и по полученным данным осуществлять подбор режущего инструмента, а также планово и своевременно осуществлять его замену по мере износа.

Несмотря на то, что в нашей стране вопрос об оценке абразивности ставится уже не один десяток лет, проведены научно-исследовательские работы, результаты которых заняли значимое место в мировой практике, многие вопросы еще не решены. В частности, отсутствуют методические рекомендации по оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов

применительно к геологическим и техническим условиям России, которые можно было бы внедрять на многих объектах тоннелестроения, обеспечивая оптимальный подбор режущего инструмента для конкретных условий и планомерность его замены.

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Абразивность** – способность горных пород изнашивать контактирующие с ними твёрдые тела (детали горных машин, инструменты и т.п.). Обусловлена в основном прочностью, размерами и формой минеральных зёрен, слагающих породу.

**Изнашивание** – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

**Износ** – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах.

**Износостойкость** – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

**Ресурс** – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

**Остаточный ресурс** – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния.

**ТПМК** – тоннелепроходческий механизированный комплекс.

## 1. Общие положения

Абразивность горных пород влияет на износ инструмента, потребление энергии и время строительства и, следовательно, является важным параметром в горной и строительной инженерии.

Абразивные свойства разрабатываемых ТПМК грунтов и горных пород – это их способность истирать контактирующую с ними поверхность режущих инструментов, рабочих элементов оборудования и машин. Износ оборудования при щитовой проходке является возможной причиной нештатной ситуации прорыва водогрунтовой массы в тоннель, что также сдерживает темпы тоннельного строительства и снижает его безопасность.

Рабочий орган ТПМК роторного типа традиционно оснащен режущим инструментом в следующей комплектации:

- центральный забурник,
- плоские и/или стержневые резцы и контурные выгнутые ковши (все они жестко крепятся в держателях),
- вращающиеся на своей оси дисковые шарошки, режущий контур которых выступает над режущим контуром плоских резцов.

Вышеперечисленный режущий инструмент подвергается первичному износу, при несвоевременной замене изношенного инструмента приходит вторичный износ таких контактирующих с породой компонентов ТПМК, как луки ротора, держатели и корпус резцов, шнековый конвейер. Износ режущего инструмента обычно оценивается путем объединения количественных данных, записанных во время замен (уменьшение радиуса режущего диска шарошки в миллиметрах, замена отказавшего инструмента в шт.), как дополнение используются детекторы износа. К немедленной замене инструмента приводит только разрушение инструмента и крепления. Остальные проявления износа регулярно отслеживаются: равномерный (абразивный) износ шарошки и неравномерный износ шарошки при

заклинивании вращения, а также частичная потеря режущей гребенки на резцах.

Методика горнодобывающей и тоннелестроительной промышленности определяет скорость износа скоростью потери металла из инструмента, то есть количеством замен инструмента при разработке единицы объема породы. Величина, обратная скорости износа, – это буровой ресурс инструмента, выраженный в разработанных тысячах  $\text{м}^3$  породы на одно эталонное изделие. Классификация скорости износа и её обратной величины – ресурса режущего инструмента приведена в Таблице 1.

Таблица 1 – Классификация скорости износа и ресурса режущего инструмента

Оценка скорости износа инструмента		Оценка ресурса инструмента	
количественно: шт. / тыс. $\text{м}^3$	качественно:	количественно: тыс. $\text{м}^3$ породы / шт.	качественно:
< 0,5	очень низкая	> 2,0	очень высокий
0,5...0,7	низкая	1,5...2,0	высокий
0,7...1,0	средняя	1,0...1,5	средний
1,0...2,0	высокая	0,5...1,0	низкий
2,0...5,0	очень высокая	0,2...0,5	очень низкий
> 5,0	экстремально высокая	< 0,2	экстремально низкий

Измерение абразивности породы для оценок ресурса режущего инструмента ТПМК и периодичности его замен становится все более актуальным для проектирования и строительства тоннельных выработок большого сечения.

Об актуальности исследования влияния абразивности грунтов свидетельствует также ряд публикаций, посвященных установлению закономерностей между износом породоразрушающих элементов ТПМК и эффективностью проходки тоннелей.

Исследованиями показано, что существует прямая зависимость между эффективностью механизированной выемки в твердых породах и

эффективностью дисковых шарошек. Дисковые шарошки расположены на переднем конце ТПМК, которые непосредственно контактируют с породой. Износ дисковых шарошек является важным эффективным фактором, влияющим на функциональность проходческих комбайнов. Суровые условия работы, такие как сильные удары и отсутствие смазки, приводят к высокому износу шарошки при работе с твердыми породами. Замена дисковых шарошек является трудоемким и дорогостоящим мероприятием, которое может значительно снизить использование ТПМК и скорость продвижения, а также оказывает существенное влияние на сроки строительства, стоимость и безопасность тоннельных проектов.

## **2 Методы оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов**

Для решения обозначенной задачи была разработана и проверена на реальных примерах методология, позволяющая описать абразивность горных пород и грунтов или стойкость металла к истиранию с помощью соотношения сопоставимых количественных показателей.

Для определения абразивности скальных и дисперсных грунтов используется специальная установка на базе сверлильного станка, разработанная на кафедре физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС в 2022–2023 гг. Данная установка в одном варианте использовалась для определения абразивности скальных горных пород по методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова, а в другом, после небольшого переоснащения – как для определения абразивности скальных и дисперсных грунтов, так и скорости износа режущего инструмента по методу LCPC.

**Метод Л. И. Барона и А. В. Кузнецова (далее – метод вращающегося полого стержня)**

Методика определения абразивности горных пород по методу вращающегося полого стержня является наиболее широко распространенной

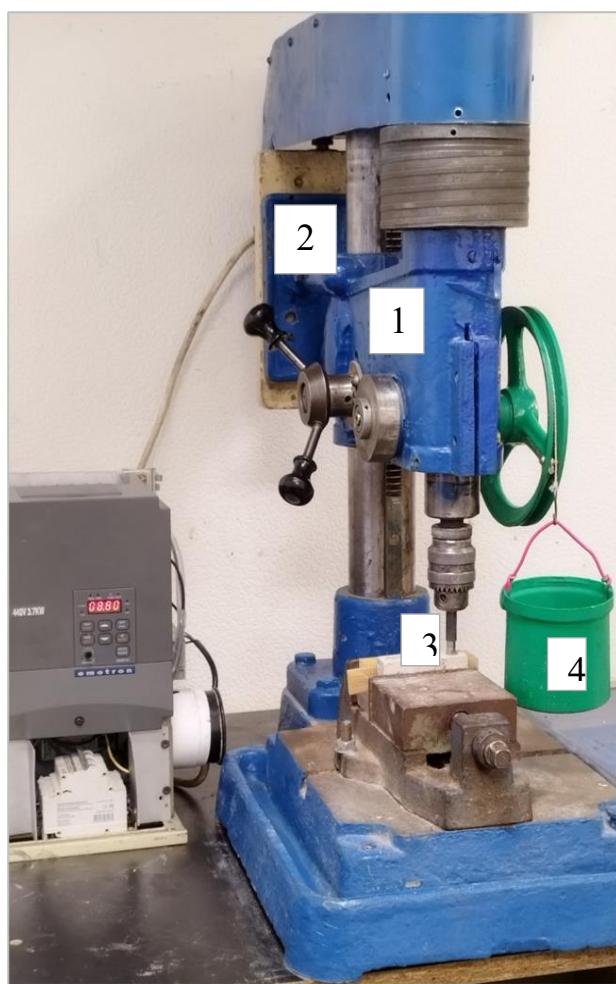
в России (а также странах бывшего СССР). Данный метод утвержден в Российской Федерации в качестве стандартного по оценке абразивности горных пород.

Исторически сложилось, что показатель абразивности по Барону-Кузнецкову применялся в основном на предприятиях по добыче угля, где механизации подвергались работы по проведению выработок с целью обеспечения доступа к залежам полезного ископаемого, то есть угля, и непосредственно его добыча при помощи проходческих и добывающих комбайнов.

Метод вращающегося полого стержня основан на сверлении углубления в куске горной породы с помощью эталонного стержня длиной 50-70 мм из термически обработанной стали (инструментальной калиброванной стали-серебрянки У8А ГОСТ 2588-44) диаметром 8 мм в течение 10 мин при осевой нагрузке 150 Н и скорости вращения 400 об/мин. Потеря массы эталонного образца в мг за время проведения опыта принимается в качестве показателя абразивности испытываемой породы. Тест предназначен для определения абразивности скальных горных пород в куске. Его применение для оценки абразивности диспергированных грунтов и песков на сегодняшний день не предусмотрено.

Общий вид установки для проведения исследования по методу вращающегося полого стержня представлен на рисунке 1. Для проведения испытаний необходимо предварительно изготовить эталонный стержень диаметром 8 мм длиной 50-70 мм из термически обработанной стали (У8А). С обеих сторон высверливают центральные отверстия диаметром 4 мм и глубиной 10–12 мм. Подготавливается установка на базе сверлильного станка. Путем навешивания различных грузов на ручку управления высотой шпинделя сверлильного станка регулируется осевое усилие прижатия эталонного стержня поверхности образца. Усилие без вращения шпинделя измеряется динамометром, на который опирается эталонный стержень,

зажатый в патроне. Испытания производятся на обрезках штуфов, оставшихся при подготовке образцов скальных пород. При «сверлении» образец нагружается осевым усилием 150 Н при скорости вращения 400 об/мин. Необходимое количество оборотов устанавливается путем подбора шкивов ременной передачи станка. Определение абразивности породы производят «сверлением» образца породы предварительно взвешенным эталонным стержнем. Сначала «сверлят» в течение 10 мин. одним торцом стержня, а затем в течение также 10 мин. – другим. Абразивность в миллиграммах определяется как полусумма потери веса эталонного стержня.



1 – вертикальный сверлильный станок; 2 – двигатель; 3 – стержень; 4 – груз с осевым усилием 150 Н

Рисунок 1 – Общий вид установки для проведения исследования по методу Барона–Кузнецова (метод вращающегося полого стержня)

Испытания проводят в следующей последовательности:

1. На аналитических весах определяют массу эталонного стержня  $M_0$ .
2. Эталонный стержень закрепляют в шпинделе сверлильного станка, а образец горной породы - в подставке.
3. Стержень приводят в соприкосновение с образцом при стандартном осевом усилии (150 Н).
4. Двигатель приводят в действие с отметкой момента времени его включения. Вращение и истирание стержня о поверхность образца производится в течение 10 минут.
5. После 10-минутного истирания стержень переворачивают и производят его истирание противоположным торцом также в течение 10 минут при стандартном осевом усилии (150 Н).
6. После истирания стержень извлекают из патрона, тщательно очищают от пыли и взвешивают. Путем взвешивания определяют массу стержня после истирания  $M_1$ .
7. Коэффициент абразивности пород вычисляется на основании результатов опытов по формуле

$$K_{ab} = 0,5(M_0 - M_1), \text{ мг} \quad (1)$$

где  $M_0, M_1$  - масса стержня до и после опыта соответственно, мг.

Полученный коэффициент абразивности сравнивают с классификацией, представленной в таблице 2.

Таблица 2 – Классификация горных пород по абразивности по Л. И. Барону и А. В. Кузнецову

Класс абразивности	Класс пород	Коэффициент абразивности, мг	Характерные породы
I	Весьма малоабразивные	до 5	Известняки, мраморы, мягкие сульфиды без кварца (галенит, сфалерит, пирротин), апатит, каменная соль
II	Малоабразивные	5-10	Сульфидные руды, барито-сульфидные руды; аргиллиты, мягкие сланцы: углистые, глинистые, хлоритовые, хлорито-аспидные
III	Ниже средней абразивности	10-18	Джеспилиты, роговики (рудные и нерудные), кварцево-сульфидные руды, магматические тонкозернистые породы, песчаники кварцевые и аркозовые тонкозернистые, руды железные, известняки окремненные
IV	Среднеабразивные	18-30	Песчаники кварцевые и аркозовые, мелкозернистые диабазы, крупнозернистый пирит, арсенопирит, жильный кварц, кварцево-сульфидные руды, мелкозернистые магматические породы, окварцованные известняки, джеспероиды
V	Выше средней абразивности	30-45	Песчаники кварцевые и аркозовые, средне- и крупнозернистые, плагиограниты, нефелиновые сиениты, мелкозернистые граниты, мелкозернистые диориты, порфирита, грейзены, габбро, гнейсы, скарны (рудные и нерудные)
VI	Повышенной абразивности	45-65	Средне- и крупнозернистые граниты, диориты, гранодиориты, порфиры, нефелиновые сиениты, сиениты, кератофиры, пироксениты, монцониты, амфиболиты, сланцы кварцевые и окварцованные, гнейсы
VII	Высокоабразивные	65-90	Порфиры, дориты, граниты, гранитоидные нефелиновые сиениты
VIII	Высшей степени абразивные	свыше 90	Корундосодержащие

## **Метод LCPC (метод вращающейся крыльчатки)**

Тест *LCPC* разработан во Франции в лаборатории Laboratoire Central des Ponts et Chausées (*LCPC*) и описан во французском стандарте NF P18-579 впервые опубликованном в 1990 г., затем переизданном в 2013 г. во Франции и в переводе на немецкий в Германии. Установка для испытаний (рисунки 2 и 3) оснащена двигателем мощностью 750 Вт, приводящим в движение металлическую крыльчатку, вращающуюся в цилиндрическом сосуде, в котором находится гранулированный образец. Прямоугольная крыльчатка изготовлена из стандартизированной стали с твердостью по Роквеллу *HRB* 60–75.

Перед испытанием порода должна быть измельчена. Размер зерен пробы должен находиться в диапазоне от 4 до 6,3 мм. Коэффициент абразивности *LCPC* (*LCPC-Abrasivity-Coefficient* или сокращенно *LAC*) рассчитывается как потеря веса крыльчатки за время дробления 5 мин, деленная на вес образца (500 г) по формуле

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M}, \quad (2)$$

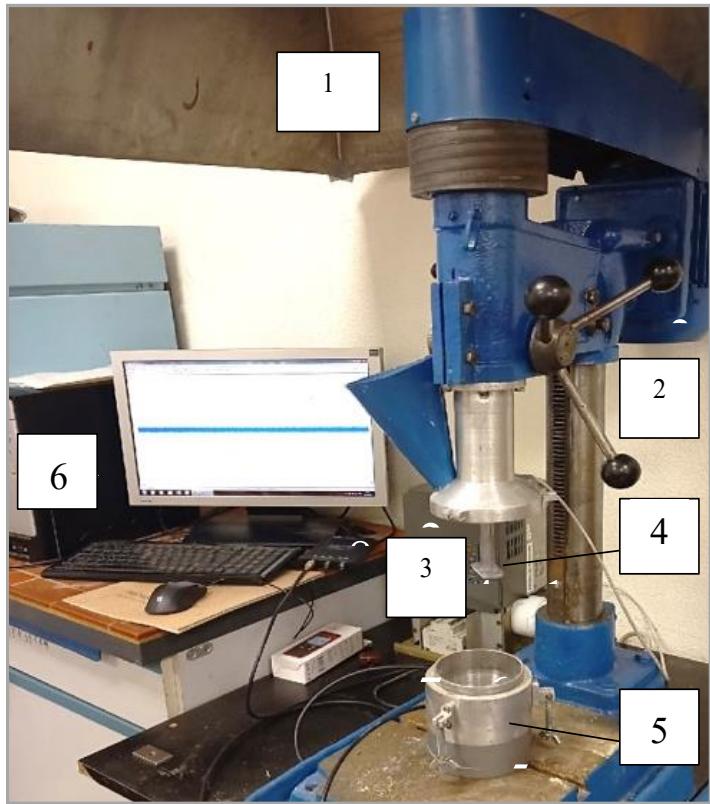
где *LAC* – коэффициент абразивности по *LCPC* (г/т);

*m*<sub>0</sub> – вес крыльчатки до испытания (г);

*m* – вес крыльчатки после испытания (г);

*M* – вес материала образца (0,0005 т).

Встречается также его аббревиатура в виде *ABR* (*abrasivity coefficient*).



1 – сверлильный станок; 2 – электромотор; 3 – блок управления частотой вращения; 4 – крыльчатка; 5 – сосуд для пробы; 6 – компьютер.

Рисунок 2 – Общий вид установки для проведения исследований по методу вращающейся крыльчатки (*LCPC*)



а



б



в



г

а – сверлильный станок и двигатель; б – крыльчатка; в – сосуд для пробы с датчиком АЭ; г – частотный преобразователь

Рисунок 3 – Отдельные части лабораторной установки

Базой установки является вертикальный сверлильный станок (1) с двигателем (2), который выдает 4500 оборотов в минуту. Вместо сверла к станку крепится стержень, в который вкручивается крыльчатка (3) (рисунок 3 (б)) с помощью болта. Крыльчатка представляет собой прямоугольную пластину из стали с твердостью HRB в диапазоне 60-75 (например, Ст3) с размерами 50x25 мм ( $\pm 0,5$  мм) x 5 ( $\pm 0,2$  мм). Крыльчатка опускается в сосуд (4) (рисунок 3 (в)), который крепится к станку с помощью соединительных винтов. Двигатель приводится в работу с помощью блока управления

частотой вращения (5) (рисунок 3 (г)). После включения в установленный сосуд с крыльчаткой засыпается образец грунта через специальную воронку (6). Вес грунта в сосуде составляет  $500 \text{ г} \pm 2 \text{ г}$ .

### **3 Лабораторно-полевая классификация грунтов по коэффициентам абразивности**

Результаты качественной классификации по показателям абразивности, получаемых лабораторными методами на образцах грунта, целесообразно использовать для сравнительного прогноза поведения режущего инструмента на соответствующих образцам участках проходимого массива, где можно предварительно оценить соотношение уровней количественного износа инструмента.

Для этого предварительно на основе проведенных испытаний и данных других исследований была составлена сравнительная классификация грунтов по абразивности (таблица 3). Представленные данные содержат результаты испытаний с помощью трех методов: рассмотренные ранее метод вращающегося полого стержня и метод вращающейся крыльчатки, а также широко распространенный метод Cerchar-индекса абразивности (*CAI*).

Индекс абразивности (*CAI*) определяется в результате 5-кратного царапания заостренного стального стержня по грубой горизонтальной поверхности целого скального куска на расстояние 10 мм, а также измерения диаметра плоскости образующегося при этом износа стержня с точностью 0,01 мм. При этом за единицу *CAI* принимается отношение диаметра плоской части острия  $d$  к нормирующему множителю  $c$  ( $c = 1 \text{ мм}$ ).

Таблица 3 – Уточняемая сравнительная классификация грунтов по абразивности

<b>Класс по <math>K_{ab}</math></b>	<b>Грунт</b>	<b><math>CAI</math></b>	<b><math>K_{ab, \text{мг}}</math></b>	<b><math>LAC, \text{г/т}</math></b>
Весьма малоабразивные		0,0	0,0	0
		0,1	0,5	27
		0,2	1,0	55
		0,3	1,5	82
		0,4	2,0	109
		0,5	2,5	137
		0,6	3,1	164
Малоабразивные	Хлорит, серпентинит	0,7	3,7	191
		0,8	4,3	218
		0,9	4,9	246
		1,0	5,6	273
	аргиллит	1,1	6,3	300
Ниже средней абразивности		1,2	7,0	328
	порфир	1,3	7,8	355
		1,4	8,6	382
		1,5	9,4	410
	гранито-гнейс, доломит	1,6	10	437
		1,7	11	464
		1,8	12	491
Средней абразивности	габбро	1,9	13	519
		2,0	14	546
	базальт	2,1	15	573
		2,2	17	601
	щелочной базальт	2,3	18	628
	долерит	2,4	19	655
	диабаз	2,5	21	683
Выше средней абразивности		2,6	22	710
	известняк	2,7	24	737
		2,8	25	764
	амфиболит	2,9	27	792
		3,0	29	819
		3,1	31	846
		3,2	32	874
		3,3	34	901
		3,4	37	928
	гнейс	3,5	39	956
		3,6	41	983
	диорит	3,7	43	1010

Продолжение таблицы 3.

Класс по $K_{ab}$	Грунт	CAI	$K_{ab}$ , мг	$LAC$ , г/т
Повышенной абразивности		3,8	46	1037
		3,9	48	1065
		4,0	51	1092
		4,1	54	1119
	гранит	4,2	57	1147
		4,3	60	1174
		4,4	63	1201
Высокоабразивные		4,5	66	1229
		4,6	69	1256
		4,7	73	1283
		4,8	76	1310
		4,9	80	1338
	кварцит	5,0	84	1365
		5,1	88	1392
Высшей степени абразивности		5,2	92	1420
		5,3	96	1447
		5,4	100	1474
		5,5	105	1502
		5,6	109	1529
		5,7	114	1556
		5,8	119	1583
		5,9	124	1611
		6,0	129	1638

На основе данных таблицы 3, пользуясь названиями классов абразивности по  $K_{ab}$ , были уточнены границы коэффициента абразивности  $LAC$  для каждого класса грунтов:

- 1) Весьма малоабразивные,  $LAC = 0 \dots 246$  ( $K_{ab} = 0 \dots 4,9$  мг);
- 2) Малоабразивные,  $LAC = 246 \dots 437$  ( $K_{ab} = 4,9 \dots 10$  мг);
- 3) Ниже средней абразивности,  $LAC = 437 \dots 628$  ( $K_{ab} = 10 \dots 18$  мг);
- 4) Средней абразивности,  $LAC = 628 \dots 819$  ( $K_{ab} = 18 \dots 29$  мг);
- 5) Выше средней абразивности,  $LAC = 819 \dots 1010$  ( $K_{ab} = 29 \dots 43$  мг);
- 6) Повышенной абразивности,  $LAC = 1010 \dots 1201$  ( $K_{ab} = 43 \dots 63$  мг);
- 7) Высоко абразивные,  $LAC = 1201 \dots 1392$  ( $K_{ab} = 63 \dots 88$  мг);
- 8) Высшей степени абразивности,  $LAC = 1392 \dots 1638$  ( $K_{ab} = 88 \dots 129$  мг).

Методика горнодобывающей и тоннелестроительной промышленности определяет скорость износа (Wear Rates ( $WR$ )) скоростью потери металла из инструмента, то есть количеством замен инструмента при разработке единицы объема породы. Величина, обратная скорости износа, – это буровой ресурс инструмента, выраженный в разработанных тысячах  $\text{м}^3$  породы на

одно эталонное изделие. Классификация скорости износа и её обратной величины – ресурса режущего инструмента состоит из 6 классов и приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Классификация скорости износа и ресурса режущего инструмента

Оценка скорости износа инструмента		Оценка ресурса инструмента	
количественно: шт. / тыс. м <sup>3</sup>	качественно:	количественно: тыс. м <sup>3</sup> породы / шт.	качественно:
< 0,5	очень низкая	> 2,0	очень высокий
0,5...0,7	низкая	1,5...2,0	высокий
0,7...1,0	средняя	1,0...1,5	средний
1,0...2,0	высокая	0,5...1,0	низкий
2,0...5,0	очень высокая	0,2...0,5	очень низкий
> 5,0	экстремально высокая	< 0,2	экстремально низкий

Так как классы с очень высокой и высокой скоростью износа имеют довольно широкие диапазоны, каждый из этих двух классов разделяется на два подкласса, чтобы получить такую же 8-разрядную классификацию для скорости износа дисков шарошек (Disk Wear Rates (*DWR*)), как и для абразивности грунтов (таблица 5).

Таблица 5 – Классификация скорости износа дисков *DWR* и коэффициентов абразивности  $K_{ab}$  и *LAC*

Оценка скорости износа инструмента		Оценка коэффициента абразивности $K_{ab}$ и <i>LAC</i>		
Количественно: <i>DWR</i> , шт. / тыс. м <sup>3</sup>	Качественно:	Количественно:		Качественно:
		$K_{ab}$ , мг	<i>LAC</i> , г/т	
< 0,5	очень низкая	0...4,9	0...246	весьма малоабразивные
0,5...0,7	низкая	4,9...10	246...437	малоабразивные
0,7...1,0	ниже средней	10...18	437...628	ниже средней абразивности
1,0...1,5	средняя	18...29	628...819	средней абразивности
1,5...2,0	выше средней	29...43	819...1010	выше средней абразивности
2,0...3,5 (гнейс до 3,9)	высокая	43...63	1010...1201	повышенной абразивности
3,5...5,0 (кварцит 4,6)	очень высокая	63...88	1201...1392	высоко абразивные
5,0...6,0	экстремально высокая	88...129	1392...1638	высшей степени абразивности

Таким образом, на основании таблицы 5 абразивные свойства грунтов каждого типа классифицируются по найденным соотношениям фактической

скорости износа дисковых шарошек щита ТПМК и лабораторных показателей абразивности по методу вращающейся крыльчатки, что позволяет прогнозировать износ режущего инструмента при щитовой проходке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прищепов В. В. Разработка метода оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 11 (специальный выпуск 21). — С. 3–26. DOI:10.25018/0236\_1493\_2025\_11\_21\_3.
2. Мазеин С. В., Прищепов В. В., Вознесенский А. С., Куткин Я. О. Разработка лабораторно-полевой классификации грунтов по коэффициентам абразивности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 10 (специальный выпуск 15). — С. 3–22. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_10\_15\_3.
3. Мазеин С. В., Прищепов В. В., Вознесенский А. С., Куткин Я. О. Взаимосвязь показателей абразивности скальных грунтов тоннельной проходки по методам вращающихся эталонов полого стержня и крыльчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 11–1. — С. 116—128. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_111\_0\_116.
4. Мазеин С.В., Вознесенский А.С., Прищепов В.В. Методы определения абразивности твердых горных пород при механизированной проходке протяженных тоннелей. Геотехника, Том XIV, № 3, с. 44-54, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2022-14-3-44-54>.
5. Мазеин С.В., Вознесенский А.С., Прищепов В.В. Прогноз абразивности грунтов при первичном износе режущего инструмента для строительства тоннелей большого сечения // Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения: сборник статей ОАО «Ленметрогипротранс» / под ред. М.О. Лебедева. — М.: Издательство «Перо», 2021. — с. 177-183.
6. Прищепов В.В., Лучакина М.Д. // Разработка метода оценки абразивных свойств грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 23-27 октября 2023 г. — М: ИПКОН РАН, 2023 — с. 79-82.

## Приложение К Справка о внедрении результатов диссертации



Акционерное общество  
«Научно-исследовательский,  
проектно-изыскательский институт  
«Ленметрогипротранс»



Россия, 191002  
Санкт-Петербург,  
Большая Московская ул., дом 2  
Телефоны: (812) 316-20-22, (812) 571-20-22  
Факс: (812) 712-52-52  
E-Mail: mail@lmgt.ru

01.12.25 № 3024-14-2156  
На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### Справка

Результаты диссертации Прищепова В. В. «Разработка метода оценки абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэrogазодинамика и горная теплофизика» в виде документа «Методические рекомендации по оценке абразивности скальных и дисперсных грунтов для прогнозирования износа режущего инструмента при щитовой проходке» представляют интерес для Акционерного общества "Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт "Ленметрогипротранс" (АО ЛМГТ) и предполагаются к практическому использованию.

Заместитель генерального директора  
по научно-исследовательской работе

Исполнитель: Исаев Ю.С.  
Тел./факс: 8 (812) 702-61-96

