

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

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Вознесенский Александр Сергеевич

Москва – 2026

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, четырех 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современного состояния в области методов оценки абразивных свойств скальных и дисперсных грунтов. Рассмотрена современная классификация грунтов, учитываемая при проходке с помощью ТПМК, проанализированы проблемы, возникающие у ТПМК из-за абразивности грунтов при проходке, проанализированы отечественные и зарубежные методы оценки абразивности.

Среди отечественных ученых, внесших вклад в развитие науки об абразивности горных пород и грунтов и их влияния на свойства режущих инструментов, следует отметить таких ученых, как Аверин Е.А., Арбузов М.Ю., Архипов А.Г., Барон Л.И., Власов С.Н., Вознесенский А.С., Жабин А.Б., Койфман М. И., Кузнецов А.В., Мазеин С.В., Меркин В.Е., Никоноров В.Б., Панкратенко А.Н., Поляков А.В., Чеботаев В.В., Щекудов Е.В. и других.

Среди зарубежных ученых в развитие данной темы свой вклад внесли Abu Bakar M. Z., Ahangari K., Alber M., Amoun S., Bagherpour R., Barzegari G., Bauer M., Bruland A., Butt I. A., Cai Z., Cardu M., Chakeri H., Cheshomi A., Dahl F., Darbor M., Duan L., Duan W., Frostad H.I., Frühwirt T., Goshtasbi K., Gou B., Hagan P., Hamidi J.K., Hamzaban M.T., Hashemnejad A., Hassanpour J., Holzhäuser J., Jakobsen P.D., Jalalian M.H., Kang Y., Karami B., Karami M., Kasling H., Khoshouei M., Khoshzaher E., Konietzky H., Li J., Li Q., Liu B., Lu Y.T., Macias F.J., Majeed Y., Michalakopoulos T., Mo J., Moradizadeh M., Murthy C.S.N., Najafi R., Nilsen B., Ozarslan A., Teymen A., Pietro, L.A., Raleigh P., Rostami J., Sadeghisorkhani H., Shahriar K., Sharifzadeh M., Singer J., Su P., Sun H., Tan S., Thuro K., Uromeihy A., Vardhan H., Wang X., Wei T., Yarali O., Ye L., Yu T., Zahiri G. M., Zare S., Zhang G., Zhang M., Zhao H., Zhao J., Zhou Z., Zhuo X.J., Zhu L. и другие.

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. Они подразделяются на следующие классы в соответствии с ГОСТ 25100-2020: скальные, дисперсные и мерзлые. Для данного исследования наибольшее значение имеют первые два. Абразивность влияет на износ инструмента, потребление энергии и время строительства и, следовательно, является важным параметром в горной и строительной инженерии.

Показано, что наибольшее распространение для оценки абразивности грунтов получили методы на основе износа полого вращающегося стержня (метод Л. И. Барона – А. В. Кузнецова), метод царапания заостренным стержнем (Cerchar), метод вращающейся крыльчатки (LCPC) и ряд других, которые разрабатывались, в основном, для оценки абразивности скальных грунтов. Их применение для оценки абразивности дисперсных грунтов недостаточно исследовано.

Необходимость дальнейшего исследования абразивности не только скальных, но и дисперсных грунтов, преобладание которых при проходке подтверждается опытом проведения данных работ, обуславливает перспективу и актуальность выбранной темы работы.

В заключении **первой главы** на основе анализа нерешенных вопросов осуществлена постановка задачи исследования, сформулированы ее цель и задачи, изложенные во Введении.

Вторая глава посвящена описанию лабораторного оборудования и методическому обеспечению исследований. 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 износа полого вращающегося стержня (метод 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 вращающейся крыльчатки (LCPC). В данной главе также проведен анализ типов грунтов, по которым осуществляется проходка тоннелей.

Метод Барона–Кузнецова основан на сверлении углубления в куске горной породы с помощью трубки диаметром 8 мм в течение 10 мин (с одной и другой стороны) при осевой нагрузке 150 Н и скорости вращения 400 об/мин. За критерий абразивности горной породы принимается выраженная в миллиграммах потеря в весе стержня за стандартное время испытаний. Тест предназначен для определения абразивности скальных горных пород в куске. Его применение для оценки абразивности дисперсированных грунтов и песков на сегодняшний день не предусмотрено.

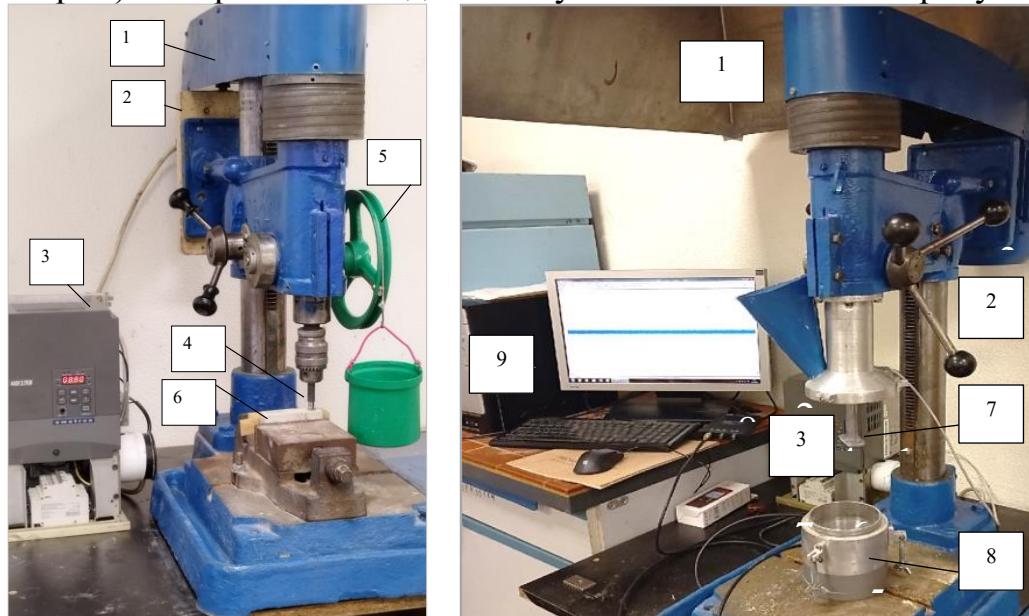
В варианте метода вращающегося полого стержня Л. И. Барона – А. В. Кузнецова внешний вид установки представлен на рисунке 1(а). Установка содержит сверлильный станок (1), электромотор (2), вариатор (3) для регулировки скорости вращения шпинделя станка, эталонный стержень из стали У8А (4), балансир (5) с грузом для создания заданного усилия вертикальной нагрузки на испытываемый стержень, испытываемый образец в тисках (6).

Показатель абразивности пород вычисляют 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.

Тест LCPC разработан во Франции в лаборатории Laboratoire Central des Ponts et Chausées (LCPC) и описан в Стандарте NF P 18-579. Данный метод известен в мире как метод LCPC (назван в честь разработавшей его лаборатории). В варианте метода LCPC установка показана на рисунке 1(б).



1 – сверлильный станок; 2 – электромотор; 3 – блок управления частотой вращения; 4 – эталонный стержень; 5 – балансир с грузом для создания заданного усилия вертикальной нагрузки; 6 – испытываемый образец в тисках; 7 – крыльчатка; 8 – сосуд для пробы; 9 – компьютер

Рисунок 1 – Два варианта лабораторной установки для исследования абразивности скальных грунтов – по методу Л. И. Барона – А. В. Кузнецова (а) и LCPC (б)

Установка для испытаний 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. Основная задача существующего

метода – это определение коэффициента *LAC* (LCPC-Abrasivity-Coefficient). Коэффициент *LAC* определяется, как отношение разницы массы крыльчатки до испытания и после к массе образца грунта, который принимал участие в эксперименте (экспериментальный образец). Измеряется данный коэффициент в г/т.

Помимо общих элементов (1 – 3), указанных на рисунке 1(а), вместо испытательного стержня и балансира здесь использована крыльчатка (7) из стали с твердостью HRB в диапазоне 60–75 и стальной сосуд (8) для пробы.

Коэффициент абразивности по методу вращающейся крыльчатки *LAC* рассчитывался как потеря веса крыльчатки за время дробления 5 мин, деленная на вес пробы (500 г) по формуле

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

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

*m*₀ – вес крыльчатки до испытания (г);

m – вес крыльчатки после испытания (г);

M – вес пробы (0,0005 т).

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).

На рисунке 2 представлены фото штуфов (скальных грунтов) известняков (а) и доломитов (б) для изготовления образцов из двух мест проходки ТПМК: станция метро Суворовская и БКЛ Рижская.

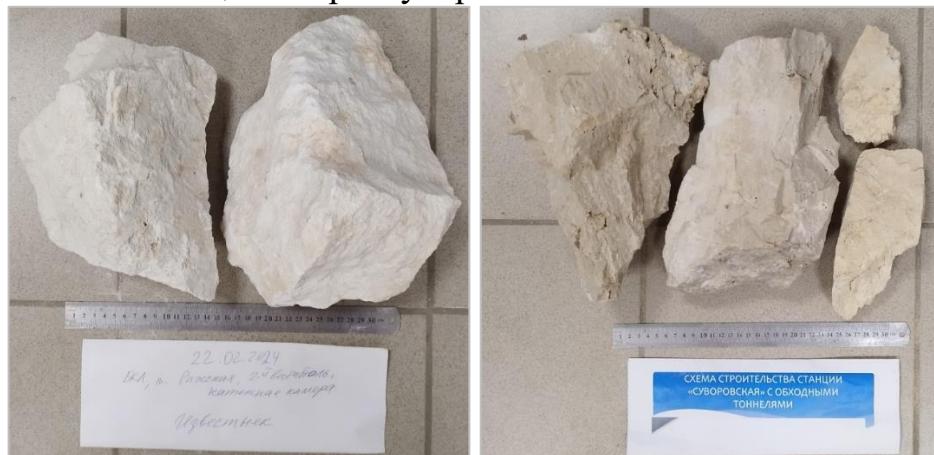


Рисунок 2 – Штуфы для изготовления образцов из двух мест проходки ТПМК: известняков со станции БКЛ «Рижская» (а) и доломитов со станции метро «Суворовская» (б)

На рисунке 3 представлены кварцевый песок различной крупности (а) и песок одного из карьеров Московской области (б) для подготовки испытуемых смесей с разным содержанием кварца и крупностью частиц.



(а)

(б)

Рисунок 3 – Кварцевый песок различной крупности (а) и песок одного из карьеров Московской области (б) для подготовки испытуемых смесей с разным содержанием кварца и крупностью частиц

Содержание кварца осуществлялось с помощью рентгенофазового анализа методом рентгеновской дифрактометрии на компьютеризированном дифрактометре рентгеновском «ADP2 – 01» с использованием Fe K α излучения.

Анализ показал, что объемы проходки в дисперсных грунтах значительно превышают объемы проходки в скальных грунтах. А метод вращающейся крыльчатки позволяет произвести оценку абразивности как скальных, так и дисперсных грунтов.

Третья глава посвящена исследованию взаимосвязей прочностных свойств, размеров кусков и зерен скальных грунтов, а также размеров зерен и содержания кварца в дисперсных грунтах с абразивностью.

Для определения предела прочности при сжатии изготавливались кубические образцы 40×40×40 мм±2 мм в количестве 6 штук, представленные на рисунке 4.



(а)

(б)

Рисунок 4 – Фото образцов известняка (а) со станции Рижская БКЛ и образцов доломита (б) 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 $\varnothing 40 \times 40 \pm 2$ мм в количестве 6 штук, представленные на рисунке 5.



Рисунок 5 – Фото образцов известняка (а) со станции Рижская БКЛ и образцов доломита со станции Суворовская до испытаний на предел прочности при растяжении

Результаты определения средних значений пределов прочности при сжатии и растяжении приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Прочностные свойства известняков и доломитов

Место отбора, станция метро	Скальный грунт	Предел прочности при сжатии			Предел прочности при растяжении, МПа		
		Среднее, МПа	С.к.о., МПа	К-т вариации	Среднее, МПа	С.к.о. МПа	К-т вариации
«Рижская»	Известняк	16,25	2,41	0,148	2,7	0,29	0,107
«Суворовская»	Доломит	74,14	20,54	0,277	8,38	3,05	0,360

Испытания по методу врачающегося полого стержня производились на обрезках штуфов, оставшихся при подготовке образцов скальных пород для определения пределов прочности. Определение абразивности породы производилось «сверлением» образца породы предварительно взвешенным эталонным стержнем в течение 10 мин одним торцом стержня, а затем в течение также 10 мин – другим. Абразивность в миллиграммах определялась как полусумма потери веса эталонного стержня за оба «сверления».

Для испытаний по методу врачающейся крыльчатки обрезки штуфов дробились, и с помощью ситового анализа выделялась фракция с размерами от 6,3 до 4,0 мм. Перед основным испытанием измерялся вес крыльчатки размером 25×50 мм и толщиной 5 мм из стандартизированной стали с твердостью по Роквеллу $HRB\ 60-75$. После включения испытательной установки дробленая проба засыпалась в сосуд, в котором производилось дальнейшее измельчение пробы в течение 5 мин с помощью врачающейся крыльчатки и повторное взвешивание пробы. Вращение крыльчатки осуществлялось со скоростью 4500 об/мин.

По методу износа полого вращающегося цилиндра (Л. И. Барона – А. В. Кузнецова) было испытано по 3 образца, на каждом образце произведено по 5 двойных измерений, всего 15 измерений. Усредненные результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний коэффициента абразивности K_{ab} по методу износа полого вращающегося стержня (Л. И. Барона – А. В. Кузнецова)

Скальный грунт	Среднее \bar{K}_{ab} , мг	СКО, мг	Коэф-т вариации K_v
Известняк	1,13	0,42	0,37
Доломит	2,13	0,70	0,33

По методу вращающейся крыльчатки (*LCPC*) было испытано по 6 проб известняка и доломита. Усредненные результаты испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициент абразивности *LAC*

Скальный грунт	Среднее <i>LAC</i> , г/т	СКО, г/т	Коэф-т вариации K_v
Доломит	47	20,58	0,443
Известняк	20	10,63	0,527

Как следует из представленных результатов, исследованные скальные грунты не выходят за пределы I класса абразивности согласно классификации горных пород по абразивности по Л. И. Барону и А. В. Кузнецова, т. е. обладают наименьшей абразивностью. Следующий II класс абразивности начинается с 6 мг.

*Особенности взаимосвязей показателя *LAC* с другими свойствами скальных грунтов*

Полученная зависимость *LAC* от предела прочности при сжатии σ_{UCS} (*UCS*, uniaxial compressive strength) для известняка и доломита представлена на рисунке 6.

Зависимость показателя *LAC* описывается формулой $LAC = 16,43 + 0,59\sigma_{UCS}$ [г/т] при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,94$.

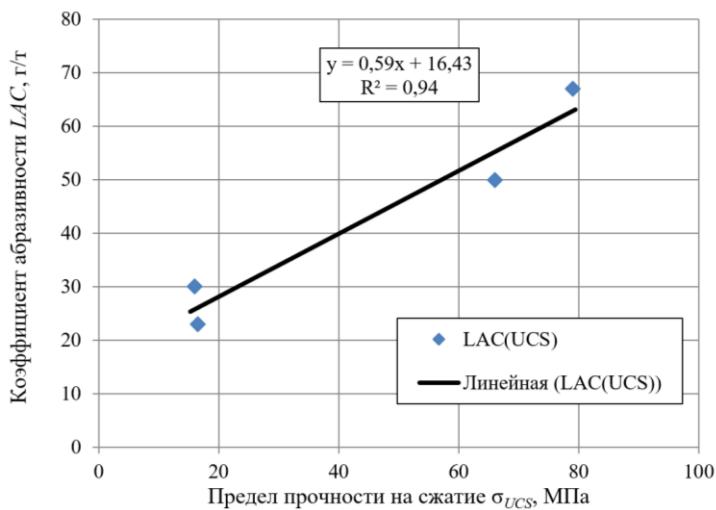


Рисунок 6 – Зависимость LAC от предела прочности при сжатии σ_{UCS} для известняка и доломита

Аналогичная зависимость LAC от предела прочности при растяжении σ_{UTS} (UTS , uniaxial tensile strength) для известняка и доломита аппроксимируется формулой $LAC(\sigma_{UTS}) = 6,91 + 6,22 \sigma_{UTS}$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,97$ (рисунок 7).

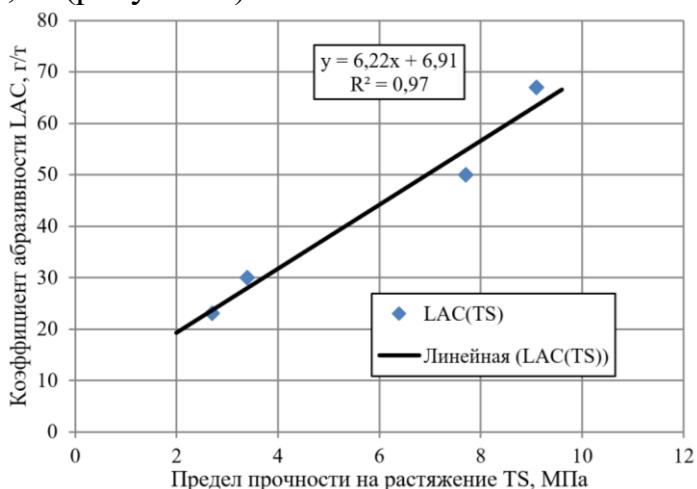


Рисунок 7 – Зависимость LAC от предела прочности при растяжении σ_{UTS} для известняка и доломита

Данные связи демонстрируют прямые пропорциональные зависимости LAC от прочности известняка и доломита, причем с пределом прочности на растяжение наблюдается более сильная взаимосвязь LAC и σ_{UTS} ($R^2 = 0,97$). Это дает возможность прогноза абразивности данных типов пород по их прочностным показателям.

На рисунке 8 представлена зависимость LAC от среднего размера $D50$ куска известняка и доломита в исходной пробе.

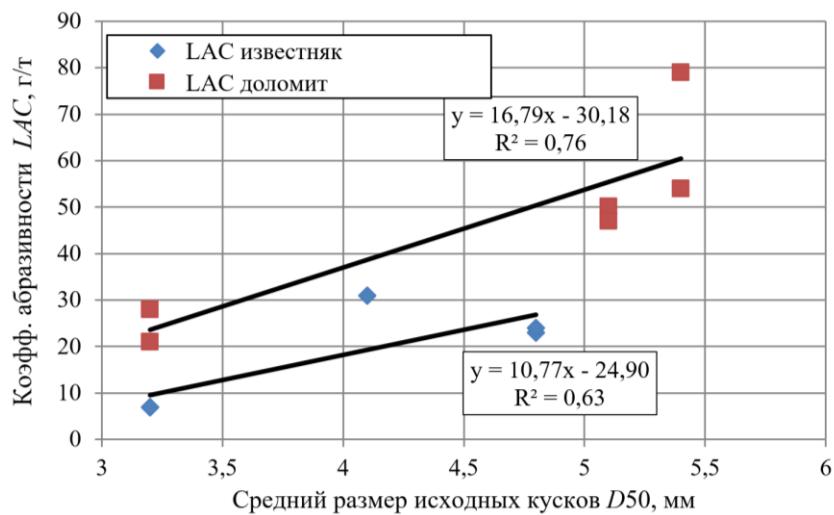


Рисунок 8 – Зависимость LAC от среднего размера D исходных кусков известняка и доломита

График на рисунке 8 применительно к доломиту показывает, что при увеличении среднего размера исходного куска с 3,2 мм до 5,1 мм показатель абразивности LAC повышается в 2,5 раза. Этот график применительно к известняку показывает, что при увеличении среднего размера исходного куска с 3,2 мм до 4,8 мм показатель абразивности LAC повышается в 2,6 раза.

В заключение анализа результатов испытаний скальных грунтов по данным испытаний абразивности по методам вращающегося полого стержня и крыльчатки была построена зависимость показателя абразивности LAC от коэффициента абразивности K_{ab} (рисунок 9).

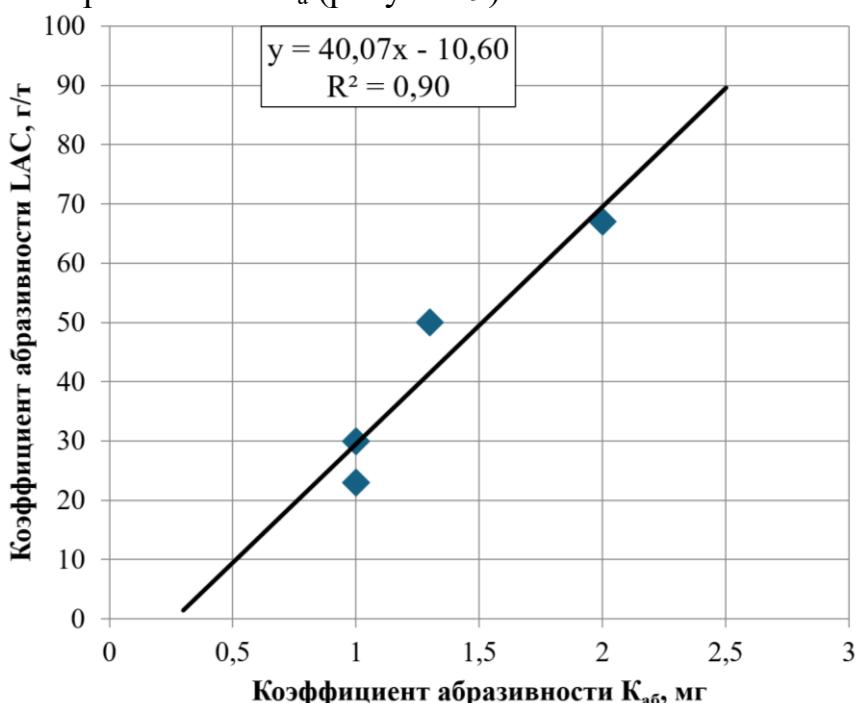


Рисунок 9 – Зависимость LAC от K_{ab}

С достаточной точностью ($R^2 = 0,9$ для зависимости, построенной по четырем парным опытам) можно в пределах $LAC = 2 \dots 70$ г/т представить следующее выражение для функции:

$$LAC = 40,1K_a - 10,6, [\text{г/т}] \quad (3)$$

Далее были испытаны на абразивность пробы 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.

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 τ 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 10 и 11).

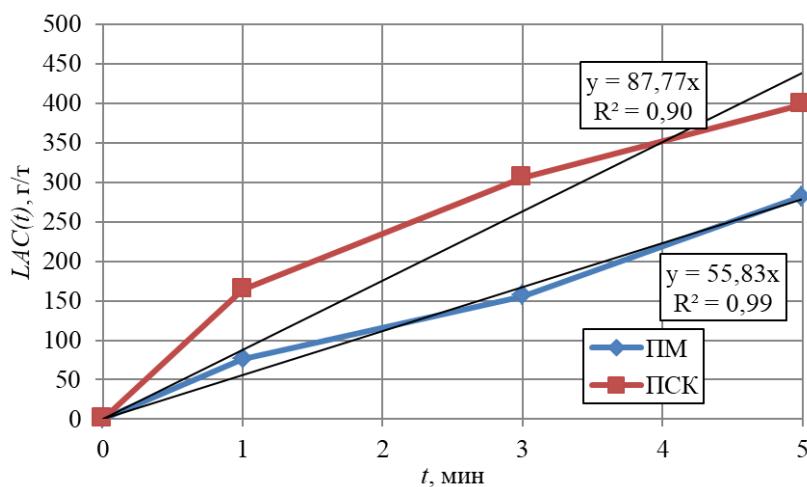


Рисунок 10 – Зависимость $LAC(t)$ от времени опыта на пробах карьерного песка ПСК и ПМ

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).

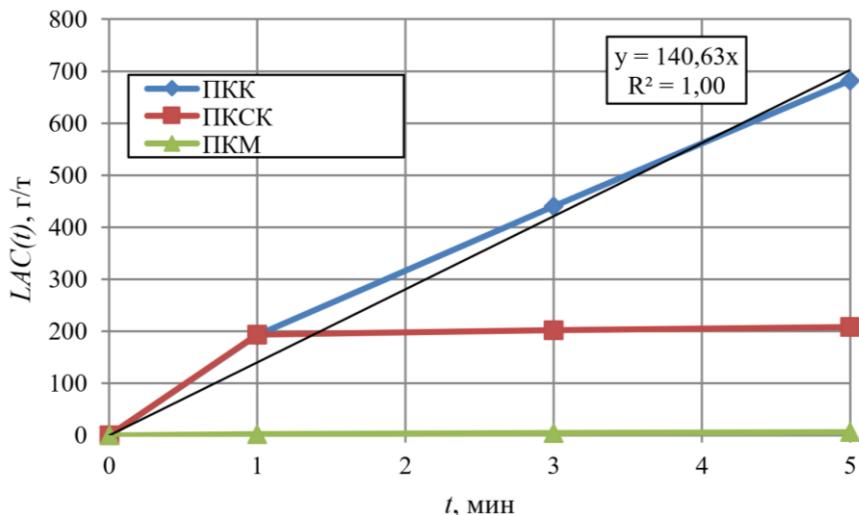


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента $LAC(t)$ от времени опыта на пробах кварцевого песка крупного (ПКК), средней крупности (ПКСК) и мелкого (ПКМ)

Образцы карьерного песка различных фракций показывают затухание роста LAC от времени опыта (рисунок 12).

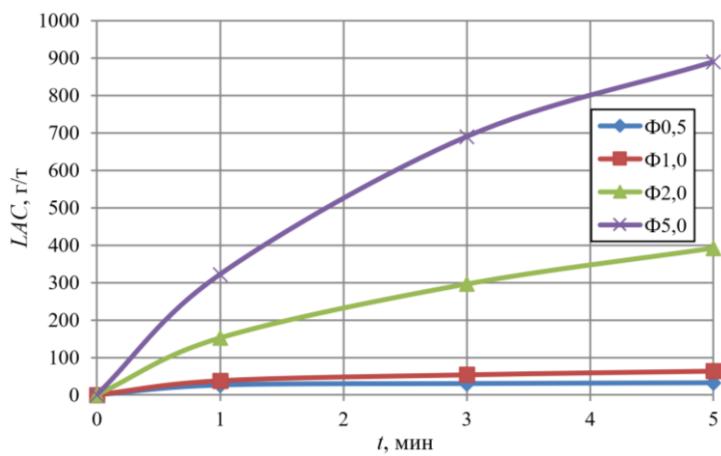


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента $LAC(t)$ от времени опыта на пробах узких фракций карьерного песка: 0,25-0,5-1 мм (Ф0,5); 0,5-1-2 мм (Ф1,0); 1-2-5 мм (Ф2,0); 2-5-10 мм (Ф5,0)

Конечный LAC для фракции Ф0,5 – 32 г/т, для фракции Ф1,0 – 64 г/т, для фракции Ф2,0 – 392 г/т, для фракции Ф5,0 – 890 г/т.

На рисунке 13 представлены полученные зависимости LAC от среднего размера $D50$ зерна песков и модуля крупности MK в исходной пробе.

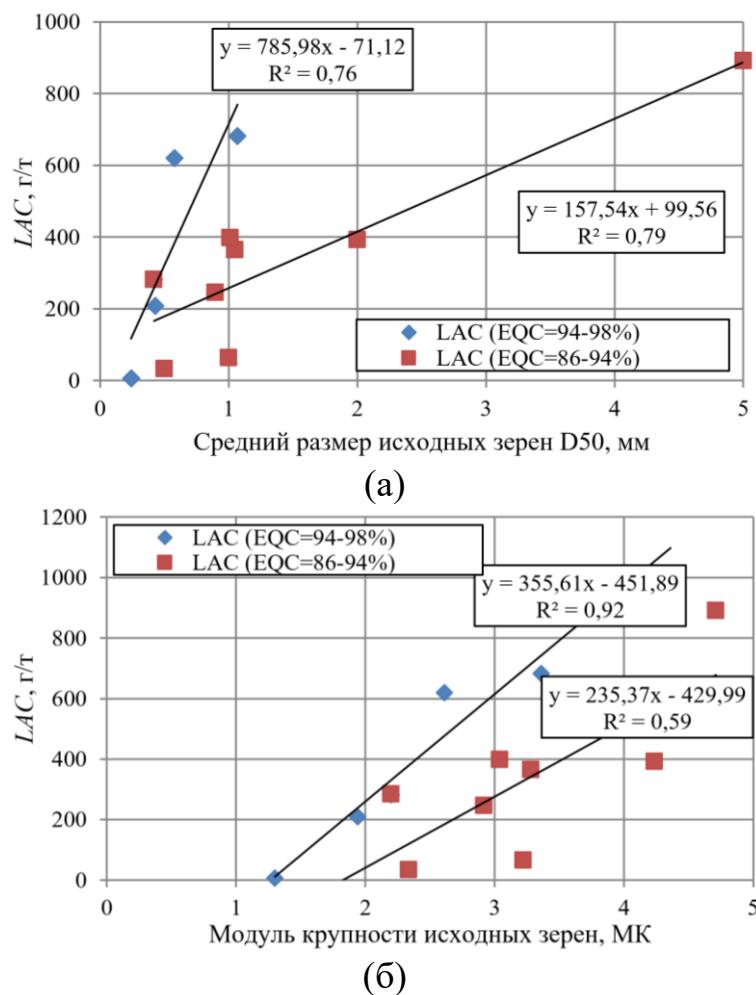


Рисунок 13– Зависимость LAC от среднего размера $D50$ (а) и от модуля крупности МК (б) исходных зерен песков

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 $MK = 3$ повышение эквивалентного содержания EQC с 90% до 96% приводит к увеличению показателя абразивности LAC с 270 г/т до 600 г/т.

Приведенные результаты подтверждают обоснованность и достоверность первого научного положения.

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей взаимодействия режущего инструмента с дисперсными грунтами. По результатам проведения ситового анализа проб песка были построены интегральные гранулометрические кривые. Пример построенной кривой представлен на рисунке 14.

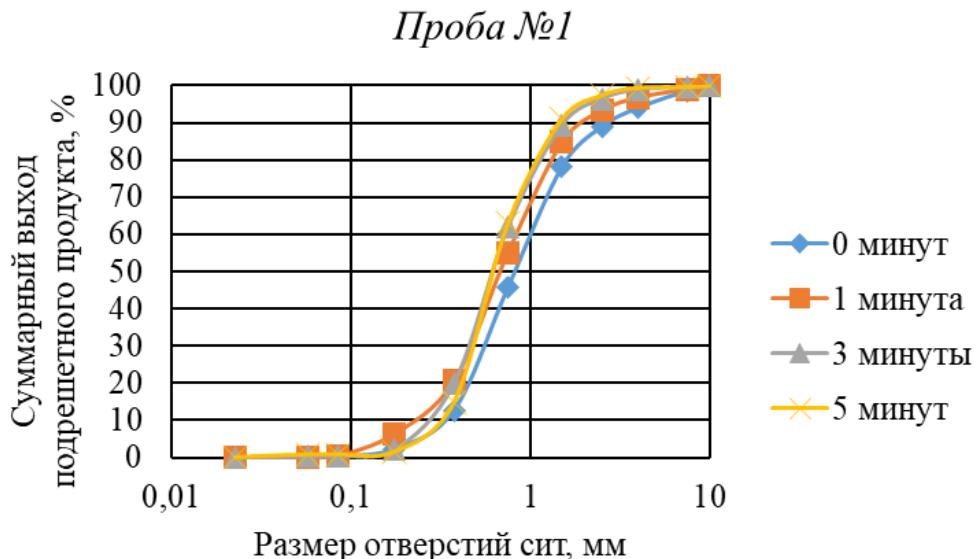


Рисунок 14 – Интегральная гранулометрическая кривая до начала, после первой, третьей и пятой минут испытаний соответственно

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 , рассчитанного с учетом положений ГОСТ 8736–2014. Было установлено, что 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 зёренами 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.

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

Данные ситового анализа были внесены в специальную форму, которая представляет собой таблицу сопряженностей трех признаков – размера отверстий сит d с относительной частотой $P(d)$ и кумулятивной относительной частотой $F_n(d)$ попадания размеров частиц при их проходе

через сита в интервалы, определяемые размерами отверстий. Уменьшению размера отверстий соответствует уменьшение кумулятивной частоты $F_{\text{п}}(d)$.

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

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.

На рисунке 15 для примера в графическом виде показаны полигоны кумулятивных относительных частот результатов для первой пробы, по сути, представляющих собой выборочные функции распределения $F(d)$ случайной величины – диаметра d частиц пробы с указанием уровней 50 и 65%, учитываемым в некоторых методиках оценки абразивности.

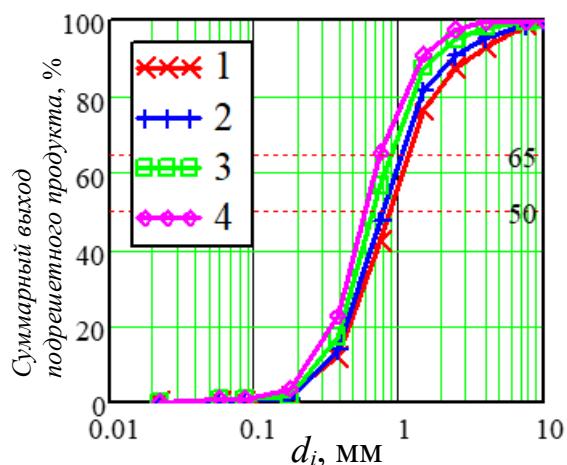
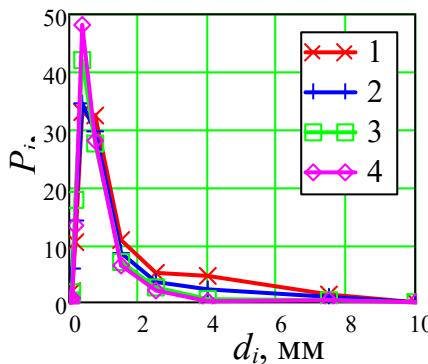
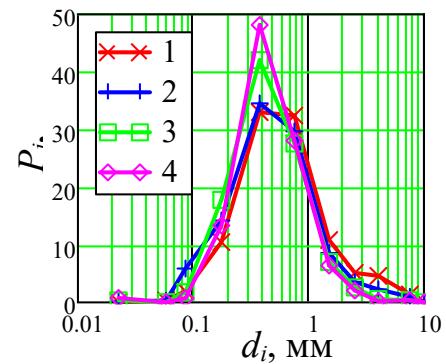


Рисунок 15 – Функция распределения размера частиц при оценке по просыпанию пробы $F_{\text{п}}(d_i)$ без обработки пробы (1) и в зависимости от времени обработки в течение 1 (2), 3 (3), 5 (4) минут с уровнями 50 и 65%

На рисунке 16 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 16(б) ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе.



а



б

Рисунок 16 – Полигоны относительных частот по интервалам размеров при времени обработки проб 0, 1, 3, 5 минут, кривые 1, 2, 3, 4 приведены соответственно в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах оси абсцисс

Результаты анализа форм кривых по всем шести пробам показали, 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.

На основании полученных данных были построены гистограммы распределения, которые характеризуют плотность распределения вероятностей.

Пример построения гистограммы распределения представлен на рисунке 17.

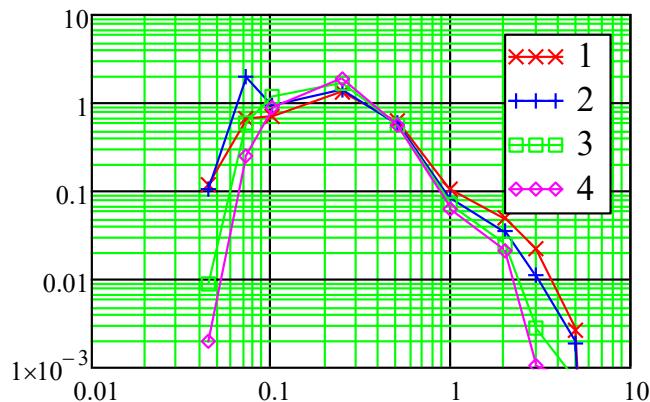


Рисунок 17 – Гистограмма выборочных плотностей вероятности для первой пробы без обработки (1) и с обработкой 1 (2), 3 (3) и 5 (4) минут в виде полигона в двойном логарифмическом масштабе

Анализ гистограмм плотностей вероятности показал, что увеличение времени обработки приводит к сужению распределений плотностей вероятностей и увеличению их моды.

Подбор вида распределения вероятностей осуществлялся для четырех аналитических функций:

– нормального распределения

$$f_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где x – случайная величина (в данном случае диаметр частиц d), μ , σ – среднее и среднеквадратическое отклонение случайной величины соответственно;

– логнормального распределения

$$f_2(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где параметры обозначены аналогично нормальному распределению;

– распределение Рэлея:

$$f_3(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

где σ – параметр распределения;

– гамма-распределение:

$$f_4(x) = \frac{x^{m-1} \exp(-x/\alpha)}{\alpha^m \Gamma(m)}, \quad (7)$$

где $\Gamma(m)$ – гамма-функция

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

где m , α – параметры распределения;

– распределение Вейбулла:

$$f_5(x) = \beta \frac{t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-\frac{(t/\eta)^\beta}{\beta}}, \quad (8)$$

где β – параметр формы распределения Вейбулла;

η – параметр масштаба распределения Вейбулла.

Для обработки данных была написана программа в среде MathCAD.

Подбор значений коэффициентов уравнений (4)–(8) методом наименьших квадратов для исходной (первой) пробы дает значения:

$\mu = 0.479$; $\sigma = 0.341$ для распределения (4);

$\mu = -0.627$; $\sigma = 0.918$ для распределения (5);

$\sigma = 0.401$ для распределения (6);

$m = 2.062$; $\alpha = 0.293$ для распределения (7);

$\beta = 1.616$; $\eta = 0.655$ для распределения (8).

Также для оценки качества аппроксимации были рассчитаны остатки Z_i , максимальные значения Z_{max} и среднеквадратические отклонения σ_Z .

По результатам анализа полученных результатов был сделан выбор логнормального распределения вида (5), для которого параметры Z_{max} и σ_Z минимальны, а параметр R^2 , известный как коэффициент детерминации, максимальен в сравнении с другими распределениями.

Зависимости параметров $\exp(\mu)$ (1) и σ (2) логнормального распределения от времени обработки представлены на рисунке 18.

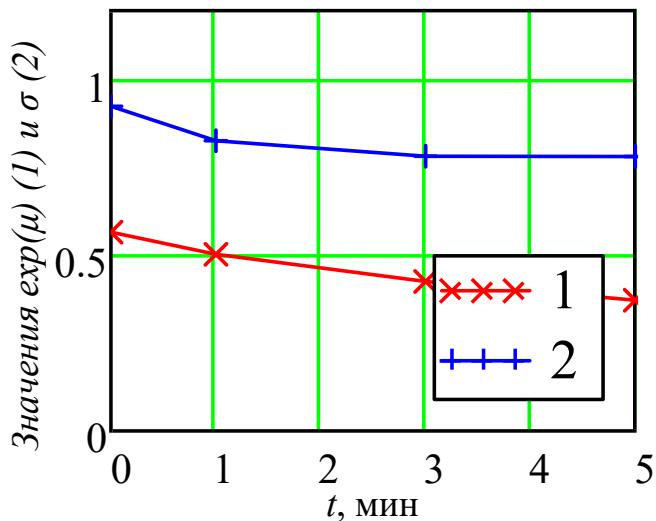


Рисунок 18 – Графики изменения параметров $\exp(\mu)$ (1) и σ (2) логнормального распределения в зависимости от времени обработки пробы

Таким образом распределение размеров частиц при дроблении скальных и дисперсных грунтов удовлетворительно описывается логнормальным распределением, значения параметров которого уменьшаются с увеличением времени обработки пробы в лабораторной установке (рисунок 18), что может служить для оценки абразивности грунтов, поскольку параметры непосредственно связаны с показателями абразивности по методу вращающейся крыльчатки, что подтверждает обоснованность и достоверность **второго научного положения**.

Пятая глава включает в себя разработку 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*).

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 ($c = 1$ мм).

Установлено, что соотношение коэффициента абразивности LAC и индекса абразивности CAI значимо описывается формулой линейной зависимости с коэффициентом корреляции $R = 0,91$:

$$LAC = 273 \times CAI, \text{ г/т} \quad (9)$$

Благодаря полученной формуле существует возможность оценки абразивности горных пород одного и того же минерального состава как в скальном куске, так и в сыпучей раздробленной массе.

Также была выявлена зависимость между CAI и коэффициентом абразивности, определяемым методом вращающегося полого стержня K_{ab} :

$$K_{ab} = 0,40 \times CAI \times CAI \times CAI - 0,39 \times CAI \times CAI + 4,80 \times CAI \quad (10)$$

Формула (10) наиболее точно описывает сходство результатов K_{ab} и CAI для испытаний грунтов как меньшей, так и высшей степени абразивности (рисунок 19).

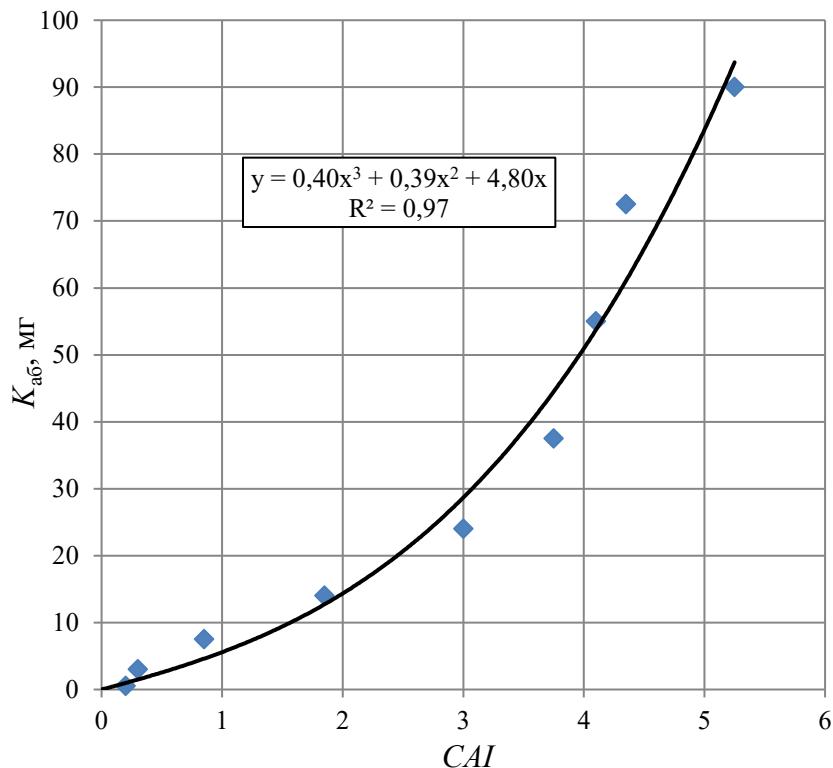


Рисунок 19 – Зависимость между коэффициентом абразивности K_{ab} и индексом абразивности CAI

Таким образом, формулы (9) и (10) позволяют связать между собой коэффициенты абразивности K_{ab} , CAI и LAC , определяемые соответствующими лабораторными методами, и вывести универсальную табличную 8-разрядную классификацию абразивности грунтов.

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 полученных данных границ коэффициента абразивности LAC и K_{ab} для каждого класса грунтов и данных классификации скорости износа и ресурса режущего инструмента была получена 8-разрядная классификация для скорости износа дисков шарошек (Disk Wear Rates (DWR)) (таблица 4).

Таблица 4 – Классификация скорости износа дисков DWR и коэффициентов абразивности K_{ab} и LAC

Оценка скорости износа инструмента		Оценка коэффициента абразивности K_{ab} и LAC		
Количественно: DWR , шт. / тыс. м ³	Качественно:	Количественно:		Качественно:
		K_{ab} , мг	LAC , 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

Также был проведен статистический анализ замен режущего инструмента, в частности дисковых шарошек и соответствующих им режущих дисков, на 25 интервалах проходки 7-ми ТПМК, работавших на строительстве тоннелей метро в Москве и Санкт-Петербурге.

По результатам анализа данных и проведенных испытаний была составлена таблица, включающая скорость износа дисков в зависимости от типа грунта и представлен коэффициент абразивности LAC для каждого типа грунта. По результатам таблицы построен график зависимости скорости износа дисков DWR , шт./тыс. м³ от коэффициента абразивности LAC , кг/т, дающий возможность прогнозирования скорости износа дисков от лабораторного показателя абразивности LAC (рисунок 20).

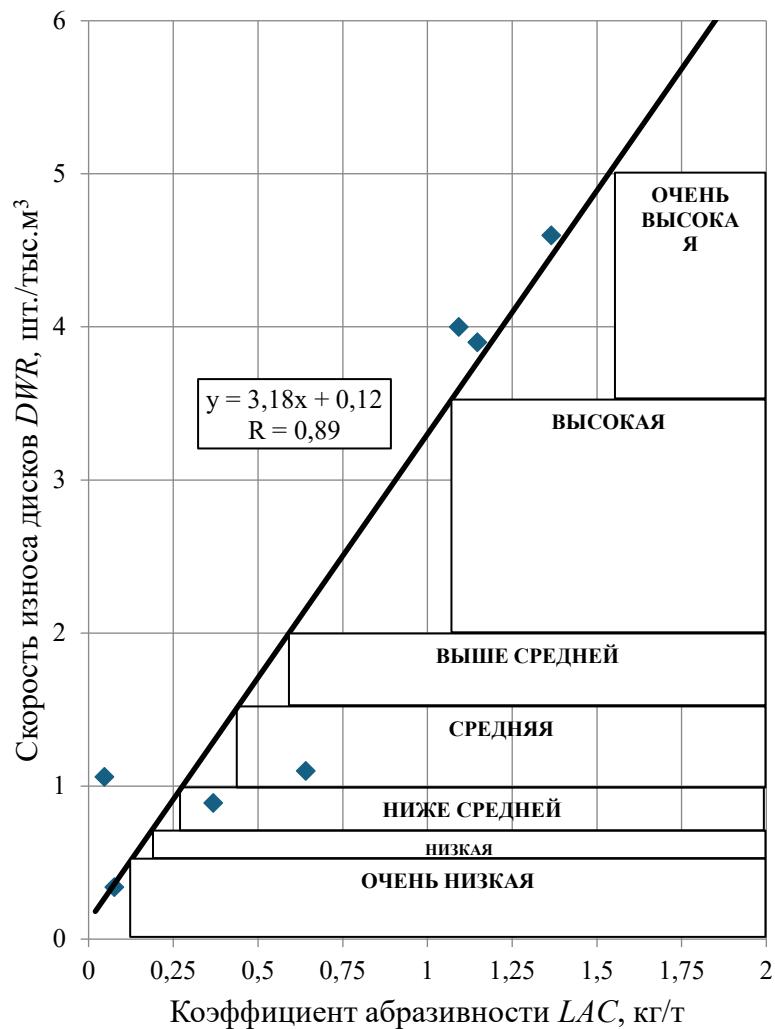


Рисунок 20 – Прогнозная зависимость скорости износа дисков шарошек DWR от показателя абразивности LAC

Таким образом, подтверждается обоснованность и достоверность третьего научного положения.

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.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и входящих в международную систему цитирования SCOPUS

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.

В других изданиях

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.