

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Ячейкин Алексей Игоревич



ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ПАРАМЕТРОВ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ БОЛЬШОГО
ДИАМЕТРА ДЛЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ШАХТ
МЕТРОСТРОЯ СПб

Специальность 05.05.06 - Горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Юнгмейстер Д.А.

Санкт-Петербург - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МЕТРО В УСЛОВИЯХ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН.....	12
1.1 Горно-геологические условия шахт Метростроя г. Санкт-Петербурга..	12
1.2 Анализ тоннелепроходческой техники	16
1.2.1 Анализ щитовых проходческих комплексов.....	16
1.2.2 Анализ специальных проходческих комплексов на базе комбайнов избирательного действия	20
1.3 Анализ конструкций породоразрушающего инструмента исполнительных органов тоннелепроходческих щитов.....	24
1.4 Анализ методик расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита	29
1.5 Анализ применения тоннелепроходческого щита в горно-геологических условиях Санкт-Петербурга	35
1.6 Выводы по первой главе.....	39
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН С ТВЕРДЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ РЕЗЦОВЫМ, ШАРОШЕЧНЫМ И ВИБРОАКТИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ	41
2.1 Анализ процесса разрушения горных пород резцовым породоразрушающим инструментом	41
2.2 Анализ процесса разрушения горных пород шарошечным породоразрушающим инструментом	47
2.3 Схема расстановки породоразрушающего инструмента на роторном	

исполнительном органе тоннелепроходческого щита	52
2.4 Определение рациональной величины подачи исполнительного органа, усилий на резцовом и шарошечном породоразрушающем инструменте, а также установление критических моментов на исполнительном органе тоннелепроходческого щита	58
2.5 Теоретическое обоснование прироста величины внедрения дисковых шарошек в породу при наложении на них ударных нагрузок	64
2.6 Выводы по второй главе	68
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН С ТВЕРДЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ ВИБРОАКТИВНЫМ И РЕЗЦОВЫМ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ	69
3.1 Постановка задач экспериментальных исследований	69
3.2 Стенд для исследования процесса разрушения кембрийской глины и известняка виброактивным породоразрушающим инструментом	69
3.3 Разработка методики проведения экспериментальных исследований ...	71
3.3.1 Цели и задачи экспериментальных исследований	71
3.3.2 Исходные данные	71
3.3.3 Методика проведения эксперимента	73
3.4 Подготовка и последовательность проведения испытаний	74
3.5 Результаты стендовых исследований виброактивного разрушения кембрийской глины	77
3.6 Результаты стендовых исследований виброактивного разрушения известняка	80
3.7 Обработка результатов эксперимента	84
3.8 Экспериментальные исследования процесса разрушения кембрийской	

глины резанием с отделением элементарных сколов	90
3.9 Методика проведения экспериментальных исследований процесса разрушения кембрийской глины резанием с отделением элементарных сколов.....	91
3.10 Результаты экспериментальных исследований процесса разрушения кембрийской глины резанием с отделением элементарных сколов	92
3.11 Выводы по третьей главе.....	94
ГЛАВА 4 ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО ЩИТА ДЛЯ УСЛОВИЙ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН С ТВЕРДЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ.....	95
4.1 Конструкция исполнительного органа тоннелепроходческого щита оснащенного виброактивными породоразрушающими инструментами	95
4.2 Принцип работы тоннелепроходческого комплекса с виброактивными шарошками.....	98
4.3 Методика расчета рациональной величины подачи исполнительного органа, усилий на породоразрушающем инструменте, и крутящего момента на исполнительном органе тоннелепроходческого щита	100
4.4 Обоснование рациональной схемы резания и рекомендуемая модификация исполнительного органа.....	103
4.5 Методика расчета производительности тоннелепроходческого щита при разрушении комбинированного породного массива	106
4.6 Техничко-экономическое обоснование целесообразности применения нововведений	110
4.7 Выводы по четвертой главе.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы ...	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Документы, подтверждающие техническую новизну разработки.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ В Определение технико-экономических показателей.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Метрополитен Санкт-Петербурга является самым глубоким в мире, что связано с особенностями горно-геологических условий. Строительство тоннелей на малых глубинах считается неблагоприятным в виду расположения здесь обводненных суглинков с включениями гранитных валунов. Поэтому строительство большинства тоннелей осуществляется на глубинах 50-70 метров, где залегают кембрийские глины с прослойками известняков и песчаников.

Проходка тоннелей в таких горно-геологических условиях характеризуется недостаточной эффективностью разрушения твердых прослоек исполнительными органами тоннелепроходческих щитов, которая проявляется в росте крутящего момента на исполнительном органе, повышенном расходе породоразрушающего инструмента, снижении скорости подачи исполнительного органа на забой и, как следствие, в низкой скорости проходки тоннеля.

Для повышения эффективности разрушения неоднородного массива необходима разработка, изготовление и внедрение в производственные процессы Санкт-Петербургского Метростроя исполнительных органов с активным породоразрушающим инструментом.

Поэтому актуальной задачей является решение проблемы разрушения неоднородного массива методами классического резания и комбинированного метода, заключающегося в виброударном разрушении, для создания конструкции исполнительного органа, принципа его работы, уточнённой методике силового расчета, а также для обоснованной оценки технических показателей при его работе в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга.

Степень разработанности темы исследования.

Большой вклад в изучение вопросов, связанных с созданием

виброактивных исполнительных органов и породоразрушающих инструментов, внесли ученые: В.А. Бреннер, И.П. Кавыршин, В.А. Кутлунин, В.Б. Струков, И.Г. Шмакин.

На тему создания виброактивных исполнительных органов выполнено большое количество публикаций, а также создано несколько опытных образцов на базе проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом, показавших высокую эффективность разрушения образцов породы. Однако опытные образцы имели существенные недостатки, связанные со сложностью конструкции и неприменимостью их в сложных горно-геологических условиях. Поэтому создание виброактивного породоразрушающего инструмента для роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Цель исследования:

Обоснование рациональных конструкций и режимов работы исполнительного органа тоннелепроходческого щита с режущим и виброактивным породоразрушающим инструментом, обеспечивающих повышение скорости проходки перегонных тоннелей в неоднородном массиве, включающем слои кембрийской глины и известняка.

Идея исследования:

Для повышения скорости проходки перегонных тоннелей в неоднородном горном массиве, включающем слои кембрийской глины и известняка, необходимо на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита устанавливать виброактивные породоразрушающие инструменты, позволяющие интенсифицировать процесс разрушения неоднородного массива.

Задачи исследования:

1. Провести анализ известных конструкций и недостатков работы исполнительных органов тоннелепроходческих щитов.

2. Провести теоретические исследования по выявлению закономерностей глубины внедрения шарошек от величины осевого усилия и ударной нагрузки, а также разработать методику силового расчета исполнительного органа.

3. Создать экспериментальный стенд, провести исследования по обоснованию рациональных параметров исполнительного органа тоннелепроходческого щита, в том числе оснащённого виброактивными породоразрушающими инструментами.

4. Обосновать конструкцию исполнительного органа с оптимальной схемой расстановки резцов, в том числе оснащённого виброактивным породоразрушающим инструментом для горно-геологических условий Санкт-Петербургского Метростроя и разработать уточнённую методику по его силовому расчету.

Методология и методы исследования

В работе используется комплексный метод исследований, включающий анализ теорий разрушения горных пород резанием и ударным способом, лабораторные исследования виброактивных шарошек для разрушения кембрийской глины и известняка, а также лабораторные исследования резания кембрийской глины одиночным резцом.

Научная новизна:

Установлена линейная зависимость повышения скорости проходки тоннелей проходческим щитом с установленными на его роторном исполнительном органе виброактивными шарошками в совокупности с их рациональной расстановкой совместно с резцами и уточненным режимом работы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Увеличение глубины внедрения активной шарошки в 1,2 раза в образец кембрийской глины и не менее чем в 1,3 раза в образец известняка, при наложении на нее ударной нагрузки, причем величина глубины

внедрения от осевого усилия при постоянной прикладываемой энергии удара, интерпретируется линейной зависимостью, а величина глубины внедрения от энергии удара при постоянном осевом усилии - экспоненциальной зависимостью.

2. Оснащение роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита виброактивными шарошками при модернизированной схеме их расстановки совместно с резцами позволяет увеличить скорость проходки тоннеля по массивам, состоящим из кембрийской глины и прослоек известняка не менее чем на 20 %, за счет роста зон напряжения на забое и интенсификации его разрушения, причем фактические показатели проходки необходимо определять на основе силовой характеристики и графика зависимости производительности от скорости подачи исполнительного органа.

Практическая значимость работы:

1. Разработано конструктивное решение виброактивного исполнительного органа тоннелепроходческого щита, защищенное патентным свидетельством;

2. Разработана конструкция стенда для исследования процесса разрушения кембрийской глины с прослойкой известняка виброактивными шарошками;

3. Разработаны рекомендации по выбору рационального режима работы тоннелепроходческого щита, при проходке тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга;

4. Разработана уточненная методика расчета исполнительного органа тоннелепроходческого щита, оснащенного виброактивными шарошками.

Реализация результатов работы.

Результаты исследований приняты к внедрению открытым акционерным обществом по строительству метрополитена в Санкт-

Петербурге Управлением Механизации – филиалом «Метрострой» (УМ – филиал ОАО «Метрострой»).

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018» (г. Санкт-Петербург, 2018, 2019, 2020); международной конференции во Фрайбергской горной академии (Германия, г. Фрайберг, 2018); XVII, XVIII Международных научно-технических конференциях «Чтения памяти В.Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2019, 2020).

Личный вклад автора. Сформулированы цель и задачи исследований. Произведен анализ теорий разрушения горных пород методами классического резания и ударного разрушения. Разработаны методики экспериментальных исследований. Спроектированы и изготовлены экспериментальные стенды, проведены экспериментальные исследования процессов разрушения кембрийской глины и известняка дисковыми шарошками с накладываемой на них ударной нагрузкой. Предложена конструкция роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита, оснащенного виброактивными шарошками совместно с усовершенствованной схемой расстановки породоразрушающего инструмента, а также методика его силового расчета.

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 13 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в издании из Перечня ВАК и входящей в международную базу данных и систему цитирования Scopus, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и в систему цитирования Scopus.

Получен 1 патент.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, общим объемом 135 страниц печатного текста, содержит 21 таблицу и 60 рисунков, список литературы из 116 наименований, 3 приложения.

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МЕТРО В УСЛОВИЯХ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН

1.1 Горно-геологические условия шахт Метростроя г. Санкт-Петербурга

В последнее время все больше внимания уделяется строительству городского подземного транспорта – метрополитену. На сегодняшний день невозможно представить ни один крупнейший мегаполис без такого вида транспорта. Объясняется это большими преимуществами метрополитена перед другими видами городского наземного транспорта. К основным преимуществам можно отнести снижение занимаемой надземной территории, быстрота транспортного сообщения – возможность быстро добраться до любой точки города, снижение влияния надземной застройки на исторический и архитектурный облик города, что особенно актуально для Санкт-Петербурга.

Территория города Санкт-Петербурга расположена на стыке Балтийского щита, сложенного гранитными породами и Русской платформы, основанной древними осадочными породами. На территории города глубина залегания кристаллических пород Балтийского щита составляет порядка 200 метров, и выходит на поверхность уже на севере Ленинградской области. Осадочные породы Русской платформы являются основными для строительства метрополитена. При этом Русская платформа разделяется на несколько этажей:

- нижний этаж, представленный породами архей-протерозойского периода – гранитами, гнейсами, и другими магматическими породами с глубиной залегания до 250 метров.

- верхний этаж, который в свою очередь также делится на две толщи отложений – верхнюю и нижнюю. Верхняя толща или четвертичная представлена четвертичными отложениями. Основными породами здесь

являются моренные отложения, озерно-ледниковые суглинки, песчано-глинистые грунты ледникового происхождения. Нижний слой представлен коренными породами, прошедшими несколько стадий литификации. В южной части города структура разделяется на два слоя: – верхний с кембрийскими глинами (ϵ_{1sv}), и нижний с ломоносовскими песчаниками и прослойками глин ($V_2\epsilon_{1lm}$). В северной и центральной частях Санкт-Петербурга, под толщей четвертичных отложений, и в южной части под кембрийскими отложениями, располагаются верхнекотлинские глины с прослойками песчаника (V_2kt_2) (рисунок 1.1) [32]. Общая мощность отложений составляет от 12 до 75 метров и более в зависимости от наличия древних подземных рек, заполненных песчано-глинистыми отложениями.

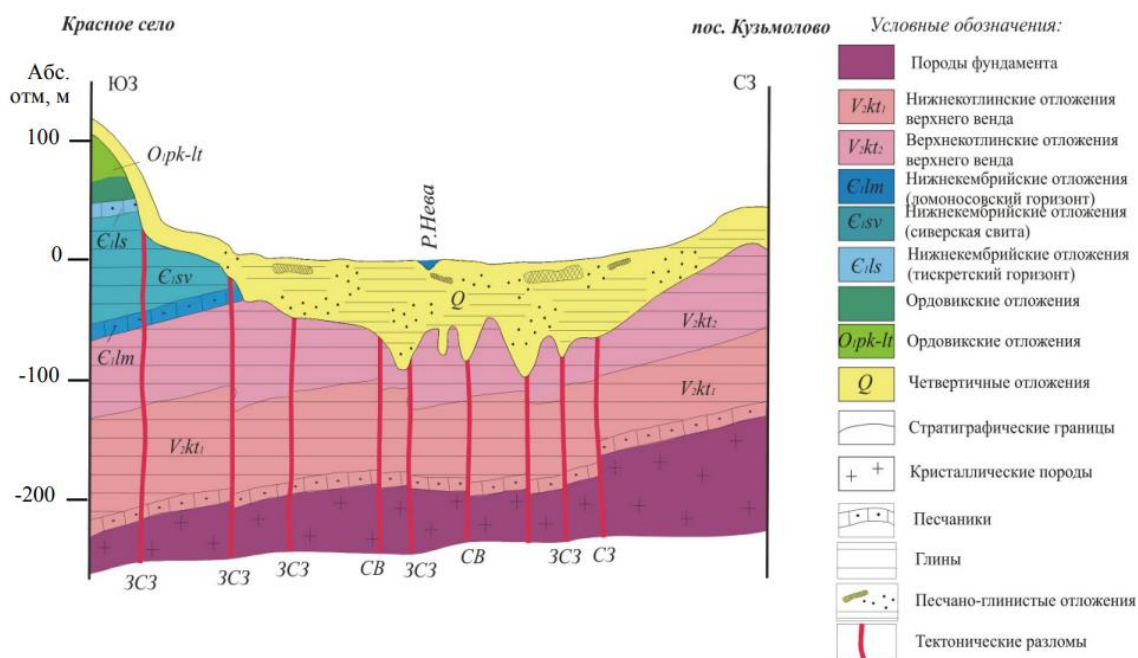


Рисунок 1.1 – Схематический геолого-литологический разрез Санкт-Петербурга с элементами тектоники (по Е.К. Мельникову)

Большая часть тоннелей, выработок и станций метрополитена Санкт-Петербурга пройдены в толще кембрийских глин [3]. Основные физические свойства пород представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Основные показатели физических свойств пород [56]

Породы	Число пластичности, %	Плотность породы, г/см ³		Коэффициент пористости	Естественная влажность, %
		естественного сложения	скелета		
Суглинки и глины	9	2,26	2,05	0,33	10,0

Выработки средней и малой глубины заложения, такие как наклонные эскалаторные тоннели, перегонные тоннели, станции, пройдены в неустойчивых, обладающих склонностью к образованию пластических деформаций четвертичных водонасыщенных песчано-глинистых отложениях ледникового, озерно-ледникового и болотного происхождения (рисунок 1.2).

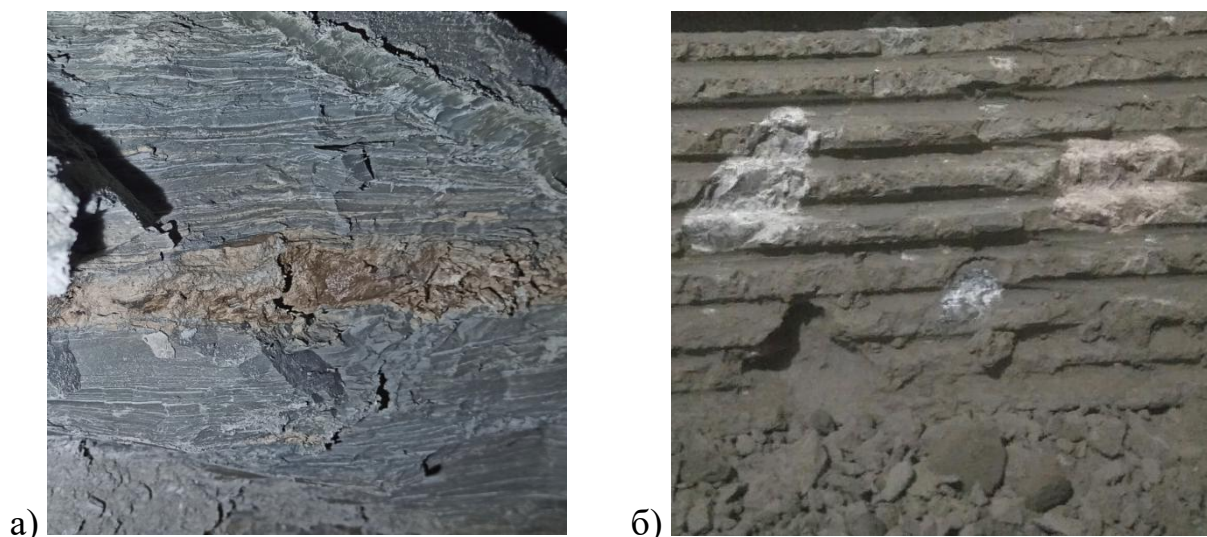


Рисунок 1.2 – Забой: а – кембрийская глина с твердыми прослойками; б – четвертичные песчано-глинистые с включением гранитных валунов отложения ледникового типа

Особую сложность при строительстве составляют болотные отложения, в виду того, что большая их часть погребена под слоем техногенных образований (рисунок 1.3). Такие подземные отложения болотного типа при вскрытии подземными выработками становятся пльвунами [31].

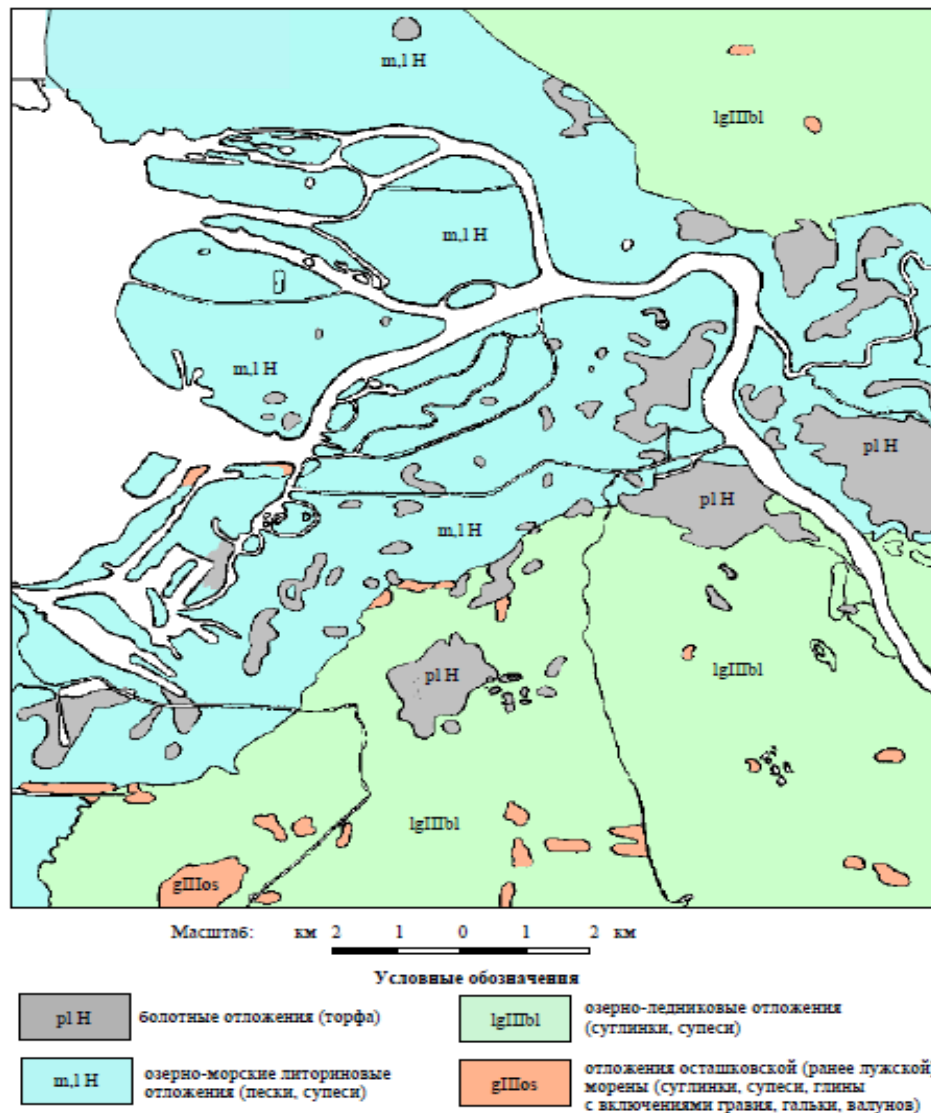


Рисунок 1.3 – Схематическая карта четвертичных отложений Санкт-Петербурга [30]

Наряду с отложениями болотного происхождения сложность при строительстве подземных выработок приносят отложения ледникового происхождения – морены, характеризующиеся различным гранулометрическим составом и состоящие из суглинков, гранитных валунов, линз крупных или пылеватых песков содержащих воду под давлением до 2 Бар.

1.2 Анализ тоннелепроходческой техники

1.2.1 Анализ щитовых проходческих комплексов

Первый проходческий щит был изобретен в XIX в. английским инженером Марком Изамбардом Брюнелем. Однажды он увидел, как моллюск *Teredo navalis* проделывал ходы в корабельной доске. Увиденное и вдохновило изобретателя. Первый щит представлял из себя металлическую конструкцию прямоугольной формы, задача которой была поддержание породы, а отработка породы и крепление выработанного пространства велась вручную. С того времени щитовая техника сильно изменилась. Современная щитовая проходческая техника обладает высокой степенью безопасности ведения работ, высокой скоростью и точностью проходки тоннелей.

За последний промежуток времени разработано значительное число новейших высокопроизводительных тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК), в основном немецких – Herrenknecht, канадских – Lovat, японских – Mitsubishi и французских – CSM Bessac [21, 30, 44]. Помимо повышения автоматизации и механизации работ на тоннелепроходческом комплексе, большое развитие получили исполнительные органы, а также методы поддержки лба забоя [89].

Современный щитовой тоннелепроходческий комплекс представляет собой комплекс механизмов ведущих разработку породы, транспортировку разрушенной породы, крепление выработки и нагнетание раствора в заобделочное пространство [97]. К основными частями проходческого щита можно отнести исполнительный орган, оболочку щита, проходческие домкраты, систему транспортирования отработанного материала, а также защитовые технологические тележки с гидравлическим и электрическим оборудованием.

Применение щитовых проходческих комплексов возможно в широком диапазоне горно-геологических условий, которые можно разделить на три

группы:

- для проходки тоннелей в водонасыщенных, неустойчивых грунтах с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f < 1$;
- для проходки тоннелей в устойчивых песчано-глинистых и других грунтах и породах с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f < 0,5 \dots 6$;
- для проходки тоннелей в скальных породах с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f > 6$ [19].

В настоящее время благодаря широкой области применения, безопасности ведения работ [76], легкости регулирования подачи и скорости вращения исполнительного органа, большой производительности наиболее распространены проходческие щиты с роторным исполнительным органом. К недостаткам такого вида исполнительного органа можно отнести сложность исполнительного органа, большую массу исполнительного органа, трудоемкость замены породоразрушающего инструмента, невозможность раздельной обработки забоя.

Щитовые проходческие комплексы с роторным исполнительным органом производятся от 400 до 20000 мм. Область применения таких щитов разнообразна, начиная от $f < 0,5$ до $f > 6$ и зависит от породоразрушающего инструмента установленного на роторе [19].

Основными преимуществами щитового проходческого комплекса с роторным исполнительным органом являются:

- Сплошная по всей площади забоя разработка грунта;
- Непрерывность процесса разработки грунта;
- Возможность использования роторного исполнительного органа, как средства крепления лба забоя;
- Передача на всю поверхность разрушаемого забойного массива

высоких усилий;

- Возможность оснащения роторного исполнительного органа разнообразным породоразрушающим инструментом;
- Простота и надежность конструкции [33].

Перечисленные выше преимущества позволили расширить область применения, повысили производительность, а также увеличили надежность щитовых проходческих комплексов с роторным исполнительным органом [20, 21, 34].

На рисунке 1.4 представлены основные узлы проходческого щита: 1 – исполнительный орган (ротор); 2 – оболочка щита; 3 – проходческие домкраты; 4 – породный конвейер; 5 – эректор; 6 – главный привод; 7 – тележки с технологическим оборудованием.

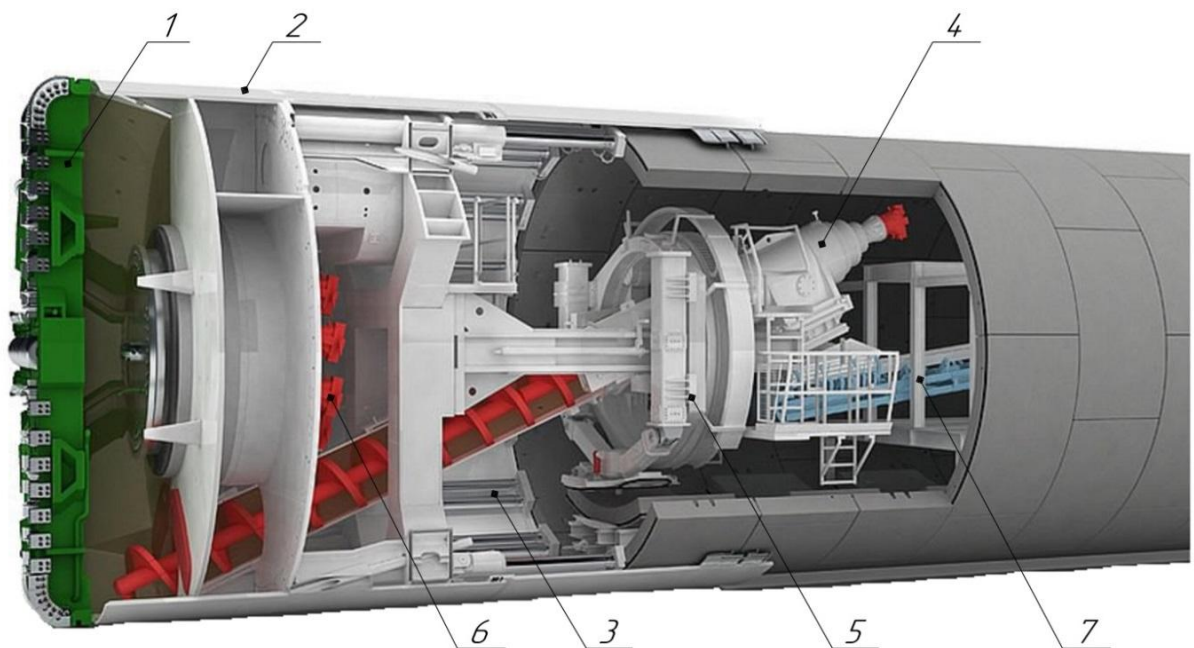


Рисунок 1.4 – Основные узлы проходческого щита с роторным исполнительным органом

Роторный исполнительный орган предназначен для разрушения породного массива. Для этого он оснащен породоразрушающими инструментами, закрепленными на его рабочей поверхности [19, 35 – 37]. Второстепенной функцией ротора является поддержание лба забоя от

просадок дневной поверхности. В настоящее время существуют 3 типа роторных исполнительных органов:

- роторный исполнительный орган, оснащенный резцовым породоразрушающим инструментом и предназначенный для разрушения мягких пород, таких как кембрийская глина или пески (рисунок 1.5 а). Представителем такого типа роторных исполнительных органов является тоннелепроходческий щит КТ1-5,6 прекрасно зарекомендовавший себя при проходке тоннелей исключительно по сухой кембрийской глине. При этом, во время проходки тоннелей по неоднородным забойным массивам включающим твердые прослойки происходило существенное изнашивание породоразрушающих инструментов, а также снижение скорости проходки.
- роторный исполнительный орган, оснащенный шарошечным породоразрушающим инструментом, предназначенный для разрушения скальных пород, таких как граниты (рисунок 1.5 б) [49]. Данный тип роторных исполнительных органов не применим для проходки тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга.
- роторный исполнительный орган гибридного типа, оснащенный шарошечным и резцовым породоразрушающим инструментом, предназначенный для разрушения неоднородных забойных массивов, обладающих разными физико-механическими свойствами (рисунок 1.5 в). Применим для проходки тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга, однако имеет недостаточную эффективность разрушения твердых прослоек и включений, что было выявлено во время работы тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782.



Рисунок 1.5 – Типы роторных исполнительных органов: а – ротор для мягких пород; б – ротор для скальных пород; в – гибридный ротор

1.2.2 Анализ специальных проходческих комплексов на базе комбайнов избирательного действия

При проходке тоннелей по мягким несвязным породам с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f \leq 1,5$ применяются исполнительные органы экскаваторного типа. Так на рукояти устанавливается ковш, непосредственно которым ведется разработка породы (рисунок 1.6 б). Щиты с экскаваторным исполнительным органом изготавливаются диаметром от 1220 до 8000 мм и более. Вместимость ковша изменяется от 0,05 до 1,14 м³ [19]. Как правило, для исключения обвала забоя такие комплексы имеют выдвижные шандоры [89]. При больших диаметрах комплекса он разделяется на ярусы, на каждом из которых имеется свой исполнительный орган экскаваторного типа.

При проходке тоннелей по крепким породам с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f \leq 6$ в качестве исполнительного органа применяется резцовая коронка фрезерного типа, установленная на подвижной стреле (рисунок 1.6 а) [88]. Проходческие комплексы такого типа в настоящее время производятся с диаметром от 1,5 м до 10 м. Основными производителями проходческих комплексов с исполнительным органом избирательного действия являются машиностроительные компании Mitsubishi, Herrenknecht и Robbins.

Главным преимуществом тоннелепроходческого комплекса с исполнительным органом избирательного действия является непосредственный обзор машинистом забоя, что упрощает процесс разработки породы и позволяет машинисту моментально реагировать на изменения горно-геологических условий [22, 82]. К преимуществам также можно отнести:

- удобство обнаружения и удаления гранитных валунов;
- удобство ремонта исполнительного органа, а также замены породоразрушающего инструмента;
- простота конструкции.

Недостатками проходческих комплексов такого типа являются:

- сложность в управлении при разработке породы, особенно в периферийных частях забоя, что требует большого навыка машиниста;
- низкая эксплуатационная производительность в виду последовательного способа отработки забоя.

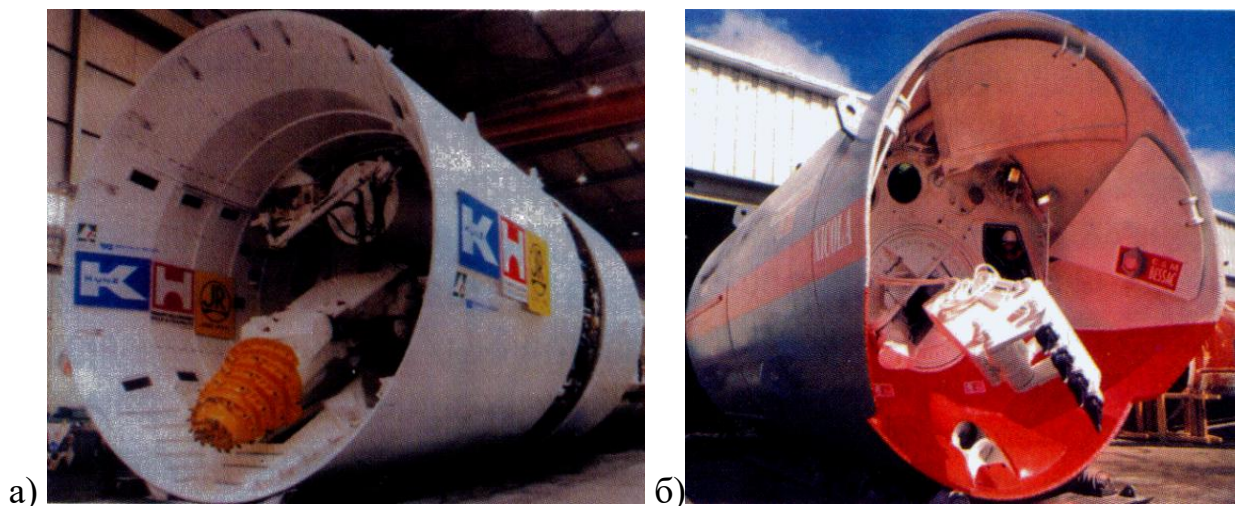


Рисунок 1.6 – Тоннелепроходческие комплексы с исполнительными органами избирательного действия: а – с резцовой коронкой фрезерного типа; б – с ковшом

Для упрощения работы обслуживающего персонала современные тоннелепроходческие комплексы с исполнительными органами

избирательного действия оснащаются системой автоматической обработки забоя.

На рисунке 1.7 представлен тоннелепроходческий комплекс с исполнительным органом избирательного действия компании Herrenknecht, основными узлами которого являются: 1 – резцовая коронка фрезерного типа; 2 – стрела; 3 – привод вращения коронки; 4 – оболочка тоннелепроходческого комплекса; 5 – породный конвейер; 6 – транспортные емкости (вагонетки).

Крепление выработки в случае работы такого комплекса осуществляется непосредственно из стартового котлована, путем продавливания кольца обделки.

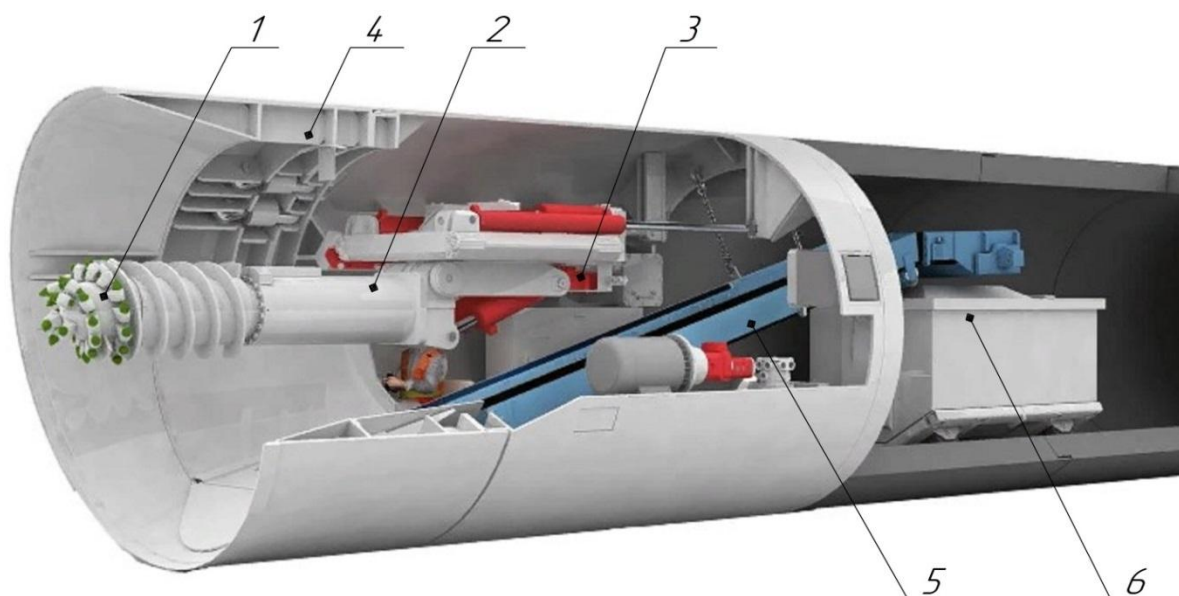


Рисунок 1.7 – Тоннелепроходческий комплекс с исполнительным органом избирательного действия

Начиная с 1983 года на кафедре горных машин и комплексов Тульского государственного университета совместно с институтом ЦНИИПодземмаш ведутся работы по созданию виброактивного исполнительного органа на базе проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом избирательного действия. Целью исследований являлось обеспечение возможности работы комбайна по забойному массиву с пределом прочности

на одноосное сжатие до 80 МПа путем изменения механики разрушения, суть которой заключается в соединении классического механического резания горных пород с дополнительными вибрационными и ударными воздействиями на разрушаемый массив [18].

Результатом выполненных работ стали теоретические и экспериментальные исследования, позволившие обосновать целесообразность и перспективность комбинированного метода разрушения забойного массива обладающего повышенной крепостью, а также образец виброактивного исполнительного органа (рисунок 1.8) к серийному проходческому комбайну КП-25. Однако серийное производство не было начато, в виду недостатков конструкции, связанных со сложностью кинематики, а также трудностями гашения вибрации, передающейся на сам проходческий комбайн.

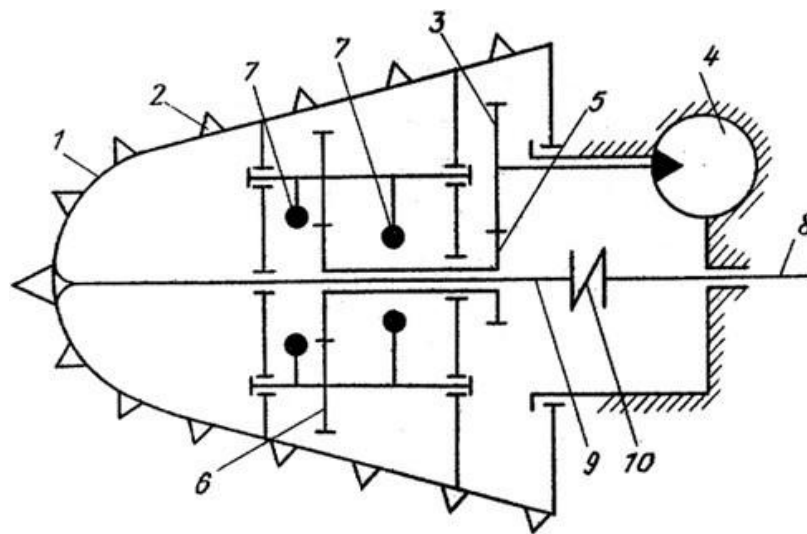


Рисунок 1.8 – Виброактивный исполнительный орган: 1 – коронка; 2 – резцы; 3 – зубчатое колесо; 4 – гидродвигатель; 5 – блок-шестерня; 6 – сателлиты; 7 – неуравновешенные массы; 8 – приводной вал; 9 – вал коронки; 10 – гаситель колебаний

Несмотря на повышенную эффективность разрушения твердых включений, применение тоннелепроходческих комплексов и проходческих комбайнов с исполнительным органом избирательного действия возможно,

как правило, для проходки тоннелей в однородных устойчивых с полным отсутствием грунтовых вод породах, что делает их неприменимыми для проходки тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга. Однако идея наложения вибрационных и ударных нагрузок на породоразрушающий инструмент или исполнительный орган актуальна. При этом наложение ударной нагрузки на дисковые шарошки, установленные на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита, могут позволить расширить его область применения и повысить скорость проходки тоннеля [99-103].

1.3 Анализ конструкций породоразрушающего инструмента исполнительных органов тоннелепроходческих щитов

Породоразрушающий инструмент, установленный на исполнительном органе тоннелепроходческого щита является главной составной его частью, который во многом определяет скорость проходки тоннеля [50].

Повышение производительности и надежности тоннелепроходческих комплексов невозможно без создания и использования эффективных породоразрушающих инструментов, определяющих характер взаимодействия их исполнительного органа с забоем. Эффективность разрушения породы исполнительным органом зависит от рационального подбора породоразрушающего инструмента в зависимости от горно-геологических условий.

В настоящее время конструкция породоразрушающего инструмента тоннелепроходческих щитов весьма разнообразна, но должна соответствовать основополагающим критериям: надежность, технологичность, малая энергозатратность на разрушение пород, малая металлоемкость [50].

Породоразрушающий инструмент тоннелепроходческих щитов подразделяется на 2 группы [53]:

- Для разрушения мягких и пород средней крепости с крепостью по шкале проф. М.М. Протодяконова $f < 6$;
- Для разрушения крепких и довольно крепких пород с крепостью по шкале проф. М.М. Протодяконова $f > 6$.

На тоннелепроходческих щитах КТ1-5,6 с роторным исполнительным органом предназначенных для разрушения мягких пород с крепостью по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 1 \div 3$ применяются резцовый породоразрушающий инструмент типа ШБМ.

Стержневые резцы типа ШБМ (рисунок 1.9) применяются для разрушения пород с крепостью по шкале проф. М.М. Протодяконова $f < 3$ и абразивностью не более 18 мг, армируются твердым сплавом марок ВК10 ГОСТ 3882-74, ВК8В, ВК8ВК, ВК11ВК. Державка резца выполняется из стали 35ХГСА.

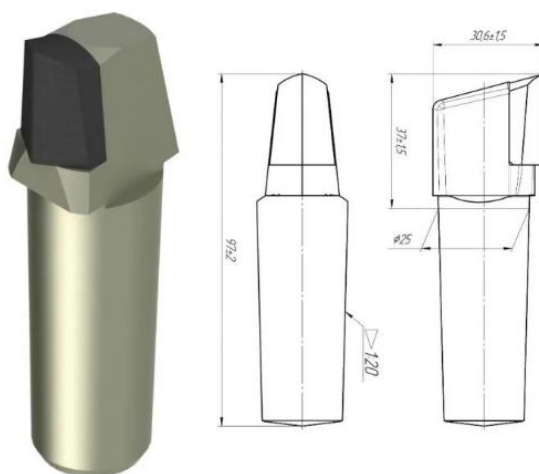


Рисунок 1.9 – Резцы типа ШБМ [18]

Конструкция резцов, устанавливаемых на исполнительных органах современных зарубежных тоннелепроходческих комплексах существенно отличается от конструкции резцов типа ШБМ. Они имеют более массивный внешний вид с множеством твердосплавных вставок. Скорость резания таких резцов лежит в интервале от 30 до 40 м/мин. По назначению резцов их можно разделить на два вида: основные резцы (рисунок 1.10 а) и резцы рыхлители (Ripper) (рисунок 1.10 б) [77, 78].

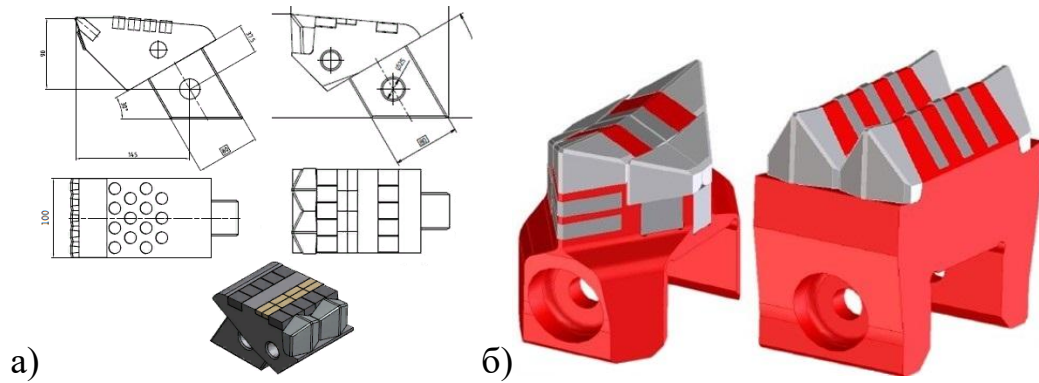


Рисунок 1.10 – Резцы, применяемые на зарубежных ТПМК: а – основной резец; б – резец–рыхлитель (Ripper)

Помимо резцов на периферийных частях роторных исполнительных органов для подреза породы устанавливаются ковши (рисунок 1.11), обладающие большой длинной режущей кромки (до 800 мм).

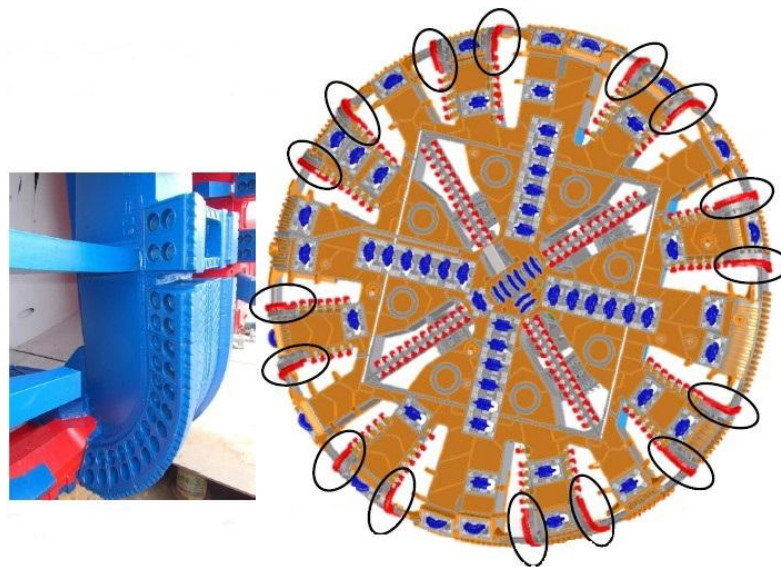


Рисунок 1.11 – Ковши

Для разрушения крепких и довольно крепких пород с крепостью по шкале проф. М.М. Протодяконова $f > 6$ на исполнительных органах тоннелепроходческих комплексах применяют шарошечный породоразрушающий инструмент. Его применение объясняется большим разрушающим усилием по сравнению с резцовым породоразрушающим инструментом, в виду того, что с породой одновременно контактирует большая площадь режущей кромки дисковой шарошки.

Шарошка – это породоразрушающий инструмент, представляющий собой твердосплавный диск, установленный на ось, которая закрепляется на исполнительном органе [53, 110, 112, 113, 115, 116]. В настоящий момент применяются дисковые, штыревые и зубчатые шарошки с максимальной скоростью качения 120-160 м/мин [1]. Наибольшее распространение получили дисковые шарошки. Шарошки производятся однодисковыми и многодисковыми. В таблице 1.2 представлены области применения различных типов шарошек в зависимости от горно-геологических условий.

Таблица 1.2 – Область применения различных типов шарошек

Типы шарошек	Горно-геологические условия				
	Валуны, гравелистые породы	Мягкие породы с валунами	Средней крепости породы	Крепкие породы	Весьма крепкие породы
Двухдисковые шарошки	+	+			+
Однодисковые шарошки малого диаметра		+	+		+
Однодисковые шарошки большого диаметра			+	+	
Штыревые шарошки					+

По выполняемой функции шарошки делятся на: лобовые (разрушение лба забоя); многорядные (разрушение центральной части забоя); контурные, подрезные или копир-шарошки (выборочная разработка забоя по контуру поперечного профиля тоннеля).

Количество дисков, угол заострения, а также диаметр шарошки являются основными показателями эффективности процесса разрушения породы. На современных тоннелепроходческих щитах наибольшее распространение получили шарошки диаметром 15, 17, 19 дюймов (или 381; 431,8; 482,6 мм.) и массой до 90 кг [1, 109]. Диск шарошки изготавливается из сталей 35ХГСА, 40ХНМА, а также со вставками из сплавов карбида вольфрама и кобальта.

Современные дисковые шарошки существенно отличаются от прежних клиновых, в виду того, что претерпели ряд изменений [90, 91]. Диаметры шарошек увеличились до 550 мм, допускаемые усилия внедрения возросли до 250 кН. Приведенные выше изменения позволили повысить эффективность разрушения очень крепких пород (до 300 - 400 МПа) [94], а также повысить работоспособность, безотказность и срок службы. Основными производителями шарошечного породоразрушающего инструмента для ТПК являются компании Herrenknecht, Palmieri и Wirth, выпускающие многообразие шарошек для различных горно-геологических условий.

На рисунке 1.12 представлена конструкция шарошки компании Herrenknecht AG [90], основными элементами которой являются: 1 – корпус; 2 – диск; 3 – ось; 4 – подшипники; 5 – крышка; 6 – уплотнения.

Рабочий венец или диск имеет клиновидную форму в радиальном сечении, или закругленную форму. Для простоты и удобства его замены, диск выполняется в съемном исполнении. Такая конструкция в случае износа позволяет с легкостью заменить изношенную режущую часть шарошки.



Рисунок 1.12 – Конструкция дисковой шарошки компании Herrenknecht AG

Как показала практика, совокупное применение шарошечного породоразрушающего инструмента с резцовым, на роторных исполнительных органах гибридного типа, не дает требуемого повышения эффективности разрушения неоднородных забойных массивов, особенно в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга [105, 107, 109].

1.4 Анализ методик расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита

Для наиболее эффективного режима разработки забойного массива производится определение основного критерия расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита - крутящего момента на исполнительном органе $M_{кр}$, зависящего от такого параметра, как усилие на породоразрушающих инструментах P_z . В свою очередь, на усилия на породоразрушающих инструментах оказывают такие параметры, как толщина срезаемой стружки (глубина внедрения) h и шаг расстановки t .

В настоящее время существует несколько методик расчета усилий на резцовом породоразрушающем инструменте, имеющих разные области применения и использующие различные физико-механические характеристики разрушаемых пород, такие как сопротивляемость породы резанию A_p и контактная прочность породы P_k .

В настоящее время наибольшее распространение получили методика ЦНИИподземмаш (для породы) [19], методика ИГД им. А.А. Скочинского, методика расчета сил на резцах струга ШахтНИУИ [60, 61] и др. [64, 66].

1. Методика расчета сил на резцах струга ШахтНИУИ (1.1) [60]:

$$P_{zp} = 0,108 \cdot A_p \cdot \frac{1 + k_n \cdot f' \cdot (1 + 1,8 \cdot S) \cdot (0,35 \cdot b + 3)}{(0,45 \cdot h + b + 23) \cdot k_{\psi} \cdot \cos \beta} \cdot h \cdot t_{cp} \cdot k_y \cdot k_{cx} \cdot k_{\phi} \cdot k_{om} \cdot k_z, \quad (1.1)$$

где A_p – значение средней сопротивляемости пласта резанию, кН/м; k_n – коэффициент, характеризующий отношение отжимающей силы к силе

резания на остром резце; f' – коэффициент сопротивления резанию; S – проекция площадки износа резца на плоскость резания, см^2 [56]; b – ширина режущей части резца, мм; h – толщина срезаемой стружки, мм; t_{cp} – ширина среза резца, мм; k_y – коэффициент, зависящий от угла резания; k_{ψ} – коэффициент, учитывающий хрупко-пластические свойства угля; β – величина угла установки резца к направлению подачи; k_{cx} – коэффициент схемы резания; k_{ϕ} – коэффициент формы передней грани резца; k_{om} – коэффициент отжима; k_s – коэффициент обнажения забоя.

2. Методика ЦНИИподземмаш (для породы) (1.2) [19]:

$$P_{zp} = P_k \cdot k_{\alpha} \cdot k_b \cdot (0,25 + 0,018 \cdot t \cdot h) + 0,27 \cdot \mu_{\theta} \cdot P_k \cdot F_{\phi} \quad (1.2)$$

где P_k – показатель контактной прочности породы, МПа; k_{α} – коэффициент, учитывающий влияние угла резания; h – толщина срезаемой стружки, мм; μ_{θ} – коэффициент трения движения резца о горную породу; F_{ϕ} – средняя величина проекции площадки затупления резца по задней грани на плоскость резания, мм^2 ; t – шаг расстановки резцов, мм; b – ширина режущей кромки резца, мм; k_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины режущей кромки резца.

3. Методика определения силы резания на резце проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом РД 12.25.137-89 (1.3) [79]:

$$P_{zp} = P_k \cdot (k_T \cdot k_{\Gamma} \cdot k_{\alpha} \cdot (0,25 + 0,018 \cdot t \cdot h) + 0,1 \cdot F), \quad (1.3)$$

где P_k – показатель контактной прочности породы, МПа; k_{α} – коэффициент, учитывающий влияние угла резания (для угла резания $\alpha_p = 90^\circ$ значение коэффициента принимается равным 1); k_T – коэффициент, учитывающий влияние типа резца (для неповоротных резцов значение коэффициента принимается равным 1); F – средняя величина проекции площадки

затупления резца по задней грани на плоскость резания, мм^2 , t – шаг расстановки резцов, мм ; k_r – коэффициент, учитывающий влияние геометрии инструмента

4. Методика ИГД им. А.А. Скочинского (1.4) [66]:

$$Z_n = 98,1 \cdot \bar{A} \cdot \frac{0,35 \cdot b + 0,003}{k_\phi (b + h_{cp} \cdot \text{tg} \phi)} \cdot t_{cp} \cdot h_{cp} \cdot k_z \cdot k_y \cdot k_{om} \cdot k_\phi \frac{1}{\cos \beta}, \quad (1.4)$$

где $\bar{A}$ – значение средней сопротивляемости пласта резанию, кН/м ; b – ширина режущей кромки резца, мм ; h_{cp} – толщина срезаемой стружки, мм ; t_{cp} – ширина среза резца, мм ; k_z – коэффициент обнажения забоя; k_ϕ – коэффициент учитывающий влияние хрупко-пластичных свойств угля; k_y – коэффициент учитывающий влияние угла резания; β – угол наклона резца к направлению подачи; ϕ – угол бокового развала борозды резания; k_{om} – коэффициент отжима; k_ϕ – коэффициент формы передней грани резца.

Представленные выше методики 1 – 4 эмпирические, и предназначены для конкретных горно-геологических условий. При этом, в настоящее время неизвестно по какой методике определять усилия на резцовом породоразрушающем инструменте тоннелепроходческих щитов, работающих в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга.

Для расчета шарошечного породоразрушающего инструмента, как и для расчета резцового породоразрушающего инструмента существует несколько методик:

5. Методика Донгипроуглемаша с учетом результатов последующих исследований, выполненных Бароном Л.И. и Глатманом Л.Б. в ИГД им. А.А. Скочинского [66].

При расчете по методике предложенной Бароном Л.И. и Глатманом Л.Б. используется физико-механическое свойство горных пород как контактная прочность пород P_k . При перекачивании по забою диск шарошки воспринимает действие реакции забоя, которая распределена по

параболической кривой (рисунок 1.13). При этом, равнодействующая распределенных сил в общем виде определяется по формуле (1.5):

$$P = AP_k F_k K_{Hh} K_{LH}; \quad (1.5)$$

где A – коэффициент соотношения среднего значения сопротивления породы вдавливанию шарошки и контактной прочности породы; P_k – контактная прочность породы, МПа; F_k – условная площадь контакта шарошки с разрушаемой породой, мм²; K_{Hh} – коэффициент обнажения забоя; K_{LH} – коэффициент вида разрушения.

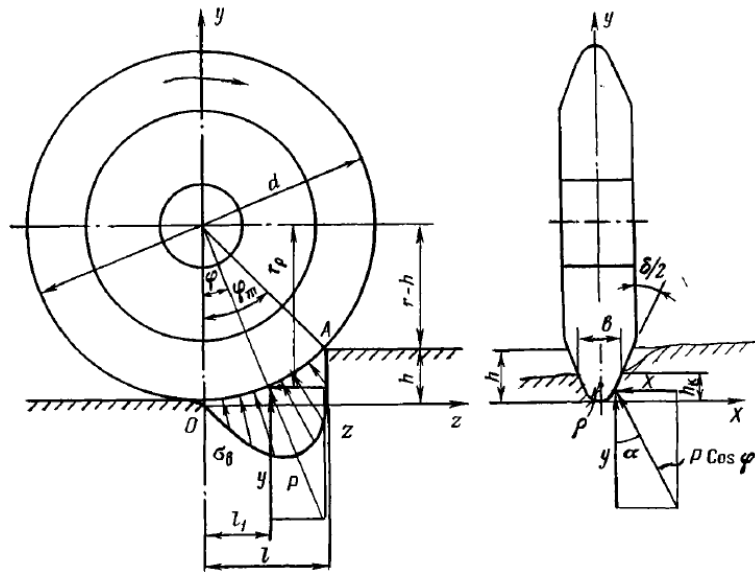


Рисунок 1.13 – Схема сил дисковой шарошки

Сила, прикладываемая к дисковой шарошке раскладывается на две составляющие, усилие перекачивания P_z (1.6) и усилие подачи P_y (1.7).

$$P_z = 0,326e^{21t} (190h + 0,24) \times (220\rho + 0,78) \times (0,0068\beta + 0,73) \times (0,0089P_k - 0,0016 \times 10^{-3} P_k^2 + 1,22); \quad (1,6)$$

$$P_y = 0,326e^{21t} (170h + 0,32) \times (220\rho + 0,78) \times (0,0068\beta + 0,73) \times (3,5D + 0,64) \times (0,0435P_k^2 - 0,0045 \times 10^{-3} P_k^2 + 5,28), \quad (1,7)$$

где e – основание логарифма; P_k – контактная прочность породы, МПа; h – величина подачи шарошки на забой, м; t – шаг расстановки шарошек, м; D_u – диаметр шарошки, м; β – угол заострения обода, град; ρ – радиус скругления

вершины шарошки, м.

6. Методика И.А. Леванковского (1.8, 1.9) [57, 58]:

$$P_z = (1,38 - 0,013\beta + 0,00011\beta^2) \cdot (0,18\rho + 0,64) \cdot (p_{отк}(1,08h\sqrt{t_1} - 2,23) + 310); \quad (1.8)$$

$$P_y = (0,0035D + 0,48) \cdot (1,56 - 0,021\beta + 0,0002\beta^2) \cdot (0,18\rho + 0,64) \cdot (4,62p_{отк}h\sqrt{t_1} - 575), \quad (1.9)$$

где β – угол заострения обода, град; ρ – радиус скругления вершины шарошки, м; $p_{отк}$ – сопротивление породы статическому откалыванию, МПа; h – глубина подачи, м; t_1 – относительный шаг (отношение шага разрушения к величине подачи); D – диаметр шарошки, м.

7. Методика J. Rostami, L. Ozdemir (1.10, 1.11) [111]:

$$P_y = \frac{2,12 \cdot \sqrt[3]{\frac{s\sigma_{сж}^2\sigma_p}{\gamma\sqrt{RT}}}RT\gamma}{1+\psi} \cos \frac{\gamma}{2}; \quad (1.10)$$

$$P_z = \frac{2,12 \cdot \sqrt[3]{\frac{s\sigma_{сж}^2\sigma_p}{\gamma\sqrt{RT}}}RT\gamma}{1+\psi} \sin \frac{\gamma}{2}, \quad (1.11)$$

где s – шаг резания, мм; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие, МПа; σ_p – предел прочности породы на растяжение, МПа; R – радиус диска шарошки, мм; T – ширина режущей кромки шарошки, мм; γ – угол контакта между инструментом и горной породой, рад; ψ – коэффициент, описывающий функцию распределенной нагрузки (находится в пределах от -0,2 до 0,2) уменьшаясь по мере увеличения ширины режущей кромки).

Представленные выше методики 1 – 7 применимы для роторных исполнительных органов тоннелепроходческих щитов, оснащенных породоразрушающим инструментом, в основе которых лежат методы классического разрушения забойного массива.

8. Методика расчета корончатого виброактивного исполнительного органа (1.12) [18]:

$$P_z = 100 \cdot \tau_{сг} \left[(R_3 \cdot h^2 + R_4 \cdot h) \cdot \Pi \cdot R_1 + (2h \cdot \Delta_\delta \cdot A_{F\delta} + a_K \cdot \Delta_3 \cdot A_{F3}) \cdot f_\Pi \right] \cdot K_{осл}, \quad (1.12)$$

где τ_{sr} – разрушающее напряжение дробления породы, МПа; h – толщина стружки, мм; f_{II} – коэффициент трения; K_{ocl} – коэффициент ослабления уступа массива; $A_{F\delta}$ и A_{F3} – параметры, учитывающие форму соответствующих площадок износа резца; a_K – длина главной режущей кромки резца, см; Δ_3 – фаска износа резца по задней грани, мм; Δ_δ – фаска износа резца по боковой грани, см.

Процесс создания дебалансами вибрации на корончатом исполнительном органе описывается уравнениями (1.13, 1.14) [17]:

$$nr_1m \left[r_2 \ddot{\varphi}_2 - r_1 \ddot{\varphi}_1 - \rho \dot{\varphi}_2^2 \sin \alpha + \rho \ddot{\varphi}_2 \cos \alpha \right] + \\ + \frac{r_1}{r_3} \left[M_3^* - M_3 + J_3 \frac{r_2 \ddot{\varphi}_2 - r_1 \ddot{\varphi}_1}{r_3} \right] + M_1 - M_1^* - J_1 \ddot{\varphi}_1 = 0 \quad ; \quad (1.13)$$

$$r_2m_2 \left[r_2 \ddot{\varphi}_2 - r_1 \ddot{\varphi}_1 - \rho \dot{\varphi}_2^2 \sin \alpha + \rho \ddot{\varphi}_2 \cos \alpha \right] + \\ + \frac{r_2}{nr_3} \left[M_3^* - M_3 + J_3 \frac{r_2 \ddot{\varphi}_2 - r_1 \ddot{\varphi}_1}{r_3} \right] + m_2 \left[\frac{(r_2 \dot{\varphi}_2 - r_1 \dot{\varphi}_1)^2}{r_3} \rho \sin \alpha + \right. \\ \left. + (r_2 \ddot{\varphi}_2 - r_1 \ddot{\varphi}_1) \rho \cos \alpha + \rho^2 \ddot{\varphi}_2 \right] + J_2 \ddot{\varphi}_2 = 0 \quad ; \quad (1.14)$$

Движение виброактивного исполнительного органа описывается системой из 14 уравнений. При этом допущения, применяемые при их составлении и решении, позволяют сделать вывод о том, что применение для наших условий такой сложной математической модели не позволит достаточно точно описать поведение дисковых шарошек с накладываемой на них ударной нагрузкой. Учитывая тот факт, что количество шарошек существенно больше одной, а их расстановка выполнена на разных радиусах, более рациональным решением будет определение увеличения эффективности работы шарошки с ударной нагрузкой, и внесение корректив в известные зависимости по определению толщины стружки путем проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования по наложению вибрации на резец, проведенные В.А. Бреннером показали снижение силы резания (рисунок 1.14) [17]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наложение ударной нагрузки на дисковые шарошки не только не приведет к увеличению усилий на них, но и приведет к снижению усилия перекатывания.

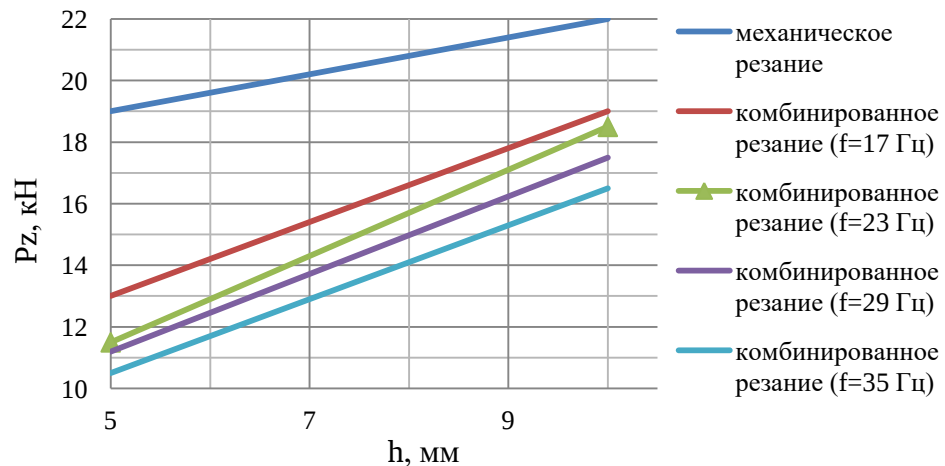


Рисунок 1.14 – Зависимость усилия резания от толщины срезаемой стружки

1.5 Анализ применения тоннелепроходческого щита в горно-геологических условиях Санкт-Петербурга

Для проходки тоннелей и вспомогательных выработок применяются тоннелепроходческие щиты с роторными исполнительными органами КТ1-5,6 (рисунок 1.15 б), КТПМ-5,6, Herrenknecht S-782, стволопроходческий комбайн СПК-6, а также тубингоукладчики различных модификаций (рисунок 1.15 а) [46,63]. Для строительства наклонных эскалаторных тоннелей применяется современный наклонный тоннелепроходческий комплекс Herrenknecht S-441.

В настоящий момент применение устаревших и низкопроизводительных тоннелепроходческих комплексов типа КТ1-5.6, а также тубингоукладчиков [98, 99], при работе которых доля ручного труда достигает до 90 % становится весьма не актуальным. Поэтому активно применяются современные тоннелепроходческие механизированные комплексы (ТПМК) компании Herrenknecht AG с грунтовым пригрузом забоя

[71], исключая просадку дневной поверхности [13, 21, 23, 29].

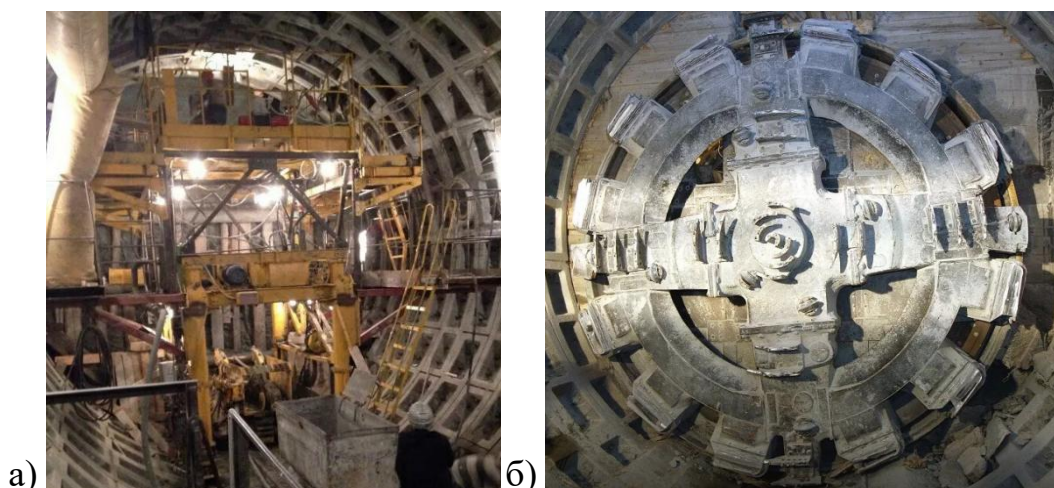


Рисунок 1.15 – Проходка тоннеля с применением: а – тьюбингоукладчика; б – тоннелепроходческого комплекса КТ1-5,6

На рисунке 1.16 изображен ТПМК Herrenknecht S-782 диаметром 10,5 м. Роторный исполнительный орган был изготовлен в соответствии с горно-геологическими условиями трассы тоннеля, которая проходила по валунной зоне с обводненными суглинками и прослойками известняков и песчаников с последующим переходом в зону кембрийской глины. Поэтому было отдано предпочтение роторному исполнительному органу гибридного типа, что подразумевает под собой применение в качестве породоразрушающего инструмента не только резцов, но и дисковых шарошек.



Рисунок 1.16 – Тоннелепроходческий механизированный комплекс Herrenknecht S-782

Технические характеристики тоннелепроходческого щита S-782 представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные технические характеристики ТПМ Herrenknecht S-782

Ротор	Гибридный роторный исполнительный орган (резцы+дисковые шарошки)
Диаметр ротора, мм	10 650
Диаметр щита, мм	10 620
Внешний диаметр обделки, мм	10 300
Внутренний диаметр обделки, мм	9400
Количество гидродвигателей, шт	19
Мощность привода, МВт	2,8
Номинальный крутящий момент, кНм	21 200
Макс.усилие перемещения, кН	33 780
Скорость вращения ротора, об/мин	лево – 1,3; право – 3
Тип комплекса	щит с грунтопригрузом
Геология	песок, глина, гравий, суглинок, валуны
Режущий инструмент ротора	
Фронтальные шарошки	
Количество, шт	20
Размер, дюйм	17
Контурные шарошки	
Количество, шт	13
Размер, дюйм	17
Резцы	
Количество, шт	210
Проходческие домкраты	
Максимальный ход, мм	2500
Количество, шт	48 (24 пары)
Установленное номинальное давление, кН (бар)	89 200 (350)

В 2014 году в Санкт-Петербурге началось строительство тоннеля на участке Фрунзенско-Приморской линии метрополитена от станции Проспект Славы до станции Южная. Проходка тоннеля с самого начала сопровождалась проблемами с исполнительным органом. На первом

километре трассы компьютерная аппаратура проходческого комплекса показала колоссальное повышение крутящего момента на исполнительном органе. При этом была снижена величина подачи ротора на забой. Дальнейшее ведение проходки было невозможным, в виду малой величины подачи и большого крутящего момента на исполнительном органе [62].

В результате осмотра исполнительного органа было выявлено изнашивание не только шарошек, резцов и резцедержателей, но и самого ротора в целом (рисунок 1.17) [25]. Из-за невозможности ремонта исполнительного органа в кессонной камере, была построена приемная камера.

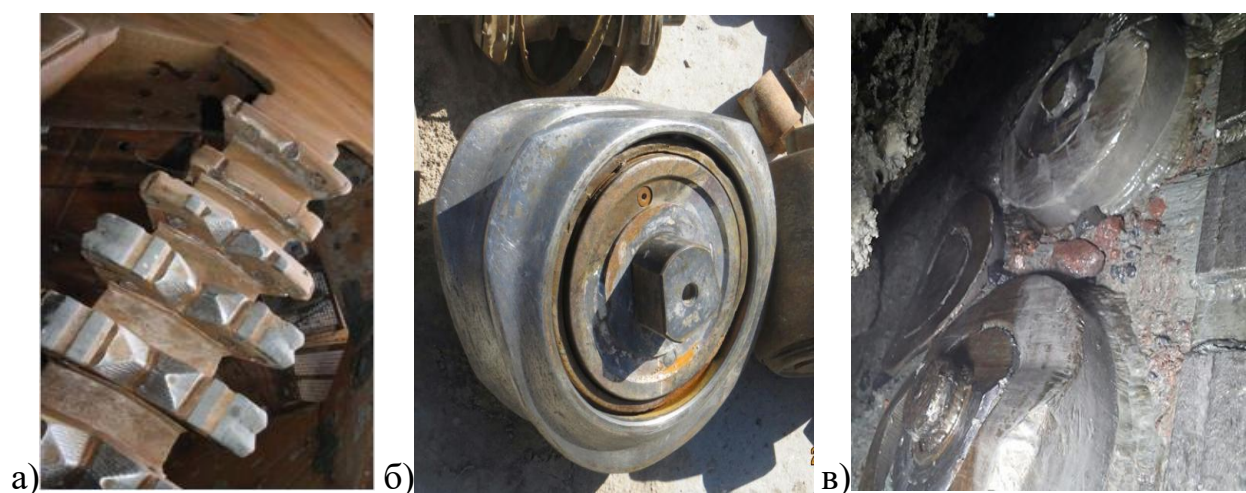


Рисунок 1.17 – Изнашивание: а – резцов, б – шарошек, в – датчиков износа

Ремонт исполнительного органа даже в приемной камере весьма трудоемкий процесс, который проводится в несколько этапов: 1 – откопка ротора (рисунок 1.18 а); 2 – очистка ротора от породы; 3 – отмывка ротора; 4 – дефектовка исполнительного органа; 5 – поиск наиболее рационального пути восстановления исполнительного органа.

В результате ремонта были полностью восстановлены резцедержатели, заменены датчики износа, шарошки и резцы. Ремонт коснулся не только замены породоразрушающих инструментов, но и восстановления с последующим усилением ротора, который впоследствии был армирован

листами из сплава карбида хрома (рисунок 1.18 б).



Рисунок 1.18 – Ремонт исполнительного органа: а – откопка исполнительного органа; б – восстановление исполнительного органа

По результатам данной аварии был сделан вывод, что исполнительный орган тоннелепроходческого комплекса весьма уязвим перед твердыми включениями. После восстановления исполнительного органа дальнейшая проходка велась со снижением величины подачи ротора на забой до 15 мм/мин. Остановки тоннелепроходческого комплекса для планового осмотра породоразрушающего инструмента производились чаще, чем до аварии.

В настоящее время для неоднородных горно-геологических условий шахт Метростроя Санкт-Петербурга нет однозначных рекомендаций по выбору типа исполнительного органа, в связи с тем, что не существует породоразрушающих инструментов позволяющих эффективно разрушать как мягкие, так и крепкие породы. Поэтому задача создания исполнительного органа, оснащенного специальным породоразрушающим инструментом, имеющим возможность эффективного разрушения неоднородного забойного массива является актуальной.

1.6 Выводы по первой главе

На основе представленного выше совокупного анализа, тоннелепроходческой техники, породоразрушающих инструментов, а также горно-геологических условий в которых осуществляется проходка тоннелей

метро, могут быть сформулированы цель работы и основные задачи исследований, заключающиеся в следующем:

Целью работы является обоснование рациональных параметров и режимов работы исполнительного органа тоннелепроходческого щита с режущим и виброактивным породоразрушающим инструментом при проходке перегонных тоннелей на основе установления закономерностей взаимодействия их с неоднородным забойным массивом, состоящим из кембрийской глины и прослоек известняка, для обеспечения повышения скорости проходки тоннеля.

Задачи исследования:

1. Провести анализ известных конструкций и недостатков работы исполнительных органов тоннелепроходческих щитов.
2. Провести теоретические исследования по выявлению закономерностей глубины внедрения шарошек от величины осевого усилия и ударной нагрузки, а также разработать методику силового расчета исполнительного органа.
3. Создать экспериментальный стенд, провести исследования по обоснованию рациональных параметров исполнительного органа тоннелепроходческого щита, в том числе оснащённого виброактивными породоразрушающими инструментами.
4. Обосновать конструкцию исполнительного органа с оптимальной схемой расстановки резцов, в том числе оснащённого виброактивным породоразрушающим инструментом для горно-геологических условий Санкт-Петербургского Метростроя и разработать уточнённую методику по его силовому расчету.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН С ТВЕРДЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ РЕЗЦОВЫМ, ШАРОШЕЧНЫМ И ВИБРОАКТИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

2.1 Анализ процесса разрушения горных пород резцовым породоразрушающим инструментом

Процесс разрушения горных пород резцовым породоразрушающим инструментом называется резанием. Процесс резания характеризуется отделением от забойного массива породного блока – стружки [7, 56, 96]. Срезаемая поверхность называется поверхностью резания и имеет негладкую форму.

Принято выделять два параметра стружки – толщина и форма. Толщина стружки обозначается буквой h и принимается равной средней толщине слоя породы срезаемой резцовым инструментом за один проход. Форма стружки определяется кинематикой движения резцового инструмента [13].

Большой вклад в изучение процесса разрушения горных пород резцовым инструментом внесли Л.И. Барон, А.И. Берон, Е.З. Позин, В.З. Меламед, В.Н. Гетопанов, В.А. Бреннер, В.И. Солод и др. [14, 18, 56, 71, 84]. Исследования этих ученых стали основой современных методик инженерных расчётов параметров режущих инструментов и режимов работы исполнительных органов горных машин.

Процесс разрушения горных пород резанием, в том числе кембрийской глины, характеризуется чередованием фаз измельчения поверхностного слоя породы с наличием отрыва крупных элементов породы – элементарных сколов [14, 41]. Считается, что передача усилия от резца на разрушаемый породный массив осуществляется через уплотненное ядро [14, 74], состоящее из совокупности частиц разрушенной породы, находящихся в

объемносжатом состоянии. В момент внедрения резца в породный массив происходит его дробление. При этом часть раздробленной породы отлетает в сторону обнаженного пространства. Далее в результате большого контактного давления ядра на неразрушенный массив породы происходит процесс скалывания более крупных кусков – элементарных сколов.

Скачкообразно развивающееся уплотненное ядро можно условно разделить на две части: нарост – часть находящаяся в застойной зоне и непрерывно обновляемая часть, образующаяся в результате дробления и эвакуации мелких частиц горной породы [39]. В результате отсутствия следов изнашивания передней грани резца, сделан вывод о существовании застойной зоны. Таким образом, при разрушении горной породы взаимодействуют 3 объекта: резец 1, уплотненное ядро 2, разрушаемый массив горной породы 3 (рисунок 2.1).

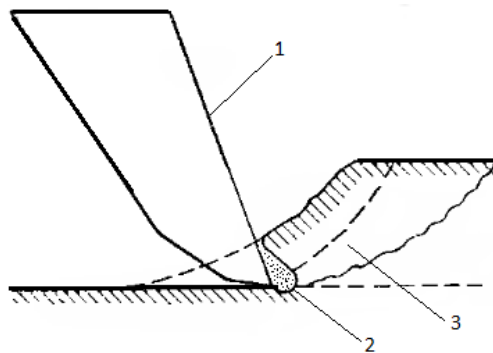


Рисунок 2.1 – Разрушение горных пород резцом [13]

В конце 19 века Н.А. Тиме была определена периодичность изменения усилий на резце, связанная с отделением стружки. При этом изменение усилий на резце происходит от минимума, зависящего от сил трения к максимуму наступающего в момент отделения скола.

На рисунке 2.2 показана принципиальная схема резания горных пород. Резание горных пород представляет собой непрерывный циклический процесс скалывания небольших кусков породы *I*, *II* и *III*, значения величин усилия резания P_z и крутящего момента M при этом снижаются. Частично мелкие частицы разрушенной горной породы выходят наружу, большая же

их часть остается между передней гранью резца и разрушаемым массивом. Далее в процессе резания происходит непрерывный рост площади контакта резца с разрушаемым массивом, а также увеличением размера уплотненного ядра и силы резания до значения P_{znuk} . В дальнейшем происходит откалывание более крупного куска горной породы IV по линии AB. Данный этап носит взрывной характер, сопровождающийся разлетом частиц разрушенной горной породы, с разрушением уплотненного ядра и снижением до нуля силы резания. После этого происходит повторение цикла резания [7].

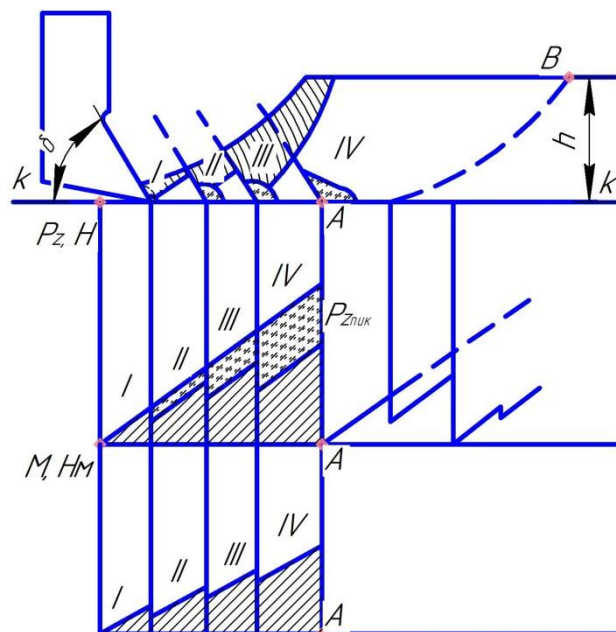


Рисунок 2.2 – Схема резания горных пород резцовым породоразрушающим инструментом: P_z – сила резания; h – глубина резания; δ – угол резания

Процесс внедрения резца в разрушаемый массив горной породы происходит с преодолением сопротивления последнего. Усилие, необходимое для преодоления общего, или, как говорят, результирующего сопротивления, обычно условно разлагают по трем осям прямоугольных координат (рисунок 2.3) на три составляющие [14]:

1. P_z – усилие резания, действующее в направлении резания;
2. P_y – усилие подачи резца на забой;
3. P_x – боковое усилие.

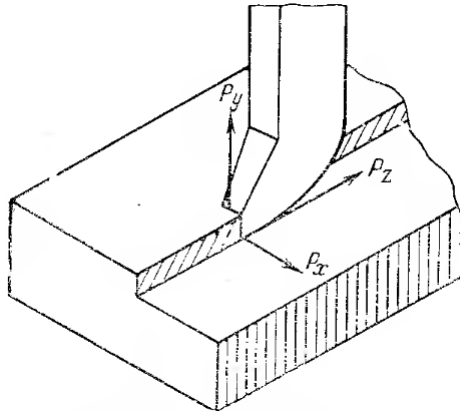


Рисунок 2.3 – Прямоугольная система координат для рассмотрения усилий действующих на резец

Схема действующих на резец сил представлена на рисунке 2.4 и составлена с учетом следующих допусков: распределенные силы на рабочих площадках заменены их результирующими; силы сопротивления приложены нормально к рабочим площадкам; площадка износа совпадает с траекторией ее движения. Линия WW представляет касательную к траектории движения точки A режущей кромки резца.

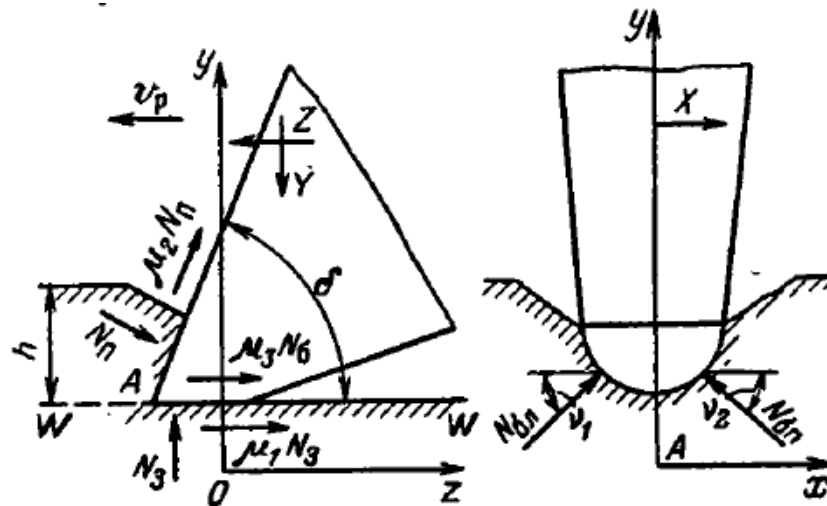


Рисунок 2.4 – Схема сил, действующих на резец при резании горной породы

Со стороны горной породы на резец действуют нормальные силы: на передней и торцовой площадках соответственно N_n и N_z , на боковых гранях $N_{\delta l}$ и $N_{\delta n}$. Нормальным силам соответствует вызванные ими силы трения $\mu_1 N_z$, $\mu_2 N_n$ и $\mu_3 N_{\delta} = \mu_3 (N_{\delta l} + N_{\delta n})$. Для преодоления этих сил к резцу

приложены усилия: P_z – усилие резания (2.1), P_y – усилие подачи (2.2), P_x – боковое усилие (2.3).

В общем случае при резании резцом [14]:

$$P_z = N_n (\sin \delta + \mu_2 \cos \delta) + \mu_1 N_s + \mu_3 (N_{\delta l} + N_{\delta n}), \quad (2.1)$$

$$P_y = N_s - N_n (\cos \delta - \mu_2 \sin \delta) + N_{\delta l} \sin \nu_1 + N_{\delta n} \sin \nu_2, \quad (2.2)$$

$$P_x = N_{\delta l} \cos \nu_2 - N_{\delta n} \cos \nu_1. \quad (2.3)$$

В процессе резания массива горных пород резец воздействует на последний, оставляя на нем следы – резы [24]. Поэтому в зависимости от шага расстановки резцов t , толщины снимаемой стружки h , а также взаимного расположения плоскостей можно выделить следующие виды резов: блокированный рез (рисунок 2.5 а); полублокированный рез (рисунок 2.5 б); рез с выровненной поверхностью (рисунок 2.5 в); полублокированный повторный рез (рисунок 2.5 г) [56]; шахматный рез (рисунок 2.5 д), применяемый на тоннелепроходческих щитах Herrenknecht S-782, S-441 и характеризующийся большой энергоемкостью процесса разрушения [114]; тангенциальный рез (рисунок 2.5 е). При этом на тоннелепроходческих щитах типа КТ1-5,6 применяется веерный рез, характеризующийся скалыванием межрезцовых целиков породы и сниженной по сравнению с шахматным резом энергоемкостью процесса разрушения (рисунок 2.5 ж).

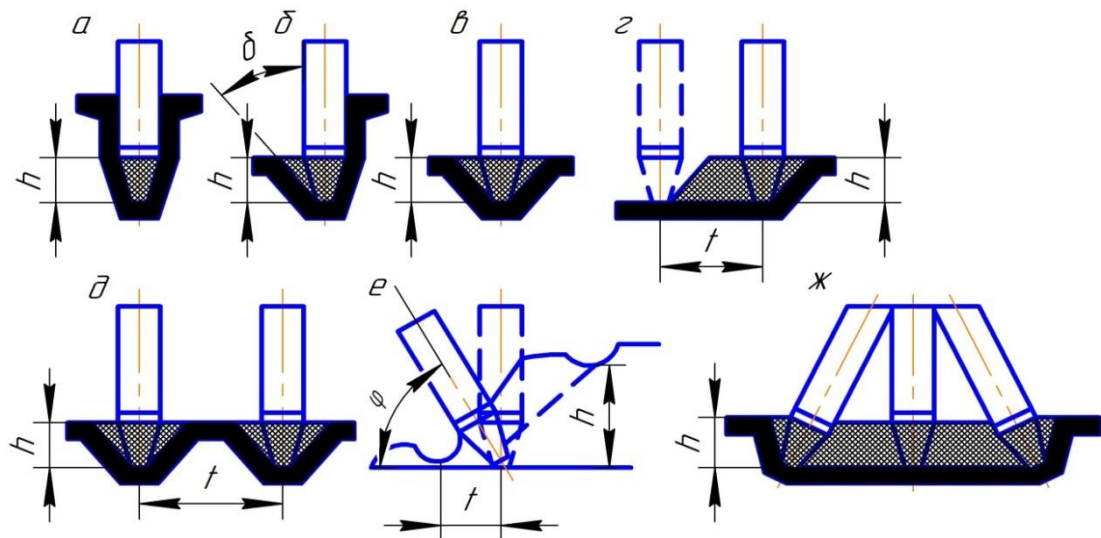


Рисунок 2.5 – Виды резов

Величина отношения шага расстановки резцов t к величине толщины срезаемой стружки называется энергоемкостью разрушения горных пород. При этом шаг резания, при котором достигается минимальная энергоемкость называется оптимальным шагом резания [70]. Наиболее эффективными по энергоёмкости процессами разрушения являются повторное резание с поверхности, шахматное и последовательное резание, а наиболее энергозатратными – резание с выровненной поверхности, свободное и блокированное резание [28]. Для высокопроизводительной и надежной работы горных машин с низкой удельной энергоемкостью процесса разрушения необходимы правильный подбор схемы и шага расстановки резцов, а также значение величины толщины стружки. Для этого производится силовой расчет исполнительного органа, основой которого является расчет усилий на резцовом породоразрушающем инструменте.

Процесс разрушения горной породы резцовым породоразрушающим инструментом горных машин подвержен влиянию большого числа факторов, которые в настоящее время учитываются с помощью эмпирических формул (как было показано в главе 1). В ходе выполнения расчетов по различным методикам, был выявлен большой разброс значений силы на резце в зависимости от предела прочности породы на сжатие при прочих равных условиях (рисунок 2.6) [56].

Анализ графика рисунок 2.6 показал, что при $\sigma_{сж} < 4$ МПа методики ШахтНИУИ и ИГД им. А.А. Скочинского дают завышенное значение усилия резания на передней грани резца, а при $\sigma_{сж} > 4$ МПа методика ШахтНИУИ и при $\sigma_{сж} > 8$ МПа методика ИГД им. А.А. Скочинского дают заниженные значения величины усилия резания на передней грани резца, что говорит о невозможности применения данных методик для расчетов крепких горных пород. При этом, при значениях $3,5 < \sigma_{сж} < 4,5$, что соответствует пределу прочности кембрийской глины на сжатие, методики ШахтНИУИ, РД

12.25.137-89 и ЦНИИподземмаш показали примерно одинаковые величины силы резания на передней грани резца.

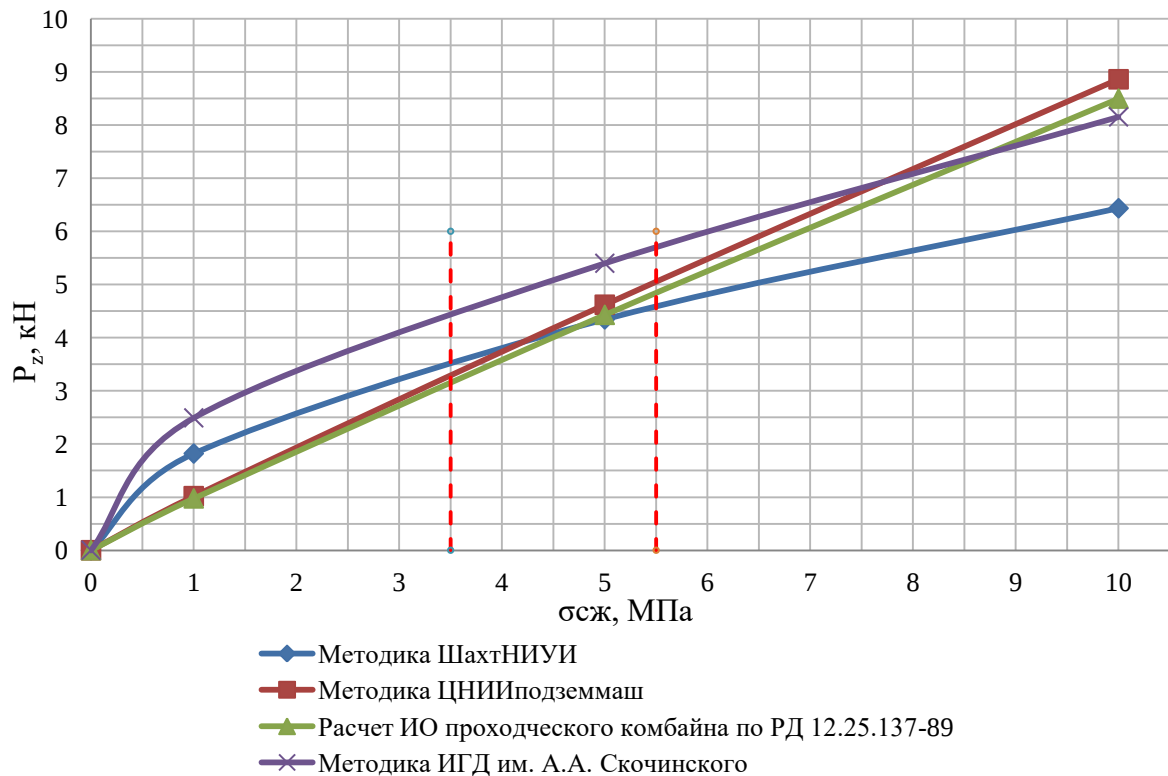


Рисунок 2.6 – График зависимости силы резания на передней грани резца от предела прочности горной породы на сжатие

Таким образом, расчет роторных исполнительных органов тоннелепроходческих щитов, в том числе моделирование их взаимодействия с забойным массивом, при проходке тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга целесообразно производить с использованием методики ЦНИИподземмаш, либо методики РД 12.25.137-89.

2.2 Анализ процесса разрушения горных пород шарошечным породоразрушающим инструментом

Разрушение горных пород шарошечным породоразрушающим инструментом характеризуется высокими контактными напряжениями, возникающими на поверхности разрушаемой горной породы. Внедряясь в массив горных пород, шарошка вызывает его разрушение в направлении,

перпендикулярном к плоскости ее перекатывания [94, 96]. При этом угол бокового развала обычно составляет от 120° и более [8, 9, 16]. При правильном угле заострения контакт между щеками клиновидного обода шарошки и горной породой отсутствует.

При увеличении глубины внедрения диска шарошки в породу образуется уплотненное ядро, которое с увеличением заданной глубины вдавливания увеличивается в размерах, при этом давление оказывается во все стороны разрушаемого массива горных пород, что приводит к росту трещин, сколу и последующему интенсивному разлету частиц горной породы по сторонам диска (рисунок 2.7 а). В этот момент происходит образование так называемого развала, на дне которого остается нарост – остаток уплотненного ядра. В результате внедрения диска шарошки в массив горной породы образуется борозда разрушения, которая характеризуется различными геометрическими параметрами, такими как глубина, ширина, площадь поперечного сечения, объем на единицу длины [17, 73]. Фактическая глубина борозды разрушения h_p называется глубиной разрушения, которая соответствует величине подачи шарошки на забой h_n [10, 11, 54].

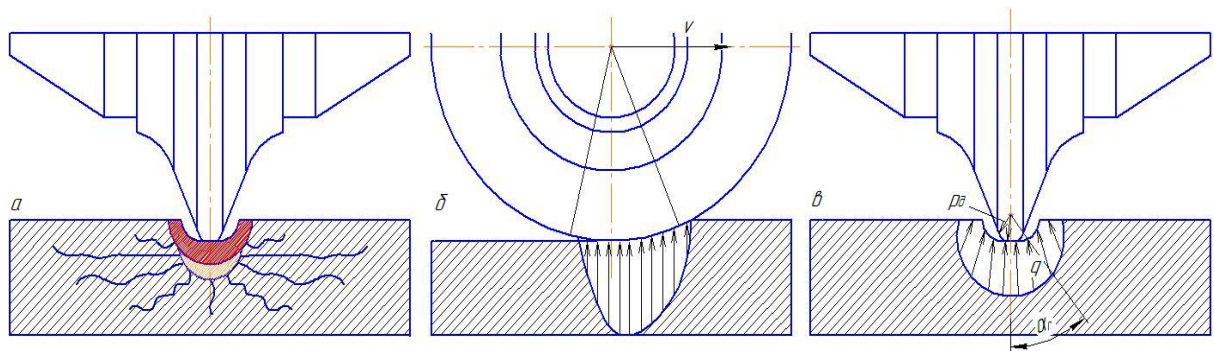


Рисунок 2.7 – Разрушение горных пород шарошечным породоразрушающим инструментом: а – процесс образования уплотненного ядра и распространения трещин; б – распределение давления по длине обода шарошки; в - распределение удельного давления q на вершине дисковой шарошки

При увеличении величины глубины внедрения диска шарошки в породный массив происходит контакт щечек диска шарошки с породой, причем значение контакта увеличивается с глубиной. В процессе перекачивания шарошки по массиву горной породы сколы последней по длине борозды происходят неравномерно, из-за чего щечки диска шарошки находятся в контакте с породой то с одной, то с другой стороны [8, 12, 15].

Эпюра давлений, представленная на рисунке 2.7 б, позволяет сделать вывод о том, что наибольшее давление на породный массив шарошка оказывает по линии, проходящей через ось вращения диска перпендикулярно к поверхности забоя. Следует заметить, что помимо набегающей части обода на породный массив давит и сбегаящая часть обода шарошки. Это объясняется упругостью горной породы и подштыбровкой обода шарошки продуктами разрушения [59].

На рисунке 2.7 в представлено распределение удельного давления на вершине дисковой шарошки. При этом закон распределения удельного давления по вершине обода имеет следующий вид (2.4) [27]:

$$q = \frac{2P_r}{\pi p_d} \cos \alpha_r, \quad (2.4)$$

где P_r – нормальное давление на единицу поверхности обода в соответствующем радиальном сечении, МПа; p_d – радиус закругления диска, мм; α_r – угол между радиальным сечением вершины и плоскостью симметрии шарошки, перпендикулярной к ее оси вращения, град. [27, 47, 65].

Проанализировав представленную формулу можно сделать вывод, что давление на дисковую шарошку будет максимальным в середине ее вершины, при этом снижение давления к краям вершины происходит по косинусоидальному закону.

В процессе разрушения массива горной породы на шарошку действуют следующие силы (рисунок 2.8):

- усилие перекачивания P_z , направленное параллельно плоскости резания;
- усилие подачи или напорное усилие P_y , направленное перпендикулярно к плоскости резания;
- реакции горной породы P в плоскости сил P_z и P_y (обозначим абсциссу точки A приложения ее к ободу через K);
- сила сцепления $Q_{сц}$, затрудняющая проскальзывание шарошки по массиву горной породы;
- боковые усилия P_{x1} и P_{x2} , а также вызываемые ими силы трения μP_{x1} и μP_{x2} на ободу диска.

Основными показателями, характеризующими процесс разрушения забоя дисковыми шарошками являются:

- усилие подачи или напорное усилие - P_y ;
- усилие перекачивания - P_z .

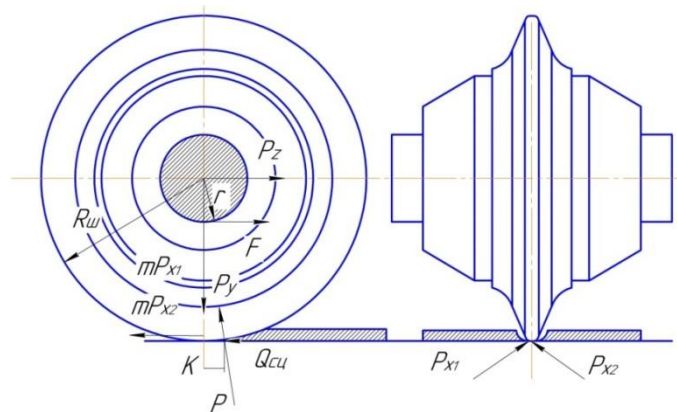


Рисунок 2.8 – Схема сил, действующих на дисковую шарошку

Окончательно в общем случае уравнение движения дисковой шарошки будет выглядеть следующим образом (2.5):

$$P_z = \frac{k + R_0 \psi}{R_{ш}} P_y + (P_{x1} + P_{x2}) \mu, \quad (2.5)$$

где ψ – коэффициент трения в цапфе; $R_{ш}$ – радиус шарошки, мм; R_0 – радиус оси шарошки, мм. [42, 43].

Проанализировав уравнение (2.5) можно сделать вывод, что усилие перекатывания P_z возрастает с ростом усилия подачи P_y , боковых усилий P_{x1} и P_{x2} , радиуса оси шарошки R_0 , коэффициента трения в цапфе ψ и коэффициента трения скольжения шарошки о массив горной породы μ и снижается с увеличением радиуса шарошки $R_{ш}$.

Для определения методики расчета усилий на дисковых шарошках [39], установленных на исполнительном органе тоннелепроходческого щита, применяемого при проходке тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга был проведен анализ методик Л.И. Барона – Л.Б. Глатмана, И.А. Леванковского, J. Rostami, L. Ozdemir [58, 111].

Расчеты, выполненные по представленным выше методикам, показывают достаточный разброс значений усилия перекатывания в зависимости от глубины внедрения диска шарошки в породу (рисунок 2.9). В ходе анализа графиков было выявлено различие в расчетах по отечественным и зарубежным методикам. При этом, в ходе расчетов по методике Барона – Глатмана, были получены завышенные значения усилий перекатывания. Таким образом для расчетов рекомендуется пользоваться методиками И.А. Леванковского и Rostami – Ozdemir.

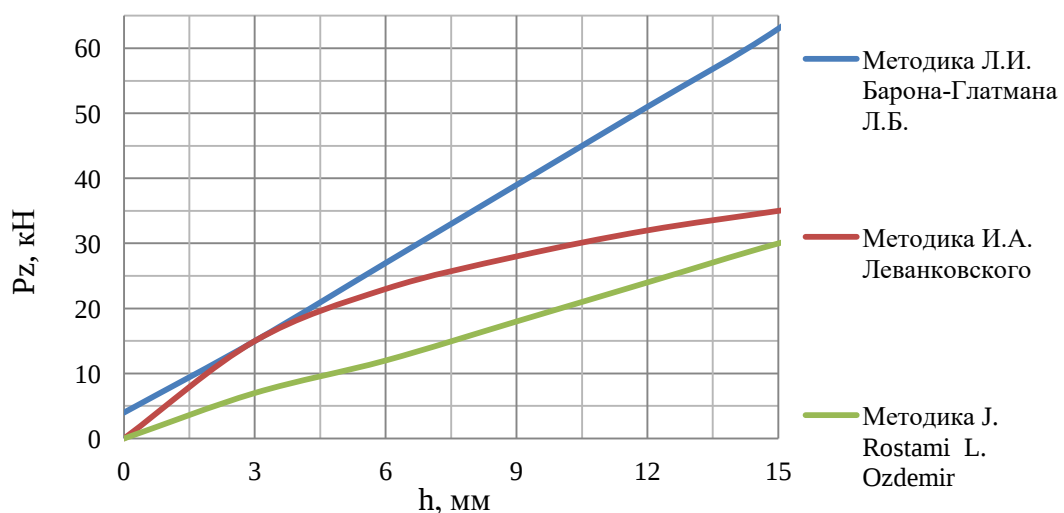


Рисунок 2.9 – Зависимости усилия перекатывания дисковых шарошек от глубины внедрения в породу

2.3 Схема расстановки породоразрушающего инструмента на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита

Для ведения проходческих работ исполнительные органы оснащают группой породоразрушающих инструментов (резцов, ковшей и шарошек) расположенных в определенном порядке по так называемой схеме набора (расстановки) породоразрушающих инструментов [67]. Схема расстановки породоразрушающих инструментов – графическое изображение расстановки комплекта породоразрушающего инструмента с указанием координат каждого инструмента, определяющих его место на образующей поверхности исполнительного органа.

Основными параметрами схемы расстановки породоразрушающего инструмента является шаг расстановки t и количество породоразрушающих инструментов в линии резания. Шаг расстановки породоразрушающего инструмента – это расстояние между вершинами породоразрушающих инструментов, расположенных в соседних линиях резания. Существуют шахматная, последовательная, а также сплошная схемы расстановки породоразрушающего инструмента [7].

Рассмотрим на примере роторного исполнительного органа, предназначенного для комбинированного забойного массива тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782 схему расстановки породоразрушающего инструмента. На рисунке 2.10 представлена схема расстановки резцов, из которой следует, что на каждой линии резания (радиусе расстановки) находится несколько резцов, описывающих окружность определенного радиуса в зависимости от расстояния установки относительно оси.

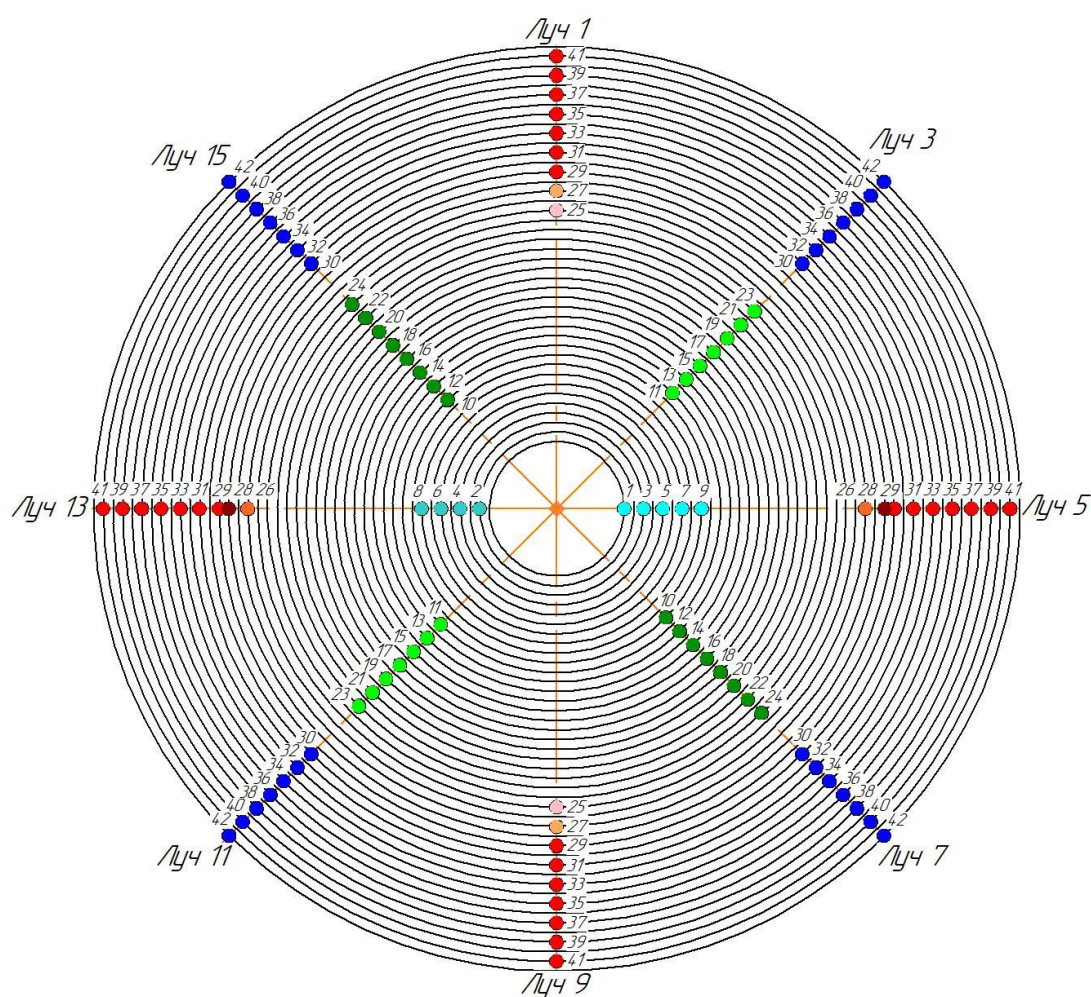


Рисунок 2.10 – Схема расстановки резцов на роторном исполнительном органе ТМПК Herrenknecht S-782

На стадии проектирования исполнительного органа тоннелепроходческого щита формируется таблица размещения породоразрушающего инструмента на исполнительном органе. В таблице 2.1 показаны радиусы расстановки и линии резания резцового породоразрушающего инструмента для тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782. В таблице по вертикали отображается номер луча, на котором устанавливается резцы, а также радиус расстановки в миллиметрах и номер линии резания [67]. Из таблицы следует, что с 42 по 29 линию резания установлено по 4 резца, с 28 по 10 линию резания установлено по 2 резца, а с 9 по 1 линию резания установлено по 1 резцу. Помимо этого, на каждом луче установлено по одному ковшу.

Таблица 2.1 – Таблица расстановки резцов на исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782

Ковш Луч 1	Ковш Луч 3	Ковш Луч 5	Ковш Луч 7	Ковш Луч 9	Ковш Луч 11	Ковш Луч 13	Ковш Луч 15	Радиус, мм	Линия резания
	*		*		*		*	4800	42
*		*		*		*		4700	41
	*		*		*		*	4600	40
*		*		*		*		4500	39
	*		*		*		*	4400	38
*		*		*		*		4300	37
	*		*		*		*	4200	36
*		*		*		*		4100	35
	*		*		*		*	4000	34
*		*		*		*		3900	33
	*		*		*		*	3800	32
*		*		*		*		3700	31
	*		*		*		*	3600	30
*		*		*		*		3500	29
		*				*		3400	28
*				*				3300	27
		*				*		3200	26
*				*				3100	25
			*				*	3000	24
	*				*			2900	23
			*				*	2800	22
	*				*			2700	21
			*				*	2600	20
	*				*			2500	19
			*				*	2400	18
	*				*			2300	17
			*				*	2200	16
	*				*			2100	15
			*				*	2000	14
	*				*			1900	13
			*				*	1800	12
	*				*			1700	11
			*				*	1600	10
	*							1500	9
						*		1400	8
		*						1300	7
						*		1200	6
		*						1100	5
						*		1000	4
		*						900	3
						*		800	2
		*						700	1

На рисунке 2.11 представлена схема расстановки шарошек на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782. Радиус расстановки шарошек обозначен буквой R с индексом соответствующим номеру шарошки. Радиусы расстановки шарошек на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита S-782

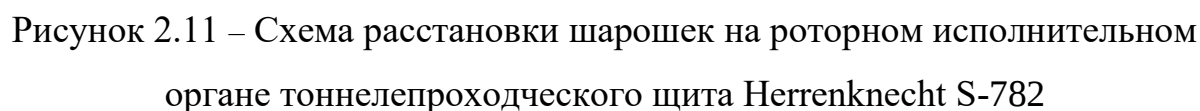


Таблица 2.2 – Таблица расстановки шарошек на исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782

Линия резания	Радиус, мм	Луч 1	Луч 2	Луч 3	Луч 4	Луч 5	Луч 6	Луч 7	Луч 8	Луч 9	Луч 10	Луч 11	Луч 12	Луч 13	Луч 14	Луч 15	Луч 16
52	5325	*								*							
51	5315,41					*											
50	5296,63													*			

Продолжение таблицы 2.2

49	5264,73			*													
48	5226,73											*					
47	5183,18							*									
46	5134,75															*	
45	5082,15		*														
44	5026,16										*						
43	4967,63							*									
42	4907,42																*
41	4840				*								*				
40	4750												*				
39	4650						*										
38	4550						*										
37	4450																*
36	4350																*
35	4250																
34	4150								*								
33	4050								*								
32	3950												*				
31	3850												*				
30	3750				*												
29	3650				*												
28	3550								*								
27	3450								*								
26	3350	*															
25	3250	*															
24	3150													*			
23	3050													*			
22	2950					*											
21	2850					*											
20	2750								*								
19	2650								*								
18	2550	*															
17	2450	*															
16	2350								*								
15	2250								*								
14	2150	*															
13	2050	*															
12	1950								*								
11	1850								*								
10	1750	*															
9	1650	*															
8	1550								*								
7	1450								*								
6	1350	*															
5	1250	*															
4	1150								*								
3	1050								*								
2	950	*															
1	850	*															

Эффективность разрушения забоя роторным исполнительным органом зависит, прежде всего от физико-механических свойств разрушаемого забойного массива и конструкции самого исполнительного органа. Как было

сказано ранее, разрушение забойного массива роторным исполнительным органом ТМПК Herrenknecht S-782 производится по схеме резания «сплошным забоем». При такой схеме разрушения каждый резец режет по своей линии, что означает отсутствие породных целиков между резцами. Такую схему резания можно считать не эффективной при разрушении сухого забойного массива, состоящего из достаточно хрупкой кембрийской глины.

Для повышения эффективности процесса разрушения кембрийской глины резанием [106] необходимо добиться хрупкого скола или хрупкого резания. Повышение интенсификации процесса разрушения забойного массива состоящего из кембрийской глины возможно выбором рациональной схемы расстановки породоразрушающего инструмента, при этом такой схемой можно считать разнесенную. При такой схеме резцы установлены с некоторым промежутком на котором, как предполагается, будет образовываться скол породы (рисунок 2.12).

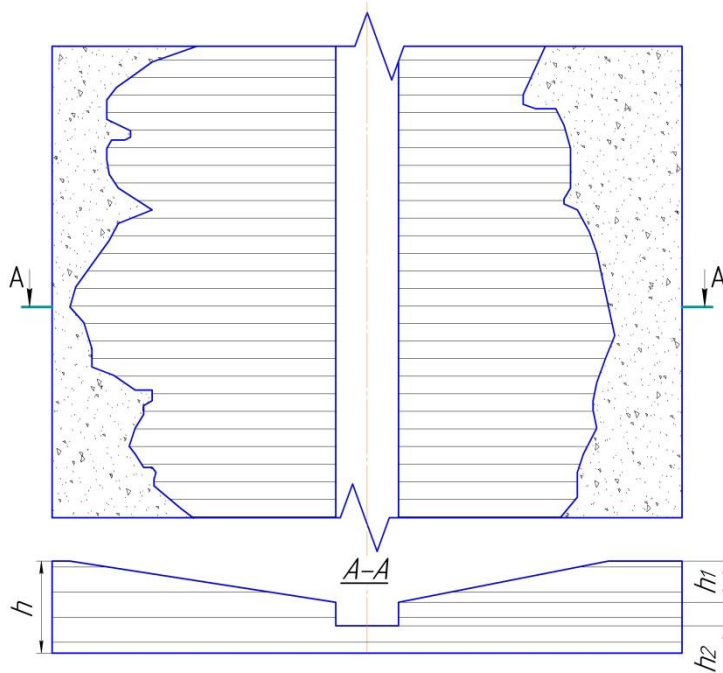


Рисунок 2.12 – Стадии разрушения кембрийской глины резанием

На рисунке 2.12 графически представлен процесс разрушения глины резанием, который можно условно разбить на две стадии [54], хрупкая h_1 - отделение трапециевидных сколов и пластичная h_2 – появление борозды,

нижняя поверхность которой остается прямолинейной.

Таким образом, разрушение в хрупкой стадии массива кембрийской глины происходит с большим количеством сколов породы, что в свою очередь характеризуется снижением энергоемкости процесса, а также повышением скорости проходки тоннеля. Для подтверждения данной теории необходимо провести экспериментальные исследования, в ходе которых будет определено значение величины толщины срезаемой стружки, при которой хрупкая стадия разрушения переходит в вязкую.

2.4 Определение рациональной величины подачи исполнительного органа, усилий на резцовом и шарошечном породоразрушающем инструменте, а также установление критических моментов на исполнительном органе тоннелепроходческого щита

В настоящее время для силового расчета исполнительного органа [70] применяется методика, включающая:

- определение усилий на резцовых породоразрушающих инструментах;
- определение крутящего момента от резцового породоразрушающего инструмента;
- определение усилий на шарошечном породоразрушающем инструменте;
- определение крутящего момента от шарошечного породоразрушающего инструмента;
- определение общего крутящего момента на исполнительном органе.

Силовой расчет исполнительного органа тоннелепроходческого щита производится на основе данных полученных при проходке тоннеля Невско-Василеостровской линии метрополитена Санкт-Петербурга тоннелепроходческим щитом Herrenknecht S-782.

Величина толщины стружки срезаемой резцами роторного исполнительного органа пропорциональна скорости его подачи на забой и может быть определена по формуле (2.6):

$$h = \frac{v_n}{n_{ve} \cdot m}, \quad (2.6)$$

где m - число резцов в линии резания (по технической документации для ТПМК Herrenknecht S-782 общее количество резцов, установленных на роторе составляет 103 шт., при этом 56 шт. располагаются по 4 резца в линии резания, 38 – по 2 резца в линии резания и 9 – по 1 резцу в линии резания); v_n - скорость подачи исполнительного органа на забой, м/с; n_{uo} - обратная частота вращения исполнительного органа, c^{-1} .

Среднее усилие резания на резцах может быть определено по методике ЦНИИподземмаш (1.3). Результаты расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчета усилий на резцах ТПМК S-782 в зависимости от физико-механических свойств горной породы

1 резец в линии резания														
$\sigma_{сж}$, МПа	P_k	v_n , м/с	n , с ⁻¹	m	h , мм	b , мм	t , мм	S , мм ²	K_a	M_ϕ	K_e	P_z , кН	n , шт	ΣP_z , кН
5	59	0,0005	0,025	1	20	100	100	200	1	0,4	1,92	5,38	9	48,4
10	113	0,0005	0,025	1	20	100	100	200	1	0,4	1,92	10,33	9	92,9
15	166	0,0005	0,025	1	20	100	100	200	1	0,4	1,92	15,12	9	136,1
20	217	0,0005	0,025	1	20	100	100	200	1	0,4	1,92	19,81	9	178,3
25	268	0,0005	0,025	1	20	100	100	200	1	0,4	1,92	24,43	9	219,9
30	318	0,0005	0,025	1	20	100	100	200	1	0,4	1,92	29,00	9	261,0
2 резца в линии резания														
$\sigma_{сж}$, МПа	P_k	v_n , м/с	n , с ⁻¹	m	h , мм	b , мм	t , мм	S , мм ²	K_a	M_ϕ	K_e	P_z , кН	n , шт	ΣP_z , кН
5	59	0,0005	0,025	2	10	100	100	200	1	0,4	1,92	3,34	38	127,0
10	113	0,0005	0,025	2	10	100	100	200	1	0,4	1,92	6,41	38	243,7
15	166	0,0005	0,025	2	10	100	100	200	1	0,4	1,92	9,39	38	356,8
20	217	0,0005	0,025	2	10	100	100	200	1	0,4	1,92	12,30	38	467,5
25	268	0,0005	0,025	2	10	100	100	200	1	0,4	1,92	15,18	38	576,7
30	318	0,0005	0,025	2	10	100	100	200	1	0,4	1,92	18,01	38	684,5
4 резца в линии резания														

Продолжение таблицы 2.3

$\sigma_{сж}$, МПа	P_k	v_n , м/с	n , с ⁻¹	m	h , мм	b , мм	t , мм	S , мм ²	K_a	M_θ	K_e	P_z , кН	n , шт	ΣP_z , кН
1	13	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	0,51	56	28,7
5	59	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	2,32	56	130,1
10	113	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	4,46	56	249,6
25	268	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	10,55	56	590,5
50	514	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	20,23	56	1133,0
75	752	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	29,62	56	1658,6
1	13	0,0005	0,025	4	5	100	100	200	1	0,4	1,92	0,51	56	28,7

Расчет крутящего момента на исполнительном органе, необходимого для разрушения забойного массива резцами выполняется по следующей зависимости (2.7):

$$M_{pi} = P_{zpi} \cdot n_i \cdot R_{cpi}, \quad (2.7)$$

где P_{zpi} – усилие на резце в группе расстановки резцов, кНм; n_i – количество резцов в группе расстановки резцов ($n_1 = 9$; $n_2 = 38$; $n_4 = 56$); R_{cpi} – средний радиус расстановки групп резцов (для группы расстановки резцов, в линии резания которых находится по одному резцу – $R_{cp1} = 1,1$ м; по два резца – $R_{cp2} = 2,5$ м; по четыре резца – $R_{cp4} = 4,15$ м (рисунок 2.10)).

Для получения общего значения крутящего момента на исполнительном органе необходимо просуммировать значения крутящих моментов групп расстановки резцов (2.8):

$$\sum M_p = M_{p1} + M_{p2} + M_{p4}. \quad (2.8)$$

Аналогичным образом рассчитываются значения усилий резания и значения крутящего момента, необходимых для разрушения забойного массива забурником и ковшами.

Расчет нагрузок на дисковые шарошки производится по методике J. Rostami, L. Ozdemir (1.11).

Проходка тоннеля осуществлялась в нижнекембрийских глинах, с прослойками известняков, песчаников, а также с включениями гранитных

валунов. В таблице 2.4 представлены характеристики пород [85].

Таблица 2.4 – Механические свойства горных пород

Горные породы	Предел прочности, МПа		Коэффициент крепости f
	на сжатие $\sigma_{сж}$	на растяжение σ_p	
Верхнекотлинские глины	1-5	0,3-2	1,0-1,5
Известняк	46-75	4-8	6
Песчаник	30 - 200	4-18	15
Гранит	80-250	7-23	15

Расчет крутящего момента производится по формуле (2.9) [18]:

$$M_p = P_z \cdot n \cdot R_{cp}, \quad (2.9)$$

где n – количество шарошек; R_{cp} – средний радиус расстановки шарошек, м.

Таблица 2.5 – Результаты расчета усилий на двойных и одинарных шарошках ТПМК S-782

s, мм	R, мм	T, мм	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	γ	p, мм	ψ	P_z , кН	P_{z2} , кН
200	216	18	5	1,0	0,37	15	0,1	3,4	4,8
200	216	18	10	1,5	0,37	15	0,1	6,3	8,8
200	216	18	15	2,0	0,37	15	0,1	9,0	12,6
200	216	18	20	2,5	0,37	15	0,1	11,8	16,5
200	216	18	25	3,0	0,37	15	0,1	14,5	20,3
200	216	18	30	3,5	0,37	15	0,1	17,3	24,2

Для определения крутящего момента на исполнительном органе, необходимо просуммировать крутящие моменты от резцов, ковшей, забурника, шарошек (2.10):

$$M_{рез} = M_{рез} + M_{ков} + M_{заб} + M_{шар}. \quad (2.10)$$

Основным силовым показателем привода щитового

тоннелепроходческого комплекса является крутящий момент на роторном исполнительном органе. В общем виде он может быть определен по следующей зависимости (2.11) [19]:

$$M_{кр} = M_{рез} + M_{тр} + M_x + M_{nn}, \quad (2.11)$$

где $M_{рез}$ – момент, необходимый только на резание горной породы; $M_{тр}$ – момент, необходимый на преодоление сил трения поверхности ротора о массив горной породы; M_x – момент, необходимый для преодоления сопротивления вращения ротора на холостом ходу; M_{nn} – момент, необходимый для перемещения разрушенной породы из нижней части щита в верх в углублениях, ковшах или других устройствах ротора (в тоннелепроходческих щитах с активным грунтовым пригрузом забоя – момент необходимый для перемешивания разрушенной породы).

Во время проходки тоннеля по глинистым породам со значением предела прочности горной породы на сжатие от 1 до 5 МПа, значение крутящего момента идущего на разрушение породы составляет 20-25 % [19].

Таким образом, общий крутящий момент на исполнительном органе определяется по формуле (2.12):

$$M_{кр} = k \cdot M_{рез}, \quad (2.12)$$

где k – коэффициент, учитывающий значения крутящих моментов идущих на преодоление сил трения, преодоление холостого хода, перемешивание породы, $k = 4$.

Таким образом, при скорости подачи исполнительного органа на забой $v_n = 0,0005$ м/с, и скорости вращения ротора $n = 0,05$ с⁻¹ область применения тоннелепроходческого щита будет ограничена значением крутящего момента на исполнительном органе (рисунок 2.13). Для расширения области применения тоннелепроходческого щита (разрушение забоя состоящего из кембрийской глины и гранитных валунов) необходимо снижение скорости подачи исполнительного органа на забой, что также приведет к снижению

скорости проходки тоннеля.

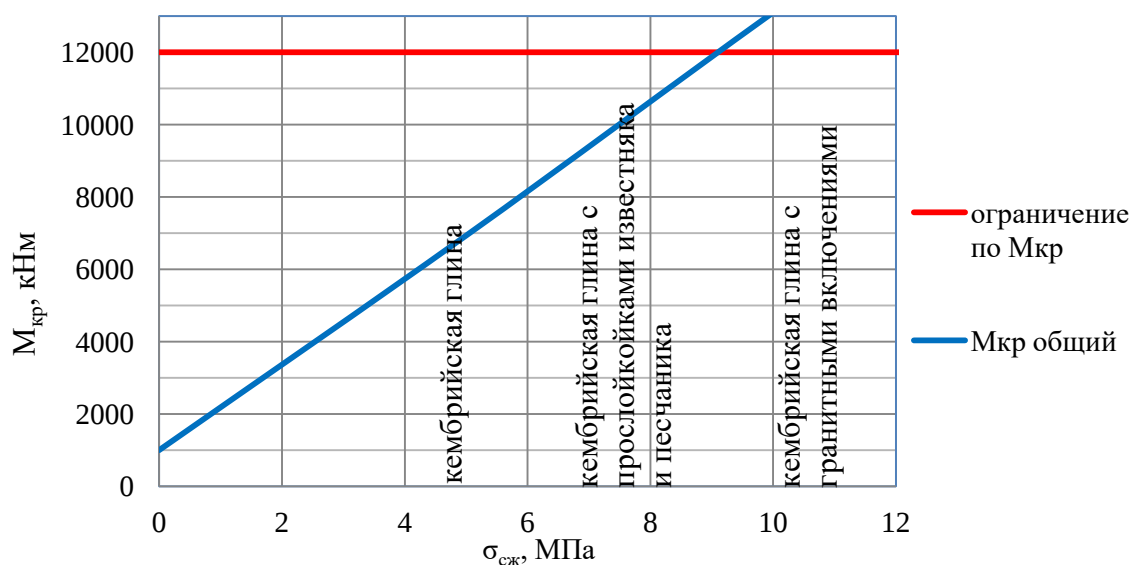


Рисунок 2.13 – График зависимости крутящего момента от предела прочности породы на сжатие (область применения тоннелепроходческого щита)

Далее на основании представленных выше расчетов была построена номограмма зависимости крутящего момента и производительности от скорости подачи исполнительного органа на забой (рисунок 2.14).

Анализ номограммы показал, что при работе по забойному массиву, состоящему из кембрийской глины, исполнительный орган будет иметь скорость подачи до 0,0007 м/с (точка А'), ограниченную номинальным значением крутящего момента (ограничение 4) и скоростью выдачи отработанной породы из призабойного пространства (ограничение 5), при этом, теоретическая производительность составит $Q_T = 5388 \text{ м}^3/\text{сут}$ (точка А"), что соответствует эксплуатационным темпам проходки $\Pi_{эм} = 21,4 \text{ м/сут}$.

Во время работы исполнительного органа тоннелепроходческого щита по неоднородному забойному массиву, состоящему из кембрийской глины и прослоек известняка суммарной мощностью 1 м, скорость подачи будет ограничена значением номинального крутящего момента (точка В), составляющего 12000 кНм. При этом скорость подачи будет равна 0,000485 м/с (точка В') в виду возросших значений усилий на резцах и, как

следствие, крутящего момента связанных с изменением физико-механических свойств разрушаемого массива. При такой скорости подачи значения теоретической производительности и эксплуатационных темпов проходки будут составлять $Q_m = 3733 \text{ м}^3/\text{сут}$ (точка В") и $P_{эм} = 16,4 \text{ м}/\text{сут}$. Таким образом, наличие твердых прослоек в массиве кембрийской глины приводит к существенному снижению скорости проходки тоннеля.

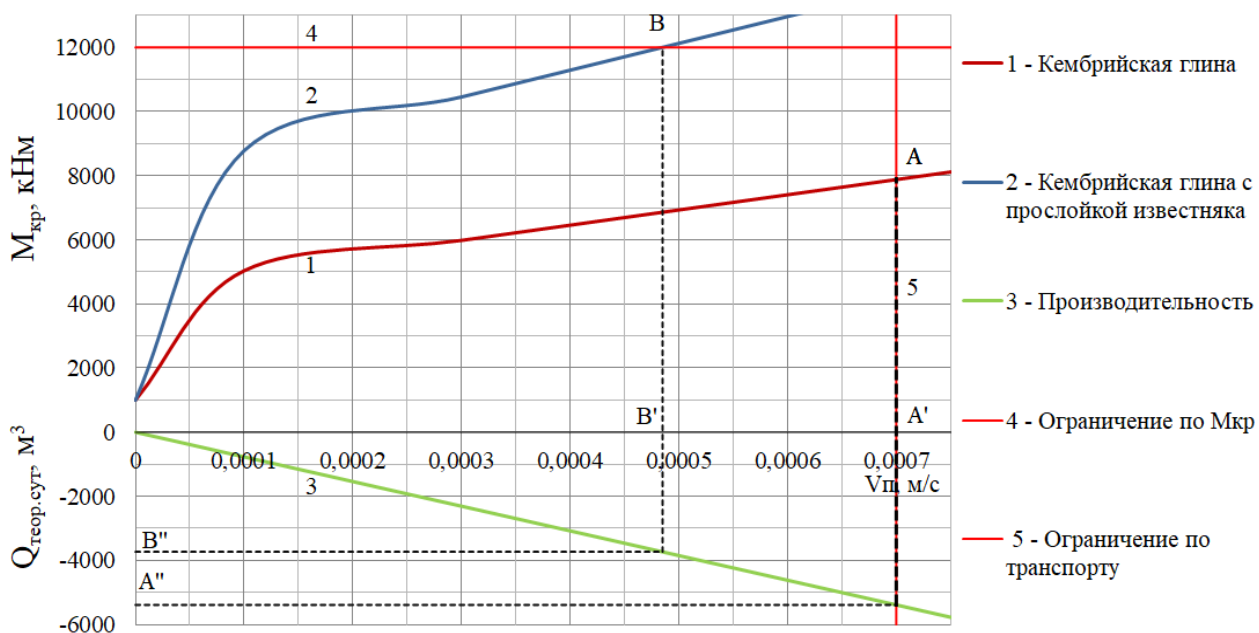


Рисунок 2.14 – Зависимость крутящего момента и производительности от скорости подачи исполнительного органа

2.5 Теоретическое обоснование прироста величины внедрения дисковых шарошек в породу при наложении на них ударных нагрузок

В настоящий момент существует проблема, связанная с невозможностью эффективного разрушения смешанного забойного массива исполнительными органами тоннелепроходческих щитов. Однако известны достаточно эффективные способы разрушения массивов путем наложения ударных нагрузок на породоразрушающие инструменты горных машин. Для интенсификации процесса разрушения смешанного забойного массива, предлагается наложить на породоразрушающие инструменты роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита ударную нагрузку. При

этом, наложение ударной нагрузки на резцы, установленные на роторе невозможно, в виду их большого количества, а также отсутствия места под установку ударной конструкции. Количество дисковых шарошек на исполнительном органе существенно меньше количества резцов, при этом посадочное место под шарошку имеет достаточные габариты для установки ударной конструкции. Поэтому рациональным решением будет наложение ударной нагрузки на дисковые шарошки, выступающие перед резцами за плоскость роторного исполнительного органа, и осуществляющие предварительное разрушение забойного массива.

Наложение на дисковые шарошки ударной нагрузки позволит увеличить глубину внедрения породоразрушающего инструмента [27]. Помимо этого при разрушении забойного массива кроме отделения продуктов разрушенной породы на забойном массиве будет формироваться особый слой, называемый зоной предразрушения, ослабленный развитой системой трещин [80, 82].

Глубина внедрения диска шарошки состоит из трех составляющих: глубины внедрения полученной в результате воздействия осевого усилия P_{oc} , глубины внедрения полученной в результате ударной нагрузки $A_{y\partial}$, и уточняющего коэффициента $k = 1$.

Для определения зависимости глубины внедрения диска шарошки в породу от осевого усилия применяется формула (2.13) [70]:

$$h_{Poc} = \frac{3 \cdot 10^2 \cdot P_{oc}}{R \cdot f \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu_1 \right) \cdot K_3}, \quad (2.13)$$

где α – угол заострения, град; f – крепость породы; R – радиус шарошки, мм; P_{oc} – осевое усилие, кН; μ_1 – коэффициент трения металла шарошки о породу; K_3 – коэффициент затупления диска шарошки.

Для определения зависимости глубины внедрения диска шарошки в

породу от ударной нагрузки применяется формула (2.14) [70]:

$$h_{\text{Ауд}} = \sqrt{\frac{P_{\text{уд}}}{Z \cdot d \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot (\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu) \cdot K_3 \cdot n_{\text{уд}}}}, \text{ м} \quad (2.14)$$

где z – число лезвий; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности породы на сжатие, Па; α – угол заострения, град; f – крепость породы; d – диаметр шарошки, м; $P_{\text{уд}}$ – ударная мощность, Вт; μ – коэффициент трения металла шарошки о породу; K_3 – коэффициент затупления диска шарошки; $n_{\text{уд}}$ – частота ударов, с^{-1} [85].

В ходе исследований было выдвинуто предположение о том, что для определения глубины внедрения шарошки в породу при наложении на нее ударной нагрузки возможно применение правила аддитивности, заключающегося в сложении значений глубины внедрения полученных в результате воздействия осевого усилия и ударной нагрузки (2.15):

$$h = k \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^2 \cdot P_{\text{ос}}}{R \cdot f \cdot (\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu) \cdot K_3} + \sqrt{\frac{P_{\text{уд}}}{Z \cdot d \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot (\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu) \cdot K_3 \cdot n_{\text{уд}}}} \right) \quad (2.15)$$

По результатам теоретических исследований, выполненных по формуле 2.15 были получены следующие графики (рисунок 2.15), анализ которых показал, что при разрушении породного массива дисковыми шарошками с осевым усилием совместно с накладываемой ударной нагрузкой происходит увеличение значения глубины внедрения диска шарошки в 1,25 раза для кембрийской глины и 1,33 раза для известняка.

Однако возможно расхождение теоретических и экспериментальных значений глубин внедрения шарошек в породу объясняемое потерями энергии при ударе. При проведении экспериментальных исследований в процессе передачи ударной нагрузки от источника к породоразрушающему инструменту будет происходить частичная потеря энергии удара, связанная с деформациями в экспериментальной модели шарошки (деформация осей, деформация в подшипниковых узлах).

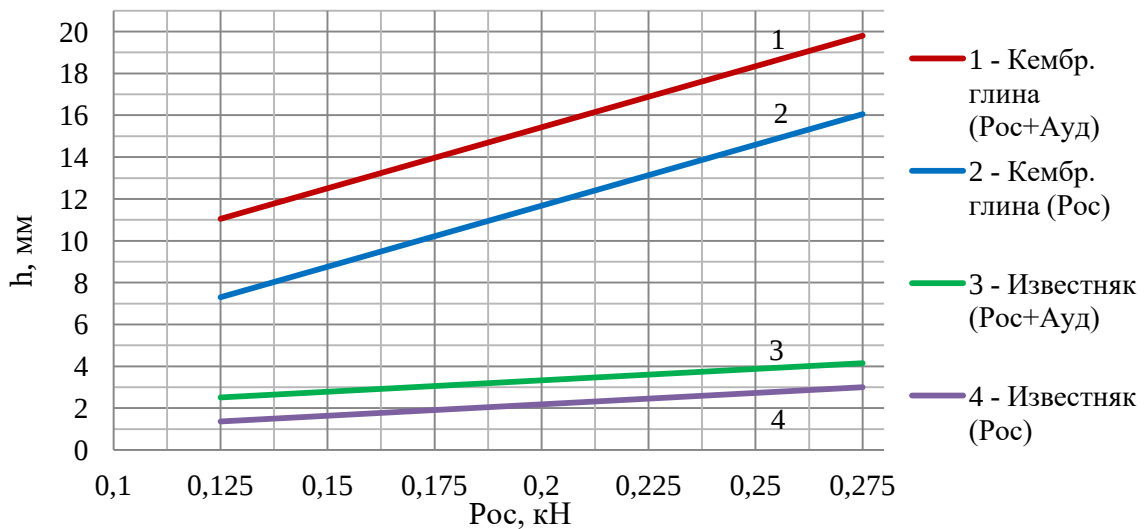


Рисунок 2.15 – Зависимость теоретической глубины внедрения шарошек в кембрийскую глину и известняк от осевого усилия и осевого усилия совместно с накладываемой ударной нагрузкой

Далее были произведены теоретические исследования по определению зависимости глубины внедрения шарошки при наложении на нее ударной нагрузки с постоянным осевым усилием. Анализ графика (рисунок 2.16) показал, что величина глубины внедрения шарошки в породу с накладываемой ударной нагрузкой при постоянном осевом усилии описывается экспоненциальной зависимостью.

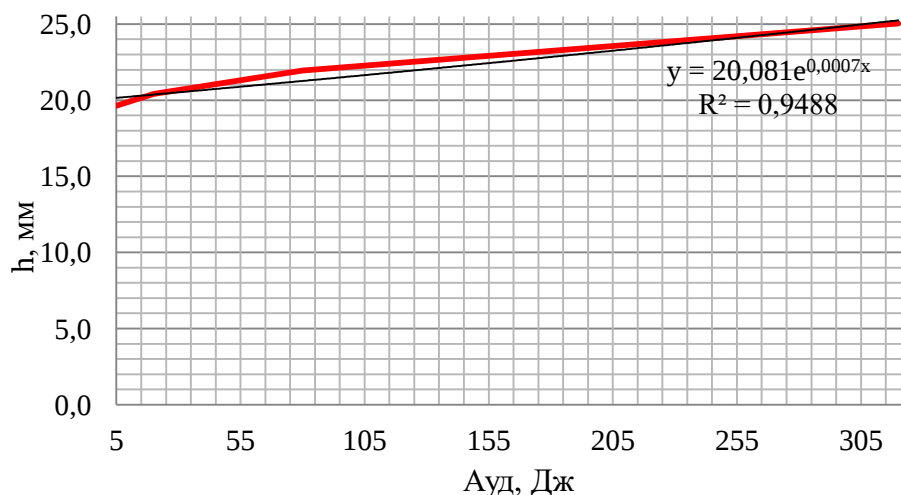


Рисунок 2.16 – Зависимость глубины внедрения шарошки в породу от энергии удара при постоянном осевом усилии

2.6 Выводы по второй главе

1. На основе произведенного анализа методик расчета усилий на резцовом и шарошечном породоразрушающем инструменте, определены методики, наиболее подходящие для описания процесса разрушения пород в горно-геологических условиях Метростроя Санкт-Петербурга.
2. Определена рациональная область применения, а также производительность тоннелепроходческого щита с роторным исполнительным органом, оснащенным резцовым и шарошечным породоразрушающим инструментом.
3. Теоретически обосновано увеличение глубины внедрения диска шарошки на 25 % в кембрийскую глину, и на 33 % в известняк, при наложении на нее ударной нагрузки.
4. Выдвинуто предположение об аддитивности глубин внедрения диска шарошки, полученных в результате воздействия осевого усилия и ударной нагрузки.
5. Для более детального изучения процесса разрушения пород виброактивными шарошками, а также проверки предположения об аддитивности глубин внедрения, необходимо провести экспериментальные исследования на лабораторных стендах.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН С ТВЕРДЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ ВИБРОАКТИВНЫМ И РЕЗЦОВЫМ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

3.1 Постановка задач экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований является определение основных закономерностей процесса разрушения кембрийских глин с твердыми прослойками виброактивным и резцовым породоразрушающим инструментом, а также проверка выдвинутой гипотезы аддитивности глубин внедрения диска шарошки, полученных в результате воздействия осевого усилия и ударной нагрузки.

Поэтому в соответствии с поставленной в работе целью и задачами необходимо было провести экспериментальные исследования для подтверждения данных полученных в результате теоретических исследований и предположения об аддитивности глубин внедрения диска шарошки в образцы породы:

1. Разработка и изготовление экспериментального стенда для изучения разрушения пород разной крепости (кембрийской глины и известняка) виброактивными шарошками;
2. Разработка методики проведения экспериментальных исследований;
3. Исследование процесса внедрения виброактивных шарошек в породу в зависимости от прилагаемого осевого усилия и энергии удара;
4. Анализ результатов экспериментальных исследований.

3.2 Стенд для исследования процесса разрушения кембрийской глины и известняка виброактивным породоразрушающим инструментом

В соответствии с сформулированными ранее требованиями, был спроектирован и изготовлен стенд для исследования разрушения пород

виброактивными шарошками (рисунок 3.1).

Экспериментальный стенд состоит из: основание рамы 1, установленное над разрушаемым образцом породы 2. В направляющие основания рамы вставлена подвижная часть рамы 3, направляющие которой изготовлены из металлического профиля меньшего диаметра, чем направляющие основания рамы. На подвижной части рамы имеется захват 4 для жесткого крепления перфоратора 5. Таким образом, жестко закрепленный перфоратор имеет возможность вертикального перемещения. Модель шарошки 6, имеющая три дисковые шарошки диаметром 60 мм устанавливается в перфоратор при помощи штанги 7. В центральную часть шарошечной модели вкручивается съемная направляющая 8, служащая для дополнительной центрации модели шарошки на образце породы [104]. Для изменения прикладываемого осевого усилия на верхнюю часть подвижной рамы устанавливаются сменные грузы 9. Контроль величины внедрения шарошки в образец породы осуществляется при помощи линейки глубиномера штангенциркуля.

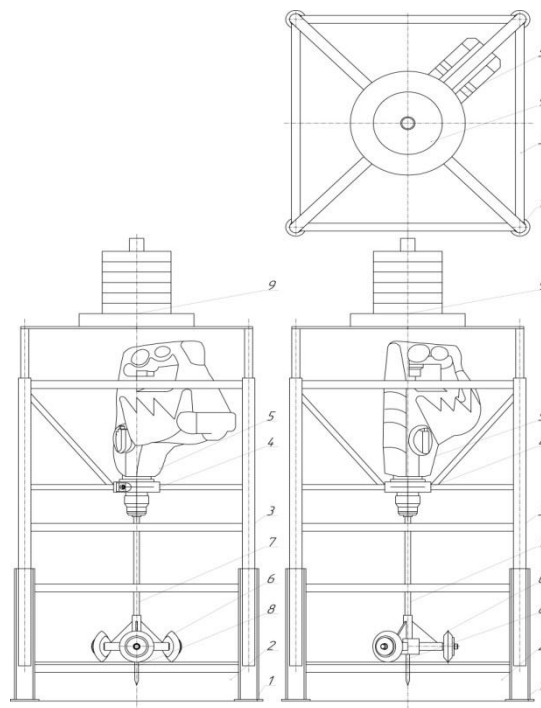


Рисунок 3.1 – Стенд для исследования разрушения глин виброактивным породоразрушающим инструментом

3.3 Разработка методики проведения экспериментальных исследований

3.3.1 Цели и задачи экспериментальных исследований

1. Установление зависимости величины внедрения виброактивных шарошек в образцы кембрийской глины и известняка от величины осевого усилия.

2. Установление зависимости величины внедрения виброактивных шарошек в образцы кембрийской глины и известняка от величины осевого усилия совместно с наложением ударной нагрузки.

3. Построение по полученным экспериментальным данным, графических зависимостей величин внедрения виброактивных шарошек в образцы кембрийской глины и известняка для различных значений осевого усилия и осевого усилия совместно с накладываемой ударной нагрузкой.

4. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований, представленных в главе 2.

5. Проверка предположения аддитивности глубины внедрения диска шарошки в породу.

3.3.2 Исходные данные

Исследования проводятся на образцах кембрийской глины и известняка [45], отобранных при проходке выработок станции метрополитена «Горный институт».

Кембрийская глина (рисунок 3.2 а) обладает следующими механическими свойствами: крепость по проф. М.М. Протодяконову $f = 0,5 \div 1$; сопротивляемость резанию $A_p = 160$ Н/мм; предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ от 2,5 до 5 МПа; предел прочности на растяжение σ_p от 0,3 до 3 МПа [5,6].

Известняк (рисунок 3.2 б) обладает следующими механическими свойствами: крепость по проф. М.М. Протодяконову $f = 6$;

сопротивляемость резанию $A_p = 280$ Н/мм; предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ находится в пределах от 46 до 75 МПа; предел прочности на растяжение σ_p находится в пределах от 4 до 8 МПа [48, 52, 85].



Рисунок 3.2 – Образцы: а – кембрийская глина; б – известняк

В качестве породоразрушающего инструмента исследуемого на экспериментальном стенде применяется шарошечная модель, включающая три дисковые шарошки. При этом, для совмещения условий ограничения на габариты экспериментального стенда и максимального удовлетворения точности замеров были приняты следующие допущения: угол заострения шарошки $\alpha = 75^\circ$; диаметр шарошки $d = 60$ мм; материал изготовления шарошки – сталь 45 с последующей закалкой.

Перерасчет усилий на шарошке при переходе от модели к реальной шарошке производится с учетом масштабного коэффициента, определенного по методикам [2, 86], значение которого составляет $k_A=50$.

В экспериментальных исследованиях в качестве привода вращения шарошечной модели выбран строительный перфоратор, характеристики которого представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики перфоратора

Наименование характеристики	Значение
Масса	4,3 кг
Режимы работы	сверление с ударом, без удара, отбойный молоток

Продолжение таблицы 3.1

Мощность	850 Вт
Скорость вращения	850 мин ⁻¹
Сила удара	5,4 Дж
Число ударов	3700 уд/мин

3.3.3 Методика проведения эксперимента

Установление зависимости внедрения виброактивных шарошек в образцы породы в зависимости от различных факторов следует осуществлять в соответствии с методикой проведения эксперимента [75].

Программа испытаний

1. Для определения влияния величины прикладываемого осевого усилия P_{oc} без наложения ударной нагрузки $A_{уд}$ на величину внедрения виброактивных шарошек в образцы кембрийской глины ($f = 1$) и известняка ($f = 6$) необходимо осуществить замеры величины внедрения шарошек за отведенный временной интервал при постоянной скорости вращения.

1.1 $A_{уд} = 0$ Дж

1.1.1 $f = 1$ для следующих значений осевого усилия: $P_{oc1} = 0,125$ кН; $P_{oc2} = 0,175$ кН; $P_{oc3} = 0,225$ кН; $P_{oc4} = 0,275$ кН.

1.1.2 $f = 6$ для следующих значений осевого усилия: $P_{oc1} = 0,125$ кН; $P_{oc2} = 0,175$ кН; $P_{oc3} = 0,225$ кН; $P_{oc4} = 0,275$ кН.

Для точности получения значений величины внедрения шарошек в породу необходимо провести серию опытов, количество которых может быть определено по формуле (3.1):

$$N = p^k, \quad (3.1)$$

где p – число уровней факторов; k – число факторов.

В соответствии с представленной формулой необходимо осуществить $N = 4^1 = 4$ серий опытов.

2. Для определения влияния величины прикладываемого осевого усилия P_{oc} совместно наложения ударной нагрузки $A_{уд}$ на величину внедрения виброактивных шарошек в образцы кембрийской глины ($f = 1$) и известняка ($f = 6$) необходимо осуществить замеры величины внедрения шарошек за отведенный временной интервал при постоянной скорости вращения.

2.1 $A_{уд} = 5,4$ Дж

1.1.3 2.1.1 $f = 1$ для следующих значений осевого усилия:
 $P_{oc1} = 0,125$ кН; $P_{oc2} = 0,175$ кН; $P_{oc3} = 0,225$ кН; $P_{oc4} = 0,275$ кН.

1.1.4 2.1.2 $f = 6$ для следующих значений осевого усилия:
 $P_{oc1} = 0,125$ кН; $P_{oc2} = 0,175$ кН; $P_{oc3} = 0,225$ кН; $P_{oc4} = 0,275$ кН.

В соответствии с формулой определения количества серий опытов (3.1), необходимо провести $N = 4^1 = 4$ серий опытов.

Таблица 3.2 – Границы изменения факторов

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень
Энергия удара, Дж	0	5,4
Осевое усилие, кН	0,125	0,275
Крепость по проф. М.М. Протодяконову	1	6

Для определения оптимального времени проведения опыта были выполнены предварительные экспериментальные исследования, показавшие отсутствие существенных разрушений на образцах породы за время менее 20 секунд, и весьма существенные разрушения, не позволяющие определить требуемые параметры разрушения за время более 40 секунд. Поэтому временной промежуток для проведения опытов в серии экспериментальных исследований составил 30 секунд.

3.4 Подготовка и последовательность проведения испытаний

Проведение экспериментальных исследований начинается с

подготовки оборудования и образцов породы [45]. Перед каждым проведением экспериментальных исследований для получения объективных экспериментальных данных необходимо при помощи шлифовальной машины выполнить выравнивание поверхности исследуемого образца породы, а также при помощи дрели просверлить в образце породы отверстие диаметром 8 мм и глубиной 80 мм, необходимое для центральной направляющей модели шарошки.

После выполнения подготовительных операций над образцом породы устанавливается основание рамы. Далее в захват крепится перфоратор с установленной в него шарошечной моделью. Собранная конструкция, состоящая из перфоратора, модели шарошки и подвижной рамы вставляется в направляющие основания рамы и опускается таким образом, чтобы центральная направляющая модели шарошки попала в просверленное в породе отверстие (рисунок 3.3, рисунок 3.4 а).



Рисунок 3.3 – Модель шарошки, установленная на образце кембрийской глины

После всех настроек и установок производится запуск перфоратора в режиме «сверление». Опыт проводится за временной интервал принятый равным 30 с. По окончании опыта проводится анализ поверхности разрушения образца породы, а также выполняются замеры ширины и глубины внедрения шарошки с помощью линейки глубиномера

штангенциркуля. Для получения более точных экспериментальных данных выполняется серия из 4 повторных опытов. Для увеличения осевого усилия необходимо установить сменный груз на верхнюю часть подвижной рамы (рисунок 3.4 б). Далее аналогичным образом проводится опыт с увеличением осевого усилия. Все полученные значения внедрения шарошки, а также значения ширины канавки, образованной диском шарошки фиксируются.

Исследования по определению величины внедрения шарошки в образцы породы в зависимости от значения осевого усилия совместно с наложением ударной нагрузки проводятся в соответствии с разработанной программой-методикой. При этом перфоратор переключается в режим «бурение с ударом». По окончании опыта проводится анализ поверхности разрушения образца породы, а также выполняются замеры ширины канавки и глубины внедрения шарошки с помощью линейки глубиномера штангенциркуля.

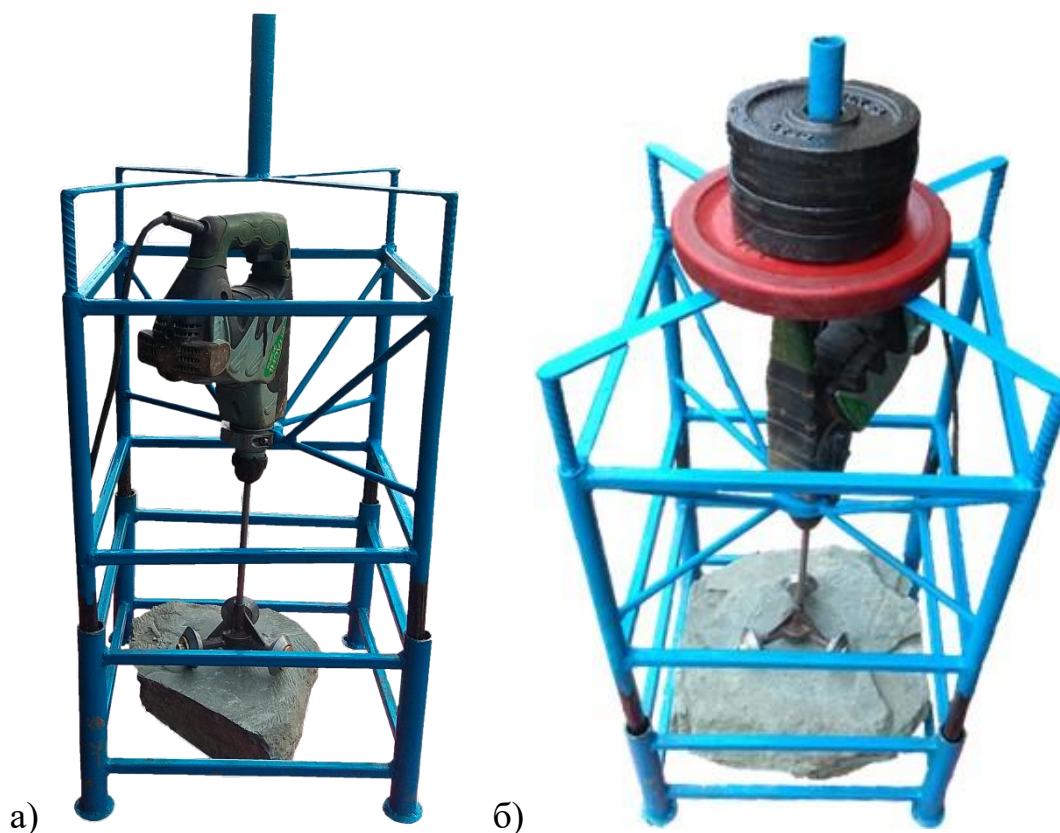


Рисунок 3.4 – Экспериментальный стенд: а – без установленных грузов; б – с дополнительно установленными сменными грузами

3.5 Результаты стендовых исследований виброактивного разрушения кембрийской глины

На рисунке 3.5 и 3.6 представлены фотографии результатов проведения эксперимента.

Численные значения величин глубины внедрения диска шарошки h и ширины дорожки перекатывания b , полученные в ходе проведения экспериментальных исследований представлены в таблице 3.3 и 3.4.

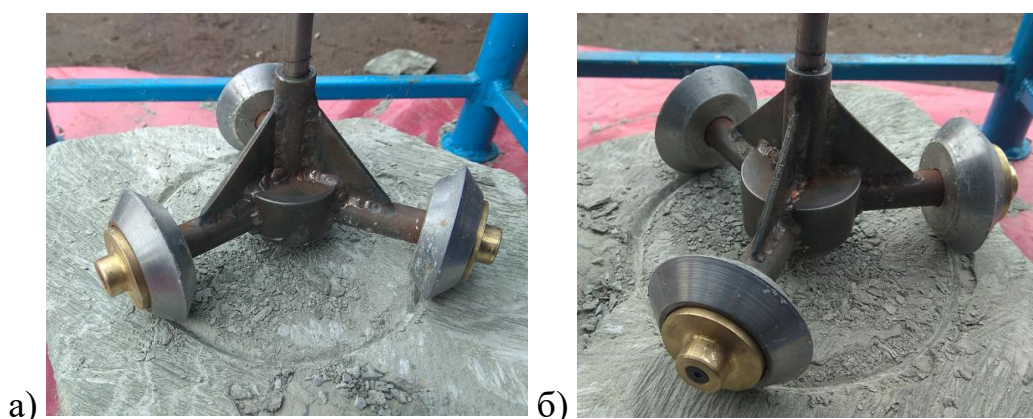


Рисунок 3.5 – Результаты эксперимента: а – $P_{oc}=0,125$ кН, $A_{уд}=0$ Дж;
б – $P_{oc}=0,125$ кН, $A_{уд}=5,4$ Дж



Рисунок 3.6 – Результаты эксперимента: а – $P_{oc}=0,275$ кН, $A_{уд}=0$ Дж;
б – $P_{oc}=0,275$ кН, $A_{уд}=5,4$ Дж

По результатам, полученным в ходе экспериментальных исследований разрушения кембрийской глины виброактивными шарошками были

построены графики зависимости величины внедрения диска шарошки в породу h и объема выкола V от прикладываемого осевого усилия P_{oc} и прикладываемого осевого усилия P_{oc} совместно с накладываемой ударной нагрузкой $A_{y\delta}$ (рисунок 3.7, 3.8).

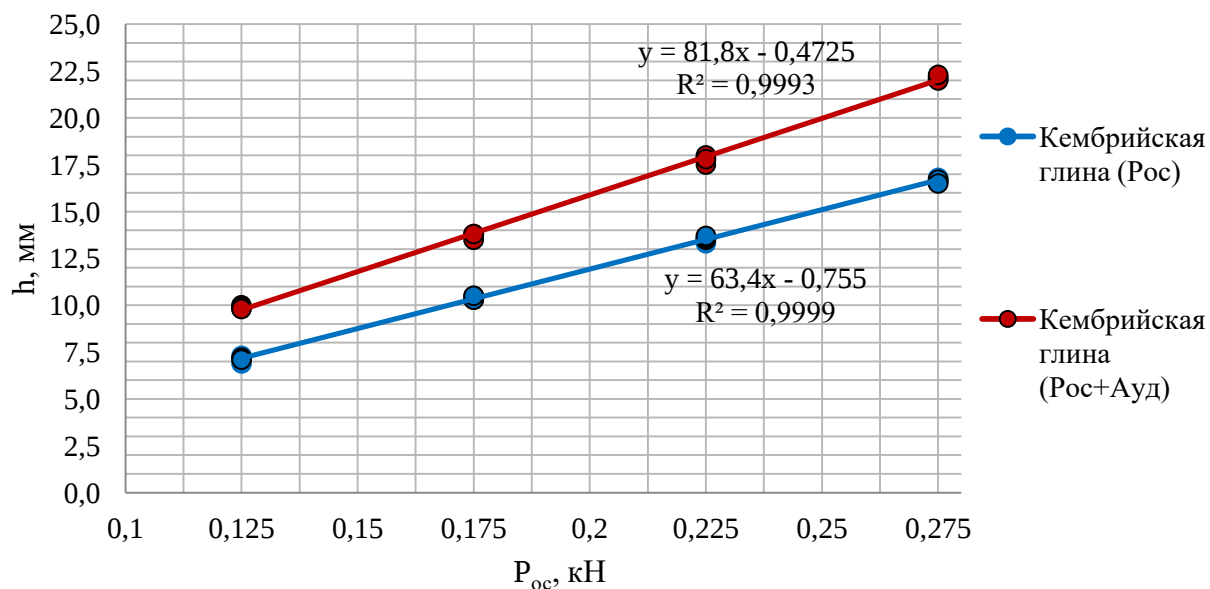


Рисунок 3.7 – Зависимость глубины внедрения шарошек в кембрийскую глину от осевого усилия и накладываемой ударной нагрузки

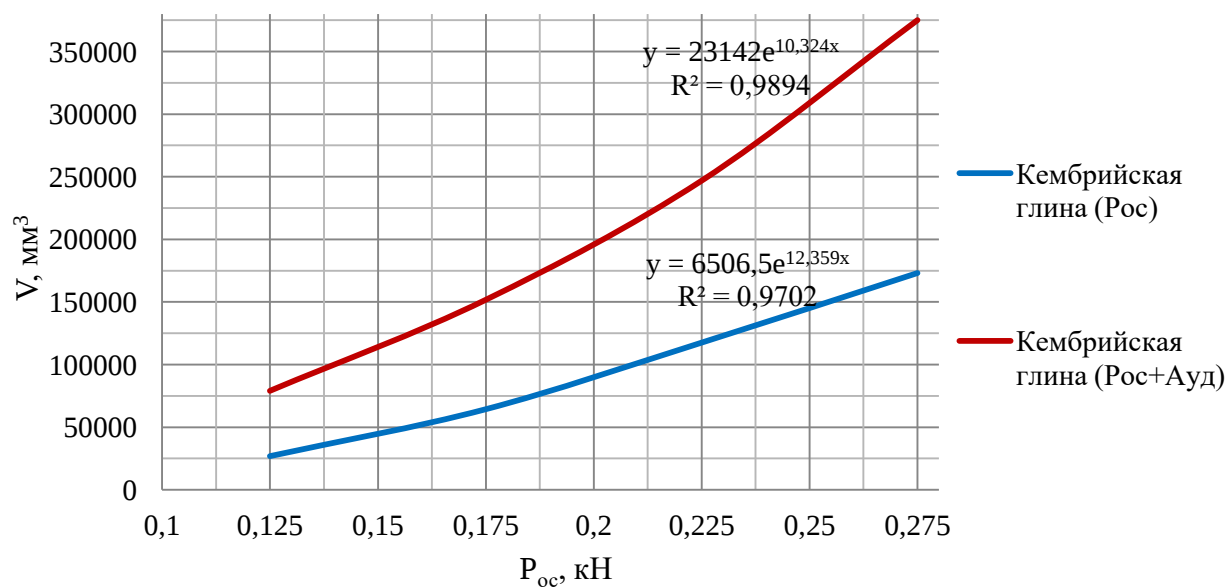


Рисунок 3.8 – Зависимость объема скола кембрийской глины от осевого усилия и накладываемой ударной нагрузки

Исходя из полученных данных построим графики зависимости изменения величины глубины внедрения диска шарошек в кембрийскую

глину от осевого усилия, осевого усилия совместно с накладываемой ударной нагрузкой и сравним с результатами теоретических расчетов (рисунок 3.9).

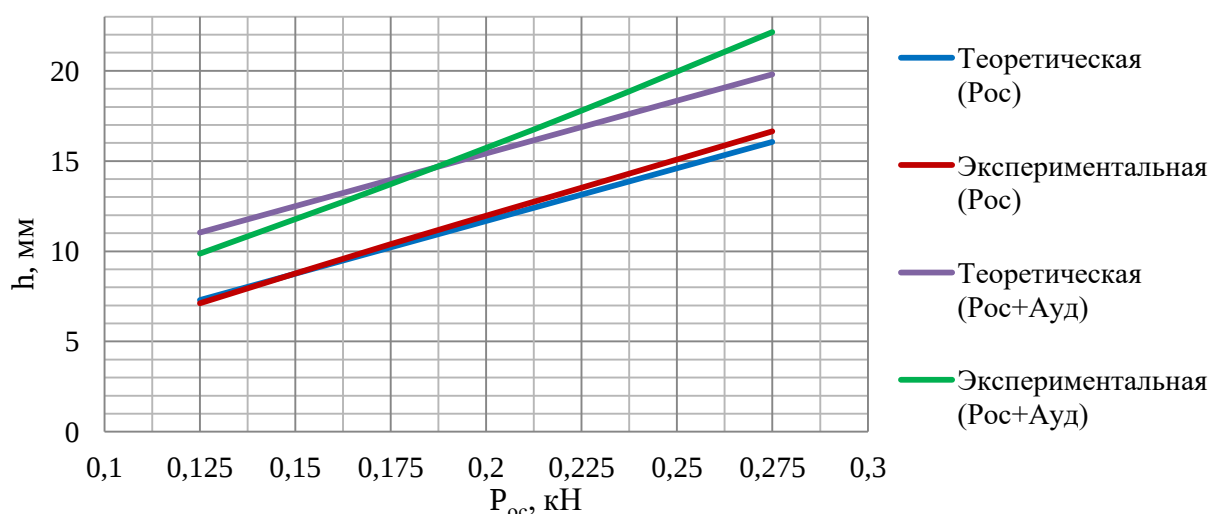


Рисунок 3.9 – Зависимости теоретической и экспериментальной глубины внедрения шарошек в кембрийскую глину от осевого усилия и осевого усилия совместно с ударной нагрузкой

Погрешность значений глубины внедрения диска шарошки в кембрийскую глину между теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями для зависимости с осевым усилием (3.2):

$$\left(1 - \frac{h_z}{h_m}\right) \cdot 100\% = 2\%, \quad (3.2)$$

где h_z – среднее значение глубины внедрения диска шарошек в кембрийскую глину, полученное по результатам экспериментальных исследований; h_m – среднее значение глубины внедрения диска шарошек в кембрийскую глину, полученное по результатам теоретических исследований.

Погрешность значений глубины внедрения диска шарошки между теоретическими и экспериментальными исследованиями для зависимости с осевым усилием совместно с ударной нагрузкой (3.3):

$$\left(1 - \frac{h_z}{h_m}\right) \cdot 100\% = 3\%, \quad (3.3)$$

где h_z – глубина внедрения диска шарошек в кембрийскую глину, полученная

по результатам экспериментальных исследований; h_m – глубина внедрения диска шарошек в кембрийскую глину, полученная по результатам теоретических исследований.

Таким образом, можно сделать вывод, что теоретическая модель разрушения образца кембрийской глины виброактивными шарошками хорошо описывает изучаемый процесс.

3.6 Результаты стендовых исследований виброактивного разрушения известняка

На рисунке 3.10 и 3.11 представлены фотографии результатов проведения эксперимента.

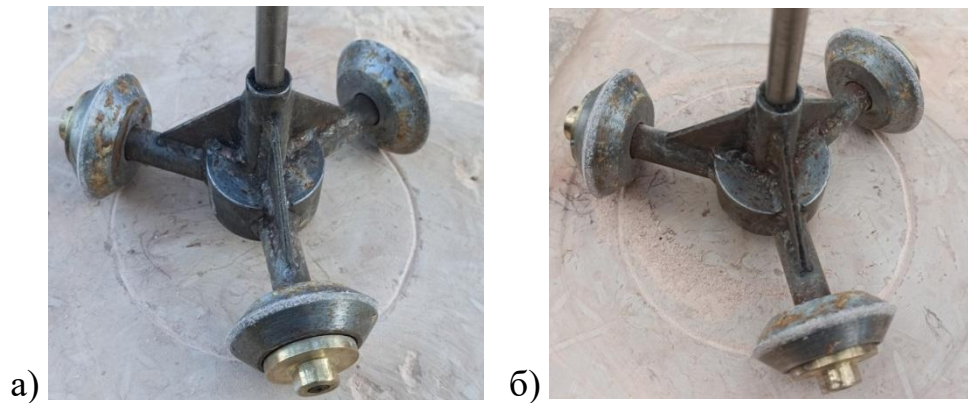


Рисунок 3.10 – Результаты эксперимента: а – $P_{oc}=0,125$ кН, $A_{уд}=0$ Дж;
б – $P_{oc}=0,125$ кН, $A_{уд}=5,4$ Дж

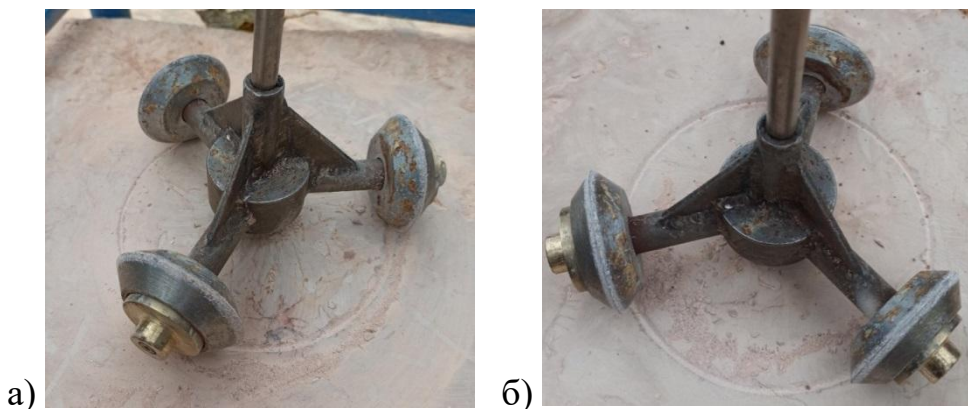


Рисунок 3.11 – Результаты эксперимента: а – $P_{oc}=0,275$ кН, $A_{уд}=0$ Дж;
б – $P_{oc}=0,275$ кН, $A_{уд}=5,4$ Дж

Численные значения величин глубины внедрения диска шарошки h и

ширины дорожки перекачивания b , полученные в ходе проведения экспериментальных исследований представлены в таблице 3.5 и 3.6.

По результатам, полученным в ходе экспериментальных исследований разрушения известняка виброактивными шарошками были построены графики зависимости величины внедрения диска шарошки в породу h и объема скола V от прикладываемого осевого усилия P_{oc} и прикладываемого осевого усилия P_{oc} совместно с накладываемой ударной нагрузкой $A_{уд}$ (рисунок 3.12, 3.13).

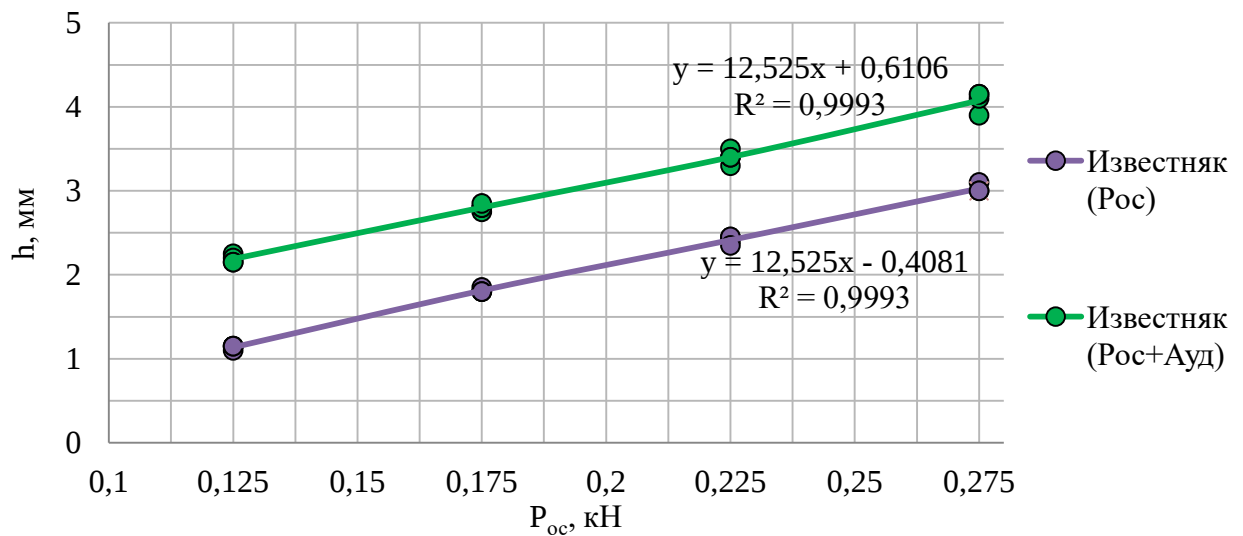


Рисунок 3.12 – Зависимость глубины внедрения шарошек в известняк от осевого усилия и накладываемой ударной нагрузки

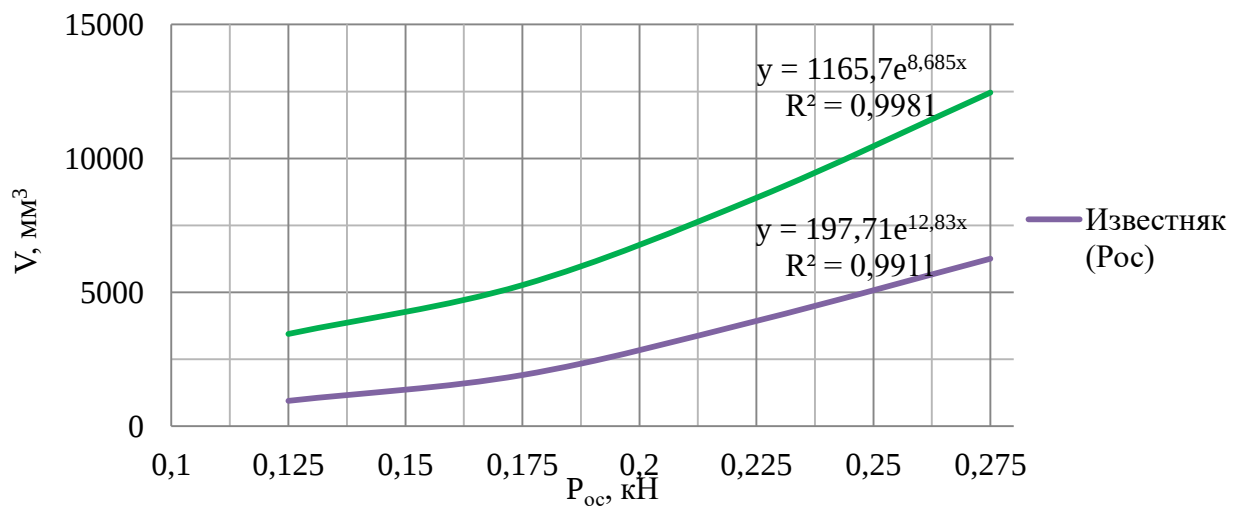


Рисунок 3.13 – Зависимость объема скола известняка от осевого усилия и накладываемой ударной нагрузки

Исходя из полученных данных построим графики зависимости изменения величины глубины внедрения диска шарошек в известняк от осевого усилия, осевого усилия совместно с накладываемой ударной нагрузкой и сравним с результатами теоретических расчетов (рисунок 3.14).

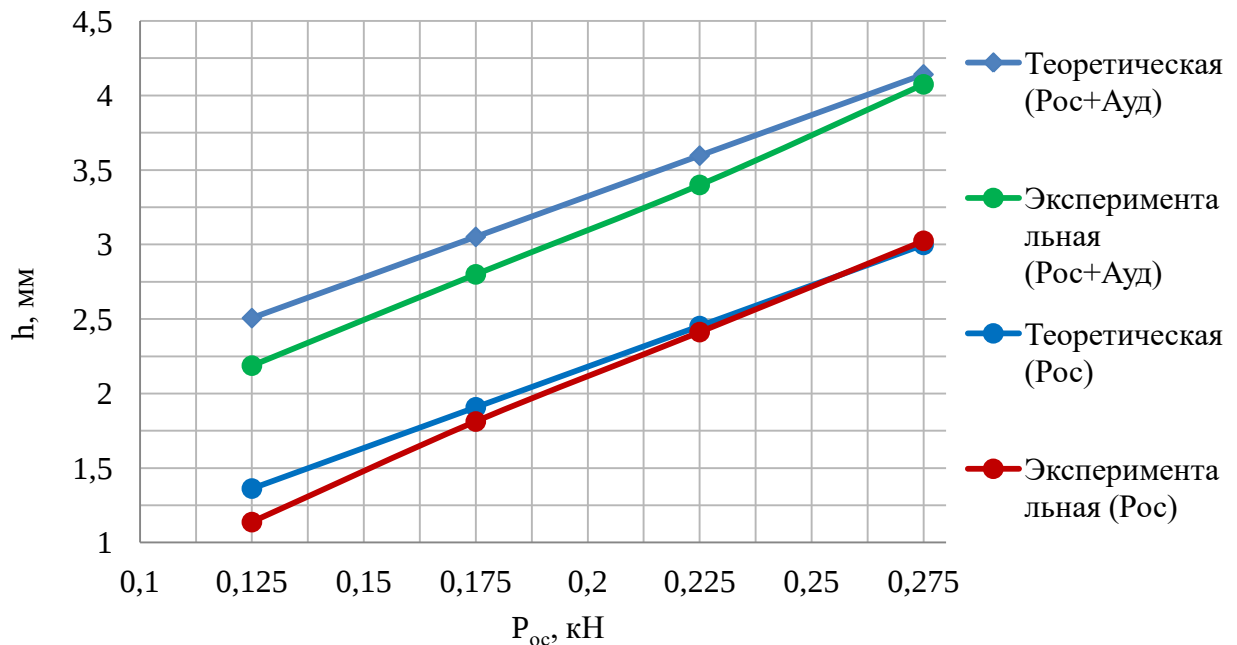


Рисунок 3.14 – Зависимость теоретической и экспериментальной глубины внедрения шарошек в известняк от осевого усилия и осевого усилия совместно с накладываемой ударной нагрузкой

Погрешность значений глубины внедрения диска шарошки в известняк между теоретическими и экспериментальными исследованиями для зависимости с осевым усилием (3.4):

$$\left(1 - \frac{h_z}{h_m}\right) \cdot 100\% = 4,5\%, \quad (3.4)$$

где h_z – среднее значение глубины внедрения диска шарошек в известняк, полученное по результатам экспериментальных исследований; h_m – среднее значение глубины внедрения диска шарошек в известняк, полученное по результатам теоретических исследований.

Погрешность значений глубины внедрения диска шарошки в известняк между теоретическими и экспериментальными исследованиями для

зависимости с осевым усилием совместно с ударной нагрузкой (3.5):

$$\left(1 - \frac{h_s}{h_m}\right) \cdot 100\% = 6,5\%, \quad (3.5)$$

где h_s – глубина внедрения диска шарошек в известняк, полученная по результатам экспериментальных исследований; h_m – глубина внедрения диска шарошек в известняк, полученная по результатам теоретических исследований.

Большее в сравнении с кембрийской глиной расхождение теоретических и экспериментальных значений глубины внедрения шарошек объясняется большими потерями энергии удара на деформацию в шарошечной модели, связанные с увеличением крепости исследуемого образца породы.

Таким образом, можно сделать вывод, что модель разрушения образца известняка виброактивными шарошками удовлетворительно описывает изучаемый процесс.

Проверка предположения аддитивности

Для проверки предположения аддитивности, в результате проведения серии экспериментальных исследований на образцах кембрийской глины и известняка, был построен график зависимости глубины внедрения диска шарошки в породу от значения ее предела прочности на одноосное сжатие.

Анализ графика (рисунок 3.15) показал, что зависимость изменения глубины внедрения h от предела прочности на сжатие с накладываемой ударной нагрузкой $A_{y\partial}$ и без не полностью удовлетворила условие аддитивности для крепких пород (известняка) и мягких пород (кембрийская глина) при использовании коэффициента $k=1$. Таким образом для полного удовлетворения предположения аддитивности для крепких пород необходимо использование коэффициента $k=0,94$, а для мягких пород $k=1,03$.

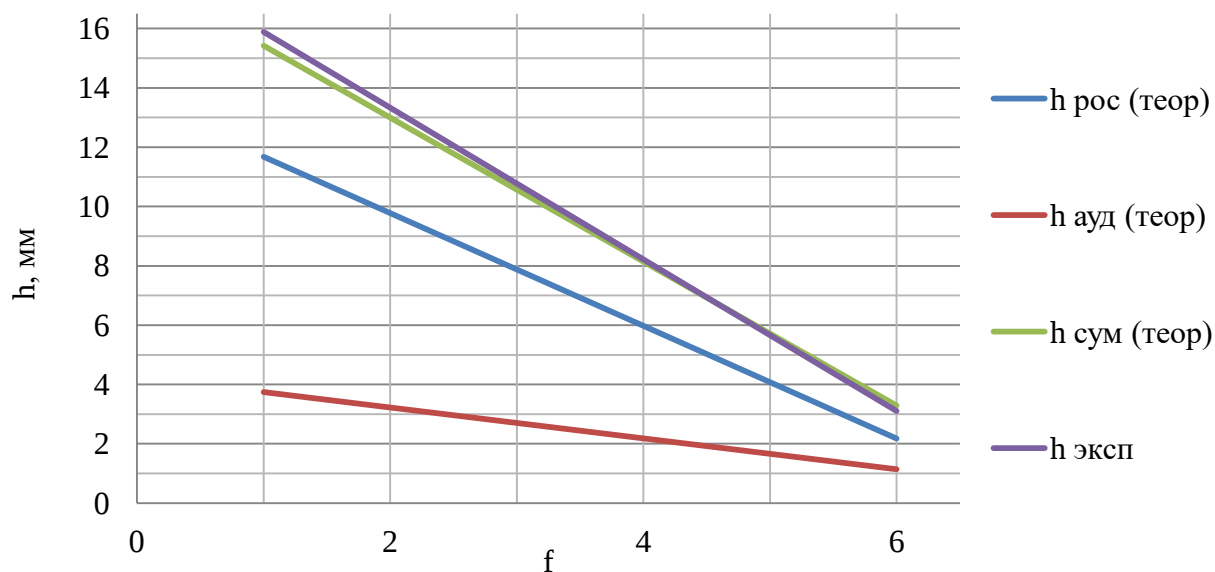


Рисунок 3.15 – Зависимость глубины внедрения диска шарошки в породу от предела прочности породы на сжатие

3.7 Обработка результатов эксперимента

Проверка воспроизводимости измерений производилась следующим образом:

1. Определение среднего значения измерений глубины внедрения по одной выборке (3.6) (Таблицы 3.3, 3.4, 3.5, 3.6).

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}, \quad (3.6)$$

Таблица 3.3 – Журнал проведения экспериментов на образцах кембрийской глины

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	Результаты замеров величины внедрения диска шарошек в кембрийскую глину, мм				$\bar{h}$
			h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	
0	0,125	1	6,9	7,3	7,2	7,1	7,1
0	0,175	1	10,5	10,3	10,3	10,5	10,4
0	0,225	1	13,3	13,5	13,6	13,7	13,5
0	0,275	1	16,8	16,6	16,7	16,5	16,7

Продолжение таблицы 3.3

5,4	0,125	1	9,8	10	9,9	9,8	9,9
5,4	0,175	1	13,8	13,8	13,5	13,8	13,7
5,4	0,225	1	17,9	18	17,5	17,8	17,8
5,4	0,275	1	22,2	22,1	22	22,3	22,2

Таблица 3.4 – Журнал проведения экспериментов на образцах кембрийской глины

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	Результаты замеров ширины дорожки на образце кембрийской глины, мм				$\bar{b}$
			b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
0	0,125	1	8,5	8,7	8,6	8,6	8,6
0	0,175	1	14	14,1	14,1	14,1	14,1
0	0,225	1	19,8	19,8	19,7	19,7	19,8
0	0,275	1	23,6	23,7	23,6	23,6	23,6
5,4	0,125	1	18,2	18,1	18,1	18,3	18,2
5,4	0,175	1	25,1	25,2	25	25,2	25,1
5,4	0,225	1	31,5	31,5	31,6	31,5	31,5
5,4	0,275	1	38,4	38,5	38,6	38,5	38,5

Таблица 3.5 – Журнал проведения экспериментов на образцах известняка

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	Результаты замеров величины внедрения диска шарошек в известняк, мм				$\bar{h}$
			h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	
0	0,125	6	1,15	1,1	1,15	1,15	1,1
0	0,175	6	1,8	1,85	1,8	1,8	1,8
0	0,225	6	2,4	2,45	2,45	2,35	2,4
0	0,275	6	3,1	3	3	3	3,0
5,4	0,125	6	2,25	2,2	2,15	2,15	2,2
5,4	0,175	6	2,75	2,8	2,8	2,85	2,8
5,4	0,225	6	3,3	3,5	3,4	3,4	3,4

Продолжение таблицы 3.5

5,4	0,275	6	3,9	4,1	4,15	4,15	4,1
-----	-------	---	-----	-----	------	------	-----

Таблица 3.6 – Журнал проведения экспериментов на образцах известняка

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	Результаты замеров ширины дорожки на образце известняка, мм				$\bar{b}$
			b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
0	0,125	6	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9
0	0,175	6	2,4	2,4	2,35	2,4	2,4
0	0,225	6	3,8	3,7	3,6	3,7	3,7
0	0,275	6	4,7	4,6	4,8	4,7	4,7
5,4	0,125	6	3,5	3,5	3,6	3,7	3,6
5,4	0,175	6	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3
5,4	0,225	6	5,5	5,7	5,8	5,8	5,7
5,4	0,275	6	6,8	6,9	7	7,1	7,0

2. Определение среднеквадратичного отклонения (3.7):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}. \quad (3.7)$$

3. Определение доверительного интервала для величины x (3.8):

$$J_z = (\bar{x} - \varepsilon \div \bar{x} + \varepsilon), \quad (3.8)$$

где ε – точность величины математического ожидания (3.9).

$$\varepsilon = \frac{t_\gamma \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.9)$$

где t_γ – квантиль распределения Стьюдента, определяемый для заданной доверительной вероятности γ ; n – число замеров в выборке [75].

Относительное значение доверительного интервала не должно превышать значения $J_z = \frac{2 \cdot \varepsilon}{\bar{x}} \leq (3 - 5\%)$.

4. Определение дисперсии (3.10):

$$J_{\sigma} = \left(\sigma \sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} \div \sigma \sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \right), \quad (3.10)$$

где χ_1 и χ_2 - значения критерия Пирсона [75].

Относительное значение дисперсии не должно превышать значения

$$J_{\sigma} = \frac{\sigma \cdot \sqrt{n-1} \cdot \left(\sqrt{1/\chi_1^2} + \sqrt{1/\chi_2^2} \right)}{\bar{x}} \leq (3-5\%).$$

5. Определение однородности дисперсий (3.11):

$$G = \frac{\sigma_{v\max}^2}{\sum_{v=1}^N \sigma_v^2}. \quad (3.11)$$

Полученное в ходе расчетов значение однородности дисперсий сравнивается с критическим значением критерия Кохрена [75]. После сравнения делается вывод об однородности дисперсий и об воспроизводимости.

Сходимость экспериментальных и теоретических исследований для всех графиков определены по квантилю распределения Стьюдента и критерию согласия Пирсона. Воспроизводимость полученных экспериментальных данных достигается, если относительные значения доверительного интервала и дисперсии для величины $\bar{x}$ не превышают значения 3-5 %, при доверительной вероятности $p=0,95$. Это говорит о том, что с вероятностью 95 % значения всех последующих экспериментальных исследований будут отличаться от представленных на величину менее 3-5 % [56].

Значения доверительного интервала и дисперсии величин глубины внедрения, а также ширины дорожки от диска шарошек на образце кембрийской глины представлены в таблицах 3.7, 3.8.

Проверка теории о воспроизводимости экспериментальных данных заключается в сопоставлении расчетного и табличного значения критерия

Кохрена. Ряд дисперсии однороден, если выполняется условие $G \leq G_{табл}$.

Табличное значение критерия Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$, числе степеней свободы $f = 3$ и числе экспериментов $n = 4$ будет равно $G_{табл} = 0,6841$.

Таблица 3.7 – Значения доверительного интервала и дисперсии величины глубины внедрения шарошки в образцы кембрийской глины

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	$\bar{h}$	σ	Доверительный интервал J_z , %	Дисперсия J_σ , %	G
0	0,125	1	7,1	0,171	4,07	2,19	0,330
0	0,175	1	10,4	0,191	3,77	1,00	
0	0,225	1	13,5	0,171	2,14	2,19	
0	0,275	1	16,7	0,129	1,32	1,25	
5,4	0,125	1	9,9	0,096	1,65	0,069	0,491
5,4	0,175	1	13,7	0,150	3,71	1,69	
5,4	0,225	1	17,8	0,216	2,06	3,50	
5,4	0,275	1	22,2	0,129	0,99	1,25	

Таблица 3.8 – Значения доверительного интервала и дисперсии величины ширины дорожки на образцах кембрийской глины

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	$\bar{b}$	σ	Доверительный интервал J_z , %	Дисперсия J_σ , %	G
0	0,125	1	8,6	0,082	1,61	0,50	0,445
0	0,175	1	14,1	0,050	1,21	0,19	
0	0,225	1	19,8	0,058	0,50	0,25	
0	0,275	1	23,6	0,050	0,36	0,19	
5,4	0,125	1	18,2	0,10	0,89	0,69	0,334
5,4	0,175	1	25,1	0,10	1,29	0,69	
5,4	0,225	1	31,5	0,05	0,27	0,19	
5,4	0,275	1	38,5	0,08	0,36	0,50	

Из таблиц 3.7, 3.8 видно, что при доверительной вероятности $p=0,95$, значения доверительного интервала и дисперсии не превышают допустимого значения (3-5 %). Это означает достаточную воспроизводимость экспериментальных данных.

Значения доверительного интервала и дисперсии величин глубины внедрения, а также ширины дорожки от диска шарошек на образце известняка представлены в таблице 3.9, 3.10.

Таблица 3.9 – Значения доверительного интервала и дисперсии величины глубины внедрения шарошки в образцы известняка

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	$\bar{h}$	σ	Доверительный интервал J_z , %	Дисперсия J_σ , %	G
0	0,125	6	1,1	0,025	3,73	0,05	0,414
0	0,175	6	1,8	0,025	4,68	0,05	
0	0,225	6	2,4	0,048	3,37	0,17	
0	0,275	6	3,0	0,050	2,81	0,19	
5,4	0,125	6	2,2	0,05	3,71	0,17	0,571
5,4	0,175	6	2,8	0,04	4,95	0,13	
5,4	0,225	6	3,4	0,08	4,08	0,50	
5,4	0,275	6	4,1	0,12	4,96	1,06	

Таблица 3.10 – Значения доверительного интервала и дисперсии величины ширины дорожки на образцах известняка

Энергия удара, Дж	Осевое усилие, кН	Крепость	$\bar{b}$	σ	Доверительный интервал J_z , %	Дисперсия J_σ , %	G
0	0,125	6	1,9	0,050	4,53	0,19	0,405
0	0,175	6	2,4	0,025	3,55	0,05	
0	0,225	6	3,7	0,082	3,75	0,50	
0	0,275	6	4,7	0,082	2,95	0,50	
5,4	0,125	6	3,6	0,10	4,55	0,69	0,414
5,4	0,175	6	4,3	0,05	3,97	0,19	

Продолжение таблицы 3.10

5,4	0,225	6	5,7	0,14	4,21	1,50	
5,4	0,275	6	7,0	0,13	3,15	1,25	

Из таблиц 3.9, 3.10 видно, что при доверительной вероятности $p=0,95$, значения доверительного интервала и дисперсии не превышают допустимого значения (3-5%). Это означает достаточную воспроизводимость экспериментальных данных.

3.8 Экспериментальные исследования процесса разрушения кембрийской глины резанием с отделением элементарных сколов

Для интенсификации процесса разрушения забойного массива, состоящего из сухой кембрийской глины, возникает необходимость разработки модернизированной конструкции исполнительного органа тоннелепроходческого щита, отличительной особенностью которой является измененная схема расстановки резцового породоразрушающего инструмента, позволяющая при большей скорости вращения исполнительного органа и малой величине скорости подачи разрушать массив с образованием большого количества сколов породы – так называемая «хрупкая стадия разрушения», что приведет к снижению энергоемкости процесса разрушения, а также повышению скорости проходки тоннелей метро.

Экспериментальные исследования работоспособности конструкции исполнительного органа, сущность которых заключается в определении значения величины толщины срезаемой стружки при котором разрушение образца кембрийской глины происходит в хрупкой стадии с отделением элементарных сколов, а также в обосновании рациональных параметров исполнительного органа тоннелепроходческого щита на основе оптимизации процесса резания.

Для проведения экспериментальных исследований использовался экспериментальный стенд на базе испытательной машины Zwick / Roell Z100

[106], состоящий из подвижной траверсы 1, подвесного захвата 2, штанги 3, резца 4, зажима 5, измерительного преобразователя 6, направляющих профилей 7, резцедержателя 8, винта-регулятора 9, стола с зажимным устройством для закрепления образца кембрийской глины 10, неподвижной траверсы 11 (рисунок 3.16).

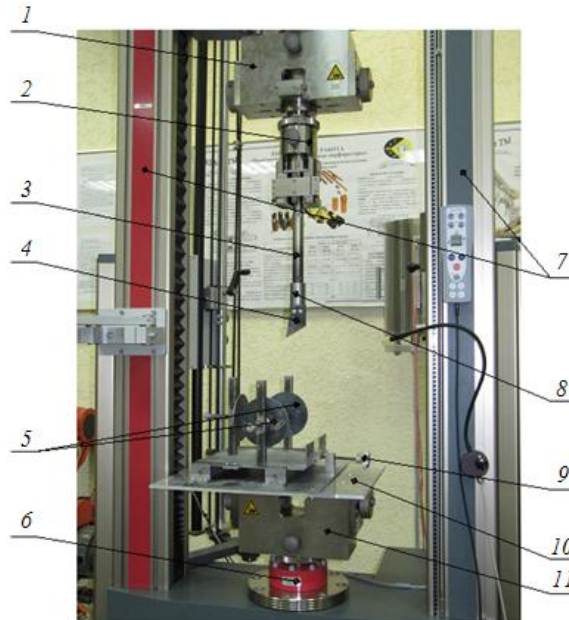


Рисунок 3.16 – Стенд для исследования процесса резания кембрийской глины одиночным резцом

3.9 Методика проведения экспериментальных исследований процесса разрушения кембрийской глины резанием с отделением элементарных сколов

Для проведения экспериментальных исследований была разработана методика, заключающаяся в разрушении с постоянным значением толщины срезаемой стружки h образца кембрийской глины, обладающей сопротивляемостью резанию $A_p=160$ Н/мм и пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ от 2,5 до 5 МПа. В качестве породоразрушающего инструмента был выбран резец с прямоугольной режущей кромкой шириной $b_p = 10$ мм, плоской передней гранью, задним углом $\beta = 10^\circ$ и углом резания $\alpha = 60^\circ$.

При проведении экспериментальных исследований на цокольную

траверсу испытательной машины устанавливается оснастка с зажимным устройством для зажима образца кембрийской глины. После этого в захват устанавливается штанга с резцом, установленным в резцедержатель.

Экспериментальные исследования производятся со значениями величины срезаемой стружки $h=10, 15, 20$ мм. Изменение величины толщины срезаемой стружки производится с помощью винта-регулятора.

3.10 Результаты экспериментальных исследований процесса разрушения кембрийской глины резанием с отделением элементарных сколов

Процесс разрушения кембрийской глины резанием в большинстве случаев происходит с образованием крупных сколов. Так при проведении экспериментальных исследований с толщиной срезаемой стружки $h=10$ мм максимальная длина наибольших сколов составляет порядка 50 мм.

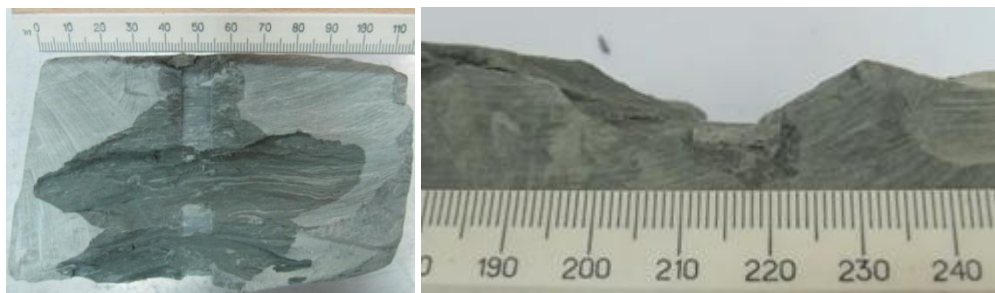


Рисунок 3.17 – Образование сколов и форма борозды при разрушении кембрийской глины резанием при толщине срезаемой стружки $h=10$ мм

В процессе внедрения резца в образец кембрийской глины происходят сколы породы, имеющие форму трапеции. При этом на поверхности исследуемого образца в связи с высокой вязкостью кембрийской глины возникает борозда, обладающая наличием двух боковых и нижней поверхностей разрушения (рисунок 3.17). Боковой развал образуется не на всю глубину борозды. Нижняя поверхность борозды обладает прямолинейной формой и глубиной порядка 2 мм. При этом разрушение образца происходит в хрупкой стадии.

В ходе проведения экспериментальных исследований со значением величины глубины срезаемой стружки $h=15$ мм было выявлено более

интенсивное образование элементарных сколов (рисунок 3.18). Глубина борозды с нижней прямолинейной поверхностью составляет порядка 5 мм. При этом разрушение все еще происходит в хрупкой стадии.



Рисунок 3.18 – Образование сколов и форма борозды при разрушении кембрийской глины резанием при толщине срезаемой стружки $h=15$ мм

при проведении экспериментальных исследований с толщиной срезаемой стружки $h=20$ мм происходило образование крупных сколов, аналогичных по размерам как при проведении эксперимента с толщиной срезаемой стружки $h=15$ мм. Однако количество элементарных сколов увеличилось (рисунок 3.19). Глубина прямолинейной части борозды резания существенно увеличилась, и составляла уже порядка 10 мм. При этом разрушение образца кембрийской глины при толщине срезаемой стружки 20 мм происходило уже в пластичной стадии.

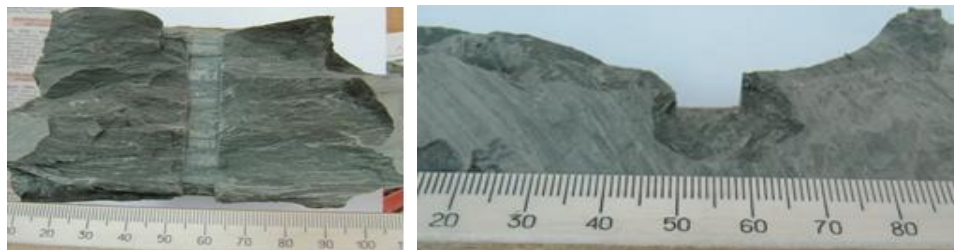


Рисунок 3.19 – Образование сколов и форма борозды при разрушении кембрийской глины резанием при толщине срезаемой стружки $h=20$ мм

В ходе проведения экспериментальных исследований был сделан вывод о нерациональности разрушения кембрийских глин резанием с величиной толщины стружки $h>15$ мм, в виду перехода стадий разрушения из хрупкой в пластичную, с образованием на забойном массиве прорезных щелей. При этом, для компенсации снижения скорости подачи исполнительного органа (соблюдение толщины срезаемой стружки $h\leq 15$ мм),

и для повышения производительности процесса разрушения забойного массива, рекомендуется увеличение скорости вращения исполнительного органа.

3.11 Выводы по третьей главе

На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждена зависимость величины фактического внедрения диска шарошки в кембрийскую глину от осевого усилия и осевого усилия совместно с накладываемой энергией удара. Эти зависимости выражаются функциями $h_{oc} = 63,4x - 0,755$, $h_{oc+yд} = 81,8x - 0,4725$.

2. Экспериментально подтверждена зависимость величины фактического внедрения диска шарошки в известняк от осевого усилия и осевого усилия совместно с накладываемой энергией удара. Эти зависимости выражаются функциями $h_{oc} = 12,525x - 0,4081$, $h_{oc+yд} = 12,525x - 0,6101$.

3. Применение в конструкции роторного исполнительного органа виброактивных шарошек позволит осуществлять проходку по неоднородным забойным массивам без существенного снижения величины скорости подачи исполнительного органа.

4. Экспериментально выявлено значение величины толщины срезаемой стружки $h \leq 15$ мм, при котором происходит переход хрупкой стадии разрушения кембрийской глины в пластичную.

5. Применение разнесенной схемы расстановки резцового породоразрушающего инструмента в совокупности с максимальной скоростью вращения и малой подачей исполнительного органа позволит снизить энергоемкость процесса разрушения забойного массива, состоящего из кембрийской глины.

ГЛАВА 4 ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО ЩИТА ДЛЯ УСЛОВИЙ КЕМБРИЙСКИХ ГЛИН С ТВЕРДЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ

Забойные массивы шахт Метростроя Санкт-Петербурга в виду разнородности состава отличаются изменчивостью механических свойств, поэтому достаточно трудно подобрать рациональный режим работы тоннелепроходческого щита для разного состояния пород забоя при отсутствии точного геологического прогноза по параметрам забойного массива трассы тоннеля.

Путем выбора рациональных схем и режимов разрушения массива кембрийских глин с твердыми прослойками можно при неизменной мощности машины расширить область ее применения, за счет снижения силовых и энергетических показателей процесса разрушения [56].

Основной целью данной главы является выбор конструкции и уточнение методики силового расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита.

4.1 Конструкция исполнительного органа тоннелепроходческого щита оснащенного виброактивными породоразрушающими инструментами

Горно-геологические условия строительства Петербургского метро отличаются весьма неоднородным забойным массивом. При проходке перегонных тоннелей исполнительный орган тоннелепроходческого щита взаимодействует не только с мягкими верхнекотлинскими и кембрийскими глинами, но и с довольно твердыми прослойками известняков, песчаников, а также включениями гранитных валунов. В результате этого снижается величина подачи ротора на забой в виду повышения крутящего момента на роторном исполнительном органе, а также для снижения риска аварийного выхода из строя породоразрушающего инструмента. Вследствие этого в

целом снижается и скорость проходки тоннеля. Поэтому, для повышения эффективности разрушения неоднородного забоя включающего как мягкие, так и крепкие породы разработан следующий виброактивный породоразрушающий инструмент, установленный на роторный исполнительный орган (рисунок 4.1) [68].

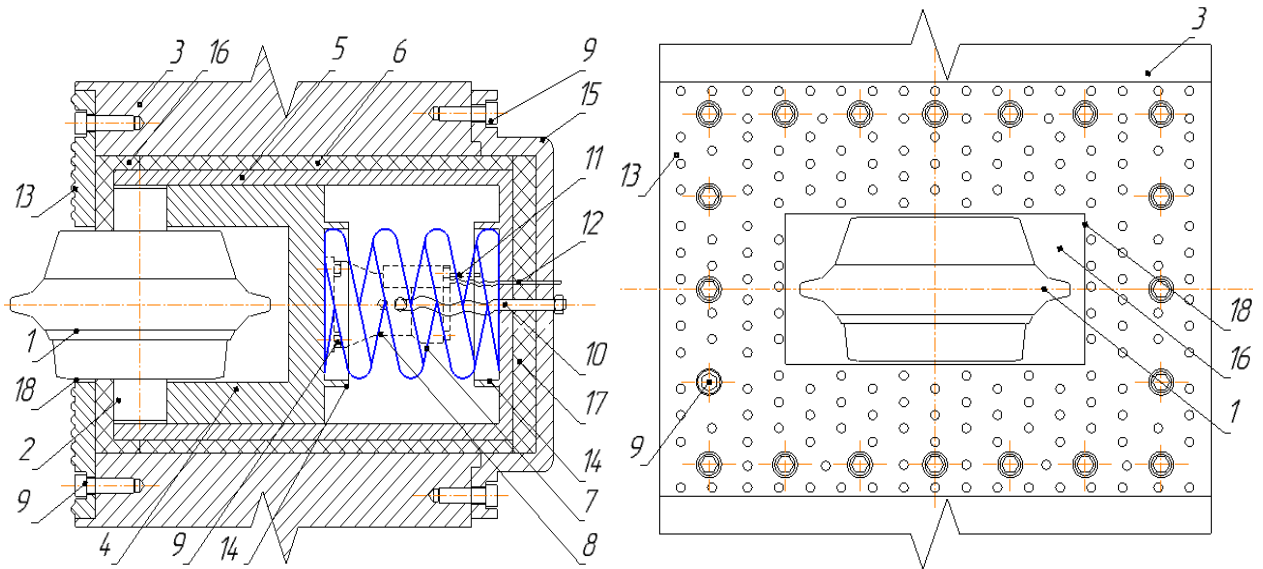


Рисунок 4.1 – Чертеж виброактивной шарошки

Роторный исполнительный орган состоит из шарошки 1 (рисунок 4.1), установленной на оси, и имеющей возможность перемещения в пазу направляющей 5, задняя стенка которой выполнена с кольцевым пазом 14. При этом шарошка поджата толкателем 4, установленным в паз направляющей 5, имеющей выступающие пазы с «П» образным профилем. Толкатель 4 имеющий «П» образную форму выполнен с кольцевым пазом 14. Направляющая 5 установлена в кожух 6, состыкованный со стороны забоя проставкой из виброгасящего материала 16, а с фронтальной стороны торцевой стенкой 17, также выполненной из виброгасящего материала. Проставка 16 помимо демпфирующей функции выполняет функцию уплотнения, не пропускающего породу в узел шарошки. Между толкателем 4 и задней стенкой направляющей 5 жестко в кольцевые пазы 14 установлена пружина 7. На толкателе 4 внутри пружины 7 при помощи винтов 9 соосно с шарошкой 1 установлен ударник 8. Подача воздуха от распределителя к

ударнику осуществляется по рукаву высокого давления 10. На ударнике 8 установлен концевой выключатель 11, от которого отходит кабель 12 на электромагнитную катушку воздушного распределителя, тем самым включая или выключая подачу воздуха. Во фронтальной части ротора 3 винтами 9, установлена съемная пластина 13, изготовленная из пружинной стали, и имеющая вырез 18 прямоугольной формы под лезвие шарошки. Поверхность пластины 13 армирована вольфрамо-кобальтовым сплавом. Для замены или ремонта узла шарошки с тыльной части ротора 3 имеется крышка 15, закрепленная винтами 9.

Наиболее актуальным местом установки виброактивных шарошек является окраинная часть ротора, которая в первую очередь взаимодействует с твердыми прослойками при изменении глубины проходки тоннеля. Однако установка виброактивных шарошек по всей площади роторного исполнительного органа позволит повысить его работоспособность в условиях изменчивых горно-геологических условий.

На рисунке 4.2 показан роторный исполнительный орган тоннелепроходческого щита Herrenknecht, оснащенный резцами – 1, дисковыми шарошками – 2, дисковыми виброактивными шарошками – 3. Для реверсивного вращения на исполнительном органе установлены ряды дублирующих резцов.

Разработанный роторный исполнительный орган предполагается использовать на шахтах Метростроя для разработки неоднородных забоев. Устройство разрушает породу передачей на нее вибрационной нагрузки. В конструкции может использоваться как гидравлический, так и пневматический генератор колебаний. Применение в конструкции гидравлического генератора колебаний позволит передавать на забой большую вибрационную нагрузку. Установка дисковых шарошек на исполнительном органе производится с возможностью их замены непосредственно из забойной камеры, поэтому замена пассивных дисковых

шарошек на виброактивные возможна в кессоне во время остановки проходческого щита.

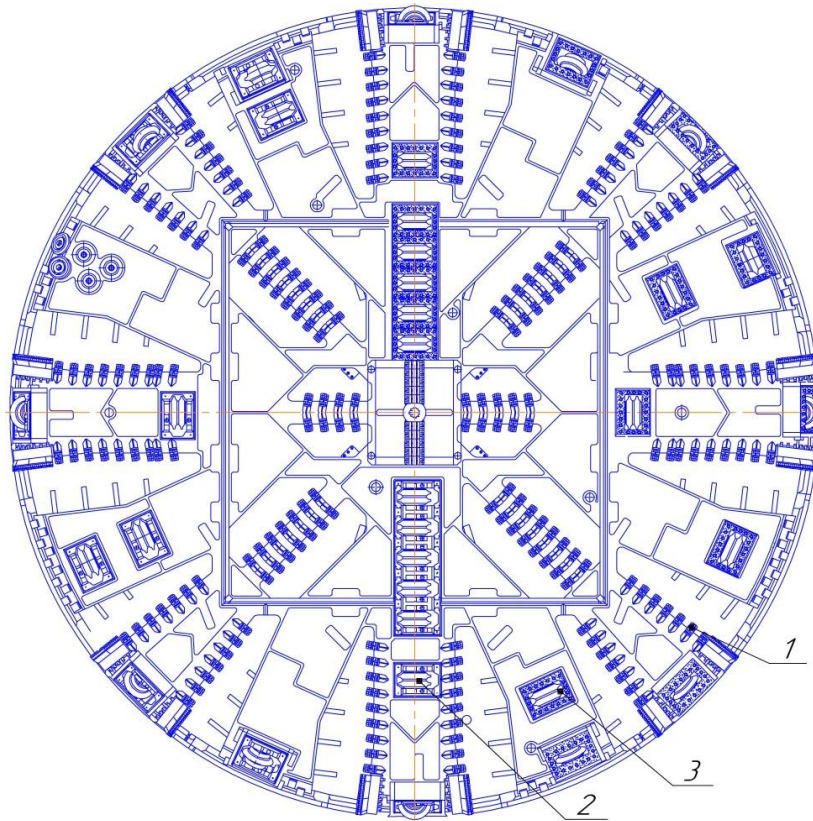


Рисунок 4.2 - Роторный исполнительный орган ТПМК Herrenknecht S-782

4.2 Принцип работы тоннелепроходческого комплекса с виброактивными шарошками

Работа исполнительного органа осуществляется следующим образом. Во время работы дисковые шарошки, установленные на роторном исполнительном органе окатываясь по забою, состоящему из кембрийской глины 18 вдавлены в него (рисунок 4.3 а).

В момент контакта диска шарошки с твердыми включениями или прослойками 19 (рисунок 4.3 б), происходит отжатие шарошки вместе с толкателем 4 в направляющей 5 в сторону противоположную забою. При этом пружина 7 сжимаясь, выступает в роли демпфера, позволяя снизить ударную динамику, возникающую при изменении механических свойств разрушаемого забойного массива. Во время сжатия пружины 7 включается

концевой концевой выключатель 11, подающий сигнал на распределитель, который в свою очередь подает воздух по рукаву высокого давления к ударнику 8. Далее ударная нагрузка передается от ударника 8 на шарошку 1 через толкатель оси 4. Активация ударника 8 осуществляется только тогда, когда произошло поджатие шарошки 1 в сторону противоположную забою. При этом отсутствует контакт шарошки с пластиной 13, что исключает возможность удара оси шарошки по фронтальной части ротора.

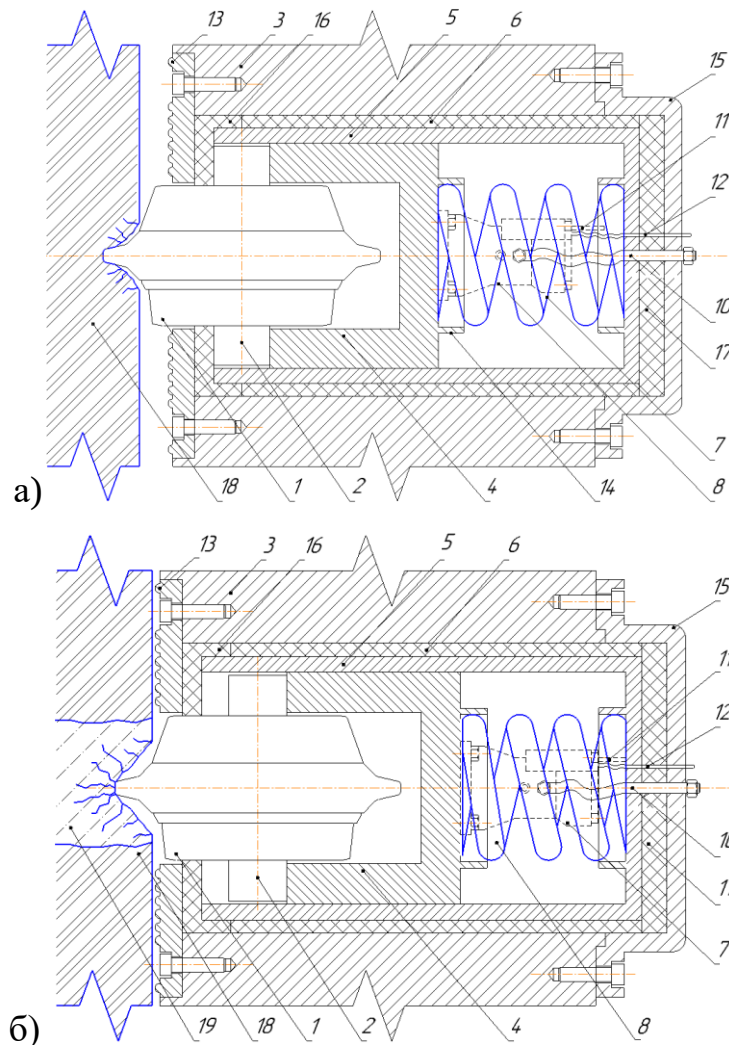


Рисунок 4.3 – Разрушение виброактивной шарошкой: а – кембрийской глины; б – прослойки известняка

Защиту тоннелепроходческого щита и персонала от вибрации, а также узла шарошки от породы осуществляют выполненные из виброгасящего материала кожух 6, торцевая стенка 17, проставка 16, плотно прилегающая

ко всей поверхности диска шарошки 1.

В конструкции стандартных дисковых шарошек установлены конические роликовые подшипники. При наложении ударной нагрузки на шарошку произойдет быстрый выход из строя подшипникового узла, в виду того, что подшипники качения не воспринимают ударных нагрузок. Поэтому существует необходимость, связанная с заменой конических роликовых подшипников на подшипники скольжения, изготовленных из сплавов алюминия железа и бронзы (БрАЖ), имеющих повышенную твердость до 100 НВ, и применяющихся в узлах, работающих при высоких нагрузках [69].

4.3 Методика расчета рациональной величины подачи исполнительного органа, усилий на породоразрушающем инструменте, и крутящего момента на исполнительном органе тоннелепроходческого щита

Расчет параметров тоннелепроходческого щита выполняется на основе данных полученных при проходке тоннеля Невско-Василеостровской линии метрополитена Санкт-Петербурга тоннелепроходческим щитом Herrenknecht S-782.

Методику силового расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита можно разделить на несколько пунктов:

1. Определение физико-механических свойств разрушаемого забойного массива.

В большинстве расчетов и методик применяется такое физико-механическое свойство как предел прочности породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, однако есть методики, которые в своей основе используют другое физико-механическое свойства, такое как контактная прочность породы P_k [79]. Поэтому для перехода от предела прочности породы на одноосное сжатие к контактной прочности породы применяется формула (4.1) [6]:

$$P_k = 13 \cdot \sigma_{сж}^{0,94}. \quad (4.1)$$

При этом для определения средней крепости смешанного забойного

массива (рисунок 4.4), состоящего из кембрийской глины и твердой прослойки необходимо применять формулу (4.2):

$$\overline{\sigma_{сж}} = \sigma_{зл} \cdot \left(1 - \frac{S_{мс}}{S_{общ}}\right) + \sigma_{мс} \cdot \left(1 - \frac{S_{мс}}{S_{общ}}\right), \quad (4.2)$$

где $\sigma_{зл}$ – предел прочности на одноосное сжатие кембрийской глины, МПа; $\sigma_{мс}$ – предел прочности на сжатие твердой прослойки, МПа; $S_{зл}$ – площадь забоя занимаемая кембрийской глиной, м²; $S_{мс}$ – площадь забоя занимаемая твердой прослойкой, м²; $S_{общ}$ – общая площадь забоя, м².

2. Определение толщины стружки.

Зная такие параметры как скорость подачи исполнительного органа на забой v_n , скорость вращения исполнительного органа n_{uo} , а также число резцовых породоразрушающих инструментов (резцов, ковшей, резцов в забурнике) в линии резания m можно определить значение величины толщины стружки срезаемой резцовыми породоразрушающими инструментами роторного исполнительного (4.3):

$$h = \frac{v_n}{n_{uo} \cdot m}. \quad (4.3)$$

При этом, для исполнительного органа оснащённого виброактивными породоразрушающими инструментами, а именно шарошками значение толщины срезаемой стружки, как и скорость подачи, будет выше на коэффициент $k_{y\partial}$, как было выявлено при проведении теоретических и доказано в результате проведения экспериментальных исследований (4.4).

$$h = \frac{v_n}{n_{uo} \cdot m} \cdot k_{y\partial}. \quad (4.4)$$

3. Определение среднего усилия резания.

Среднее усилие резания на резцовых породоразрушающих инструментах может быть определено по следующей зависимости (4.5) [19]:

$$P_{zp} = P_k \cdot k_\alpha \cdot k_b \cdot (0,25 + 0,018 \cdot t \cdot h) + 0,27 \cdot \mu_\partial \cdot P_k \cdot F_{cp}, \quad (4.5)$$

где P_k – показатель контактной прочности породы, МПа; k_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины режущей кромки резцовых породоразрушающих инструментов; k_α – коэффициент, учитывающий влияние угла резания; μ_δ – коэффициент трения движения резцового породоразрушающего инструмента о горную породу; F_{cp} – средняя величина проекции площадки затупления резцового породоразрушающего инструмента по задней грани на плоскость резания, мм², t – шаг расстановки резцового породоразрушающего инструмента, м.

4. Определение крутящего момента идущего на резание породы.

Расчет крутящего момента, необходимого для разрушения забойного массива резцовым породоразрушающим инструментом выполняется по следующей зависимости (4.6):

$$M_{pi} = P_{zpi} \cdot n_i \cdot R_{cpi}, \quad (4.6)$$

где P_{zpi} – усилие на резцовом породоразрушающем инструменте в группе расстановки, кНм; n_i – количество резцовых породоразрушающих инструментов в группе расстановки; R_{cpi} – средний радиус расстановки групп резцовых породоразрушающих инструментов, м.

Для получения общего значения крутящего момента необходимо просуммировать значения крутящих моментов групп расстановки резцовых породоразрушающих инструментов (4.7):

$$M_p = M_{p1} + M_{p2} + M_{p4}. \quad (4.7)$$

5. Определение глубины внедрения виброактивных шарошек (4.8).

$$h = k \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^2 \cdot P_{oc}}{R \cdot f \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu \right) \cdot K_3} + \sqrt{\frac{P_{y\delta}}{Z \cdot d \cdot \sigma_{сж} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu \right) \cdot K_3 \cdot n_{y\delta}}} \right), \quad (4.8)$$

где α – угол заострения, град; f – крепость породы; R – радиус шарошки, мм; P_{oc} – осевое усилие, кН; μ_1 – коэффициент трения металла шарошки о породу;

K_3 - коэффициент затупления диска шарошки; z – число лезвий; $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на сжатие, Па; d – диаметр шарошки, м; $P_{уд}$ – ударная мощность, Вт; $n_{уд}$ – частота ударов, c^{-1} .

6. Определение усилий на шарошечном породоразрушающем инструменте (1.11).

7. Определение момента от шарошечного породоразрушающего инструмента (4.9).

$$M_{ш} = P_z \cdot n \cdot R_{cp}, \quad (4.9)$$

где n – количество шарошек; R_{cp} – средний радиус расстановки шарошек, м.

8. Определение крутящего момента на разрушение горной породы

Для определения крутящего момента идущего на разрушение горной породы необходимо просуммировать крутящие моменты от резцов, ковшей, забурника, шарошек (4.10):

$$M_{рез} = M_{рез} + M_{ков} + M_{заб} + M_{шар}; \quad (4.10)$$

9. Определение общего крутящего момента на роторном исполнительном органе (2.11).

4.4 Обоснование рациональной схемы резания и рекомендуемая модификация исполнительного органа

Как говорилось ранее в третьей главе в ходе проведенных экспериментальных исследований по разрушению образца кембрийской глины резцом было определено значение толщины срезаемой стружки $h=10 - 15$ мм при котором разрушение образца глины происходило в хрупкой стадии. Таким образом, для снижения энергоемкости процесса разрушения забойного массива необходимо добиться толщины срезаемой стружки 10 – 15 мм. Для достижения заданного значения толщины срезаемой стружки при работе роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита Herrenknecht в среде Ms Excel были произведены расчеты, в ходе которых,

были определены необходимые параметры, такие как частота вращения исполнительного органа, равная $0,042\text{--}0,05\text{ с}^{-1}$, и скорость подачи исполнительного органа на забой не менее $0,0005\text{ м/с}$. Однако в дальнейшем, для достижения максимальной скорости проходки, рекомендуется увеличить скорость вращения исполнительного органа.

При этом значение толщины срезаемой стружки резцами, установленными по 4 в линии резания не достигает заданного значения, поэтому необходимо уменьшить количество резцов в линии резания до 2 [109].

На рисунке 4.4 показана усовершенствованная схема расстановки резцов на исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht. У роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита имеется 16 лучей, причем установка резцов выполнена на нечетных номерах лучей. Снижение числа резцов производилось в линиях резания под номерами 29–42, где было установлено по 4 резца в линии резания.

Усовершенствованная схема расстановки резцов позволит не только снизить энергоемкость процесса разрушения, но и уменьшить со 101 до 73 общее количество резцов, что в свою очередь существенно сократит финансовые затраты.

Помимо установки резцов необходима рациональная установка виброактивных шарошек (рисунок 4.5). Для достижения интенсификации процесса разрушения сложного забойного массива, включающего твердые прослойки и включения по всей площади разрушаемого забоя необходимо добиться того, что бы виброактивные шарошки имели возможность разрушения всей площади забойного массива. При этом, как было выявлено в ходе экспериментальных исследований при наложении на дисковые шарошки ударной нагрузки на поверхности разрушаемого образца породы происходит образование не только большого количества сколов породы, но и трещин. Поэтому предлагается произвести установку виброактивных

шарошек через одну, чередуя их с дисковыми шарошками. Таким образом, виброактивные шарошки позволят не только скалывать, но и ослаблять массив.

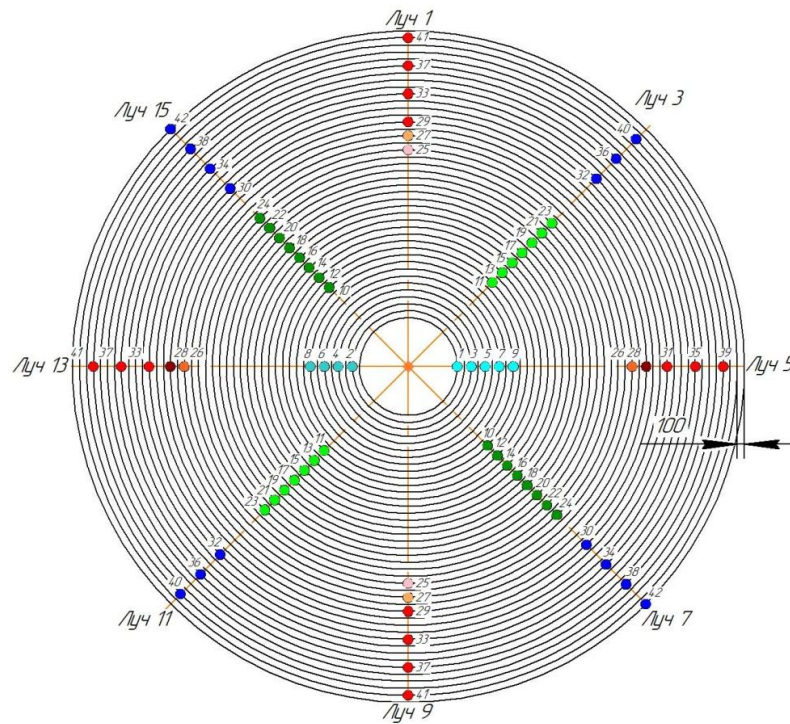


Рисунок 4.4 – Усовершенствованная схема расстановки резцов

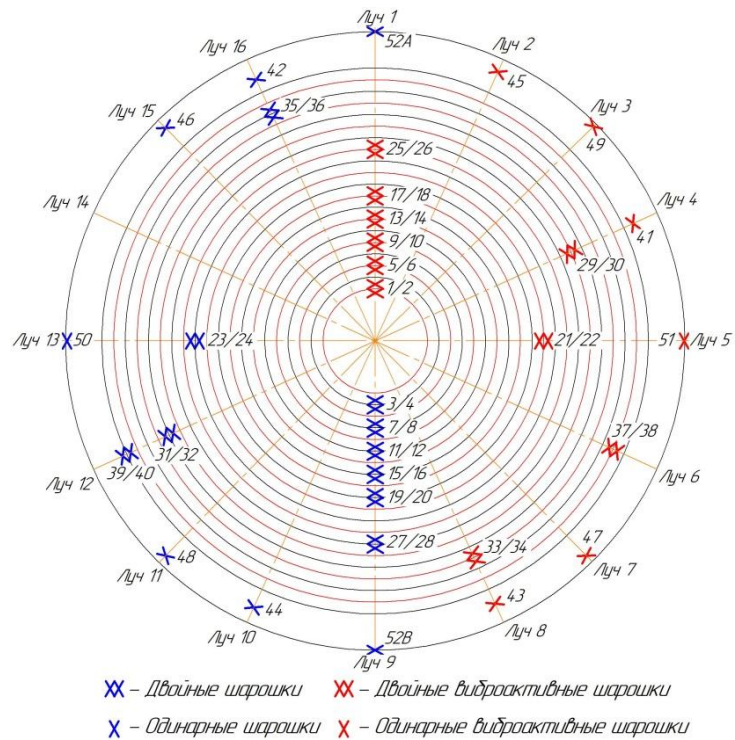


Рисунок 4.5 – Схема расстановки шарошечного породоразрушающего инструмента

4.5 Методика расчета производительности тоннелепроходческого щита при разрушении комбинированного породного массива

При механическом способе разрушения часто оказывается нерациональным повышение производительности машин путем увеличения их мощности. Исходя из приведенных ранее зависимостей, всегда необходимо стремиться к уменьшению удельной энергоемкости работы [66] горной машины, что достигается за счет применения режущего инструмента с рациональными геометрическими параметрами, а также правильного выбора схемы и параметров процессов разрушения породы, в нашем случае кембрийской глины с прослойками известняка. К числу наиболее важных параметров стоит отнести ширину t и толщину h стружки [56].

Для расчета необходимо смоделировать взаимодействие породоразрушающего инструмента установленного на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782 с прослойкой известняка мощностью 1000 мм (рисунок 4.6), и определить по формуле (4.2) такие физико-механические свойства разрушаемого забойного массива, как усредненный предел прочности на одноосное сжатие.

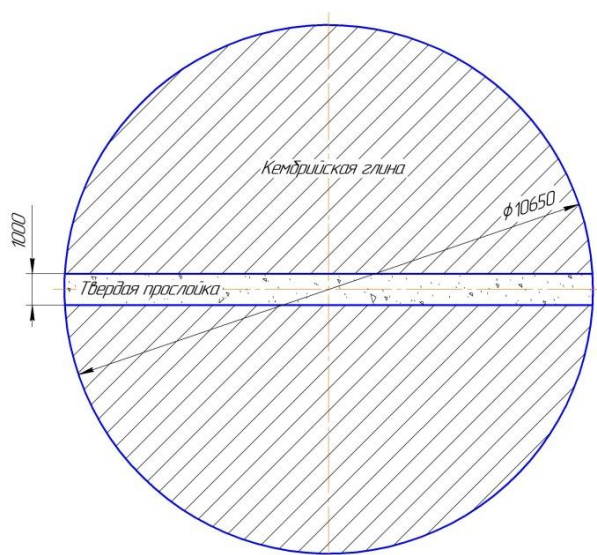


Рисунок 4.6 – Массив, представленный кембрийской с твердой прослойкой

В ходе расчетов по формулам (4.1 - 4.13) была построена номограмма зависимости крутящего момента и производительности от скорости подачи

исполнительного органа (рисунок 4.7). При этом теоретическая производительность тоннелепроходческого щита определяется по формуле (4.11):

$$Q_{теор} = \pi \cdot R_{щ}^2 \cdot v_{под} \cdot 3600, \quad (4.11)$$

где $R_{щ}$ – радиус щита, м; V_n – скорость подачи исполнительного органа на забой, м/с;

Суточная теоретическая производительность и эксплуатационные темпы строительства тоннеля определялись из следующих зависимостей (4.12, 4.13) [20]:

$$Q_{теор\ сум} = Q_{теор} \cdot 24; \quad (4.12)$$

$$\Pi_{э\ сум} = \Pi_{эк} (T_{см} - t_{м01} - t_{рн}) \cdot n_c, \quad (4.13)$$

где $\Pi_{эк}$ – эксплуатационная производительность, м/час; $T_{см}$ – продолжительность смены, час; $t_{м01}$ – время ежесменного технического обслуживания комплекса, час; $t_{рн}$ – время регламентированного перерыва, час; n_c – количество рабочих смен в сутки.

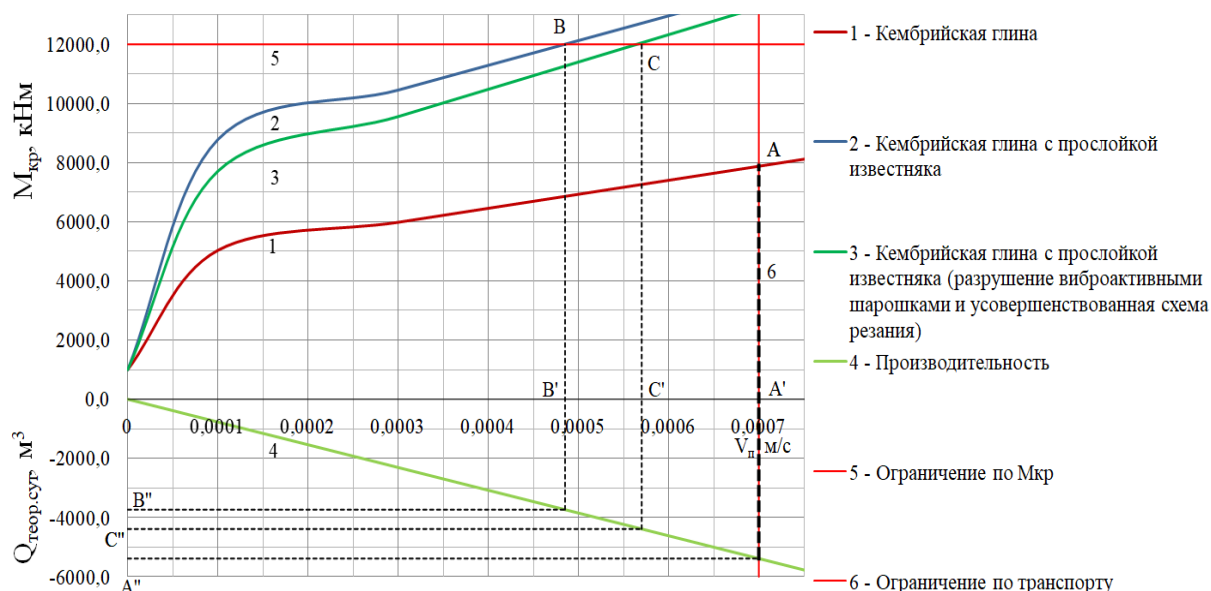


Рисунок 4.7 – Зависимость крутящего момента и производительности от скорости подачи исполнительного органа

При работе тоннелепроходческого щита основными факторами, ограничивающими скорость подачи исполнительного органа на забой, являются: номинальное значение крутящего момента (ограничение 5), совокупность ограничений, связанных с производительностью привода подачи исполнительного органа, скоростью выдачи отработанной породы из призабойного пространства, тампонажем заобделочного пространства (ограничение 6). Таким образом, исполнительный орган тоннелепроходческого щита, оснащенный резцами и дисковыми шарошками, при проходке тоннеля по забойному массиву, состоящему из кембрийской глины, будет иметь скорость подачи до 0,0007 м/с (точка А'), ограниченную совокупностью представленных выше факторов иметь теоретическую производительность $Q_m=5388 \text{ м}^3/\text{сут}$ (точка А''), что соответствует эксплуатационным темпам проходки $\Pi_{эм}=21,4 \text{ м/сут}$.

Во время работы исполнительного органа тоннелепроходческого щита по неоднородному забойному массиву, состоящему из кембрийской глины и прослойки известняка суммарной мощностью 1 м, скорость подачи будет ограничена значением номинального крутящего момента (точка В), составляющего 12000 кНм. При этом скорость подачи будет равна 0,000485 м/с (точка В') в виду возросших значений усилий на резцах и, как следствие, крутящего момента связанных с изменением физико-механических свойств разрушаемого массива. При такой скорости подачи значения теоретической производительности и эксплуатационных темпов проходки будут составлять $Q_m= 3733 \text{ м}^3/\text{сут}$ (точка В'') и $\Pi_{эм}= 16,4 \text{ м/сут}$.

Модернизация исполнительного органа путем установки виброактивных шарошек и совершенствование схемы расстановки резцов позволяет увеличить толщину срезаемой стружки, как было сказано ранее в 1,3 раза. При этом значение скорости подачи будет как и ранее ограничено значением номинального крутящего момента (точка С) и составит 0,00057 м/с (точка С') со значением теоретической производительности

$Q_m = 4387 \text{ м}^3/\text{сут}$ (точка С"), и эксплуатационных темпов проходки $P_{эм} = 19,7 \text{ м}/\text{сут}$.

Результаты расчета представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета теоретической производительности, а также эксплуатационных темпов проходки тоннеля тоннелепроходческим щитом Herrenknecht S-782

Породоразрушающий инструмент / условия проходки	$R_{ц}, \text{ м}$	$v_n, \text{ м}/\text{с}$	$Q_m, \text{ м}^3/\text{сут}$	$P_{эм}, \text{ м}/\text{сут}$
Резцы, дисковые шарошки / кембрийская глина	5,325	0,0007	5388	21,4
Резцы, виброактивные шарошки / кембрийская глина + известняк	5,325	0,00057	4387	19,7
Резцы, дисковые шарошки / кембрийская глина + известняк	5,325	0,000485	3733	16,4

Таким образом, предложенная номограмма позволяет определить фактические значения скорости проходки для различных горно-геологических условий. Проанализировав полученные значения производительности, а также скорости проходки тоннеля можно сделать вывод, что при использовании виброактивных шарошек, а также усовершенствованной схемы расстановки породоразрушающего инструмента прирост скорости проходки составит до 20 %. Помимо увеличения скорости проходки предложенная модернизация исполнительного органа позволит расширить область применения тоннелепроходческого щита, а также снизить финансовые и временные затраты на дополнительное оснащение

исполнительного органа твердосплавными материалами.

4.6 Технико-экономическое обоснование целесообразности применения нововведений

Показатели экономической эффективности разработанных нововведений, а именно установка виброактивных шарошек и усовершенствование схемы расстановки резцов рассчитываются с учетом того, при их работе не будет аварийных выходов из строя породоразрушающих инструментов установленных на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782 при проходке тоннелей в сложных горно-геологических условиях шахт ОАО «Метрострой». Направлениями образования экономического эффекта являются: повышение месячной производительности проходческих работ; снижение эксплуатационных затрат.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Показатели вариантов способа проходки перегонных тоннелей в условиях ОАО «Метрострой»

Наименование показателя	Единица измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
Способ проходки		Дисковые шарошки	Виброактивные шарошки, усовершенствованная схема расстановки резцов
Состав бригады по проходке тоннеля			
Проходчик	чел.	7	7
Машинист мультисервисного транспортного средства	чел.	2	2
Оператор эректора	чел.	1	1
Оператор крана перегружателя	чел.	1	1
Машинист тоннелепроходческого щита	чел.	1	1

Продолжение таблицы 4.2

Обслуживающий персонал	чел.	15	15
Длина сооружаемого тоннеля	м	5200	5200
Наружный диаметр тоннеля	м	10,6	10,6
Крепость породы по шкале проф. М.М. Протодяконова	f	1...6	1...6
Продолжительность смены	ч	12	12
Число рабочих смен в сутки	ед.	2	2

В таблице 4.3 и в приложении В представлен расчет технико-экономических показателей проходки перегонного тоннеля при использовании усовершенствованного исполнительного органа и заводского. Таблица 4.3 – Техничко-экономические показатели при использовании усовершенствованного исполнительного органа

Эксплуатационные затраты	Базовый вариант	Проектный вариант
Заработная плата	22243331	18199089
Амортизационные отчисления	210834	203288
Энергетические затраты	79022200	66406180
Текущий ремонт	105417	101644
Итого	45020530	40171624

Экономия эксплуатационных затрат (4.17):

$$\Delta C = C_1 \frac{T_2}{T_1} - C_2 = 37067923 \text{ руб.} \quad (4.17)$$

Годовой экономический эффект: $\mathcal{E} = 29654338 \text{ руб.}$

Таким образом, применение тоннелепроходческого щита с исполнительным органом оснащенным виброактивными шарошками в

совокупности с рациональной схемой расстановки породоразрушающего инструмента в сравнении с стандартным исполнительным органом позволит сократить эксплуатационные затраты при проходке тоннелей, что приведет к росту прибыли до 29,7 млн. руб.

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Разработан и запатентован виброактивный породоразрушающий инструмент – виброактивные шарошки, установка которых на роторный исполнительный орган тоннелепроходческого щита позволит интенсифицировать процесс разрушения смешанного забойного массива в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга.

2. Определена рациональная схема расстановки породоразрушающего инструмента на роторном исполнительном органе тоннелепроходческого щита.

3. Определены параметры работы роторного исполнительного органа при которых достигается максимальная скорость проходки тоннеля и минимальная энергоемкость процесса разрушения забойного массива.

4. Разработана методика силового расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита оснащенного виброактивным породоразрушающим инструментом.

5. На основании номограммы зависимости крутящего момента на исполнительном органе тоннелепроходческого щита и производительности от скорости подачи исполнительного органа на забой определены максимальные скорости подачи и производительности при работе по кембрийской глине и кембрийской глине с прослойкой известняка с применением и без виброактивных шарошек и усовершенствованной схемы расстановки резцов.

6. Установлен прирост до 20 % скорости проходки тоннеля по смешанному забою, состоящему из кембрийской глины и прослойки

известняка, при установке виброактивных шарошек совместно с усовершенствованной схемой расстановки резцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение скорости проходки перегонных тоннелей по неоднородным массивам, состоящим из кембрийской глины с прослойками известняка.

По результатам выполненной диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ известных конструкций и параметров роторных исполнительных органов тоннелепроходческих щитов показал отсутствие апробированных конструкций оснащенных виброактивным породоразрушающим инструментом.

2. Разработаны методики проведения экспериментальных исследований и стенды, позволяющие исследовать процессы виброактивного и режущего взаимодействия породоразрушающего инструмента с кембрийской глиной и известняком.

3. Теоретически доказан и экспериментально подтверждён рост глубины внедрения диска шарошки при наложении на нее ударной нагрузки в 1,2 раза для кембрийской глины, и не менее чем в 1,3 раза для известняка, причем зависимость глубины внедрения от осевого усилия совместно с накладываемой ударной нагрузкой имеет линейный характер.

4. Установлены зависимости крутящего момента на исполнительном органе и производительность тоннелепроходческого щита от скорости подачи исполнительного органа, на основании которой был выявлен прирост скорости проходки не менее чем на 20% при использовании виброактивных шарошек, усовершенствованной схемы расстановки резцов и уточненного режима работы.

5. Разработана конструкция виброактивного породоразрушающего инструмента, защищенная патентом на изобретение № 2019105393.

6. Составлены и приняты для внедрения открытым акционерным обществом по строительству метрополитена в городе Санкт-Петербурге Управлением Механизации – филиалом «Метрострой» (УМ – филиал ОАО «Метрострой») запатентованное конструктивное решение виброактивного исполнительного органа тоннелепроходческого щита для забойных массивов с разными физико-механическими свойствами, а также методика силового расчета роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита, оснащенного виброактивными породоразрушающими инструментами.

7. Применение щита с роторным исполнительным органом, оснащенным виброактивными шарошками в совокупности с рациональной схемой расстановки резцов, и уточненным режимом работы в сравнении с заводским исполнительным органом позволит получить при проходке тоннеля протяженностью 5000 м экономический эффект в размере 29,7 млн.руб.

8. Результаты диссертационной работы в дальнейшем могут быть использованы организациями для проектирования и расчета исполнительных органов малогабаритных тоннелепроходческих механизированных комплексов для проходки вспомогательных или аварийных выработок малого сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверин, Е.А. Зарубежный опыт использования клиновидных дисковых шарошек при оснащении тоннелепроходческих щитов // Горные науки и технологии. 2018. – №4. – С. 41-50.
2. Алабужев, П.М. Применение теории подобия и размерностей к исследованию (моделированию) машин ударного действия // Известия Томского политехнического института имени С.М. Кирова. 1952. – Т.73. – С. 107-152.
3. Александрова, О.Ю. Проблемы освоения подземного пространства Санкт-Петербурга и геологические процессы // Записки Горного Института. 2008. – Т. 176. – С. 209.
4. Алимов, О.Д. Бурильные машины / О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников – М., Машиностроение, 1977. – 295 с.
5. Бажин, Н.П. Результаты исследования физико-механических свойств кембрийских глин. – в кн. Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ / Н.П. Бажин, В.А. Петров, Ю.М. Карташов, А.И. Баженов – ВНИМИ, Л.: Недра, 1964. – С. 49-63.
6. Бакланов, И.В. Механика горных пород / И.В. Бакланов, Б.А. Картозия – М.: «Недра», 1980. – 287 с.
7. Барон, Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Том I. Научно-методические основы. Разрушение резцовым инструментом / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, Е.К. Губенков – М.: «Наука», 1968. – 216 с.
8. Барон, Л.И. Зависимость усилий перекатывания штыревых шарошек по забою от свойств горных пород / Л.И. Барон, С.Л. Загорский, Б.М. Логунцов – В сб. «Взрывное дело» изд-во «Недра», М. – 1966. №58/15.
9. Барон, Л.И. Исследование процесса разрушения горных пород свободно вращающимися клиновыми роликами / Л.И. Барон, С.Л. Загорский, Б.М. Логунцов – М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1962. – 35 с.
10. Барон, Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами:

Разрушение шарошками / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, С.Л. Загорский // Академия Наук СССР Министерство угольной промышленности СССР Институт горного дела им. А. А. Скочинского. – Москва: Наука, 1969. – 150 с.

11. Барон, Л.И. Экспериментальное определение времени контакта штырей шарошки с разрушенной породой / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, Ю.Г. Коняшин – Нефт. хоз. 1966. – №5.

12. Безгубов, А.П. Установление рациональных параметров процесса разрушения горных пород дисковыми шарошками в уступном забое: Автореф дисс. канд. тех. наук. М., - 1982. – 16 с.

13. Безродный, К.П. Практика внедрения безосадочных технологий при строительстве Санкт-Петербургского метрополитена / К.П. Безродный, А.И. Салан, В.А. Маслак, В.А. Марков, М.О. Лебедев // Записки Горного Института. 2012. –Т. 199. – С. 190.

14. Берон, А.И. Резание угля / А.И. Берон, А.С. Казанский, Б.М. Лейбов, Е.З. Позин – М.: Госгортехиздат, 1962. – 439 с.

15. Бойко, Е.Н. Особенности стружкообразования дисковых шарошек / Е.Н. Бойко, О.В. Федоров, В.А. Мельников ДНТУ. 2005.

16. Бойко, Н.Г. Повышение нагрузки на лаву и улучшение сортового состава угля без дополнительных затрат. Монография. / Н.Г. Бойко, Е.Н. Бойко – Донецк, РВД ДонНТУ, 2003. – 80 с.

17. Борисов, А.Ю. Влияние формы корпуса рабочего органа горного комбайна на нагруженность дискового инструмента / А.Ю. Борисов, А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин // Горное оборудование и электромеханика. 2016. – № 6. – С. 30–37.

18. Бреннер, В.А. Виброактивное разрушение горных пород проходческими комбайнами / В.А. Бреннер, И.П. Кавыршин, В.А. Кутлуни, В.Б. Струков, И.Г. Шмакин, Нин Чжун Лян, Т.В. Ковалёва, Ю.В. Антипов – Тула: Тульский полиграфист. 2000. – 203 с.

19. Бреннер В.А. Щитовые проходческие комплексы / В.А. Бреннер, А.Б. Жабин, М.М. Щеголевский // Москва: Горная книга. 2009. – 360 с.
20. Будников, В.Б. Математическое описание динамики щита тоннелепроходческого комплекса / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. – С. 194-198.
21. Валиев А.Г. Современные щитовые машины с активным пригрузом забоя для проходки тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях / А.Г. Валиев, С.Н. Власов, В.П. Самойлов – М.: ТА Инжиниринг, 2003. – 74 с.
22. Васильев, В.И. О создании проходческих комплексов для проведения выработок по крепким породам // Уголь. 1983. – №11. – С. 29-32.
23. Вербило, П.Э. Оценка рисков при разработке проекта тампонирования затопленных тоннелей / П.Э. Вербило, Е.И. Кабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. – № S5-2. – С. 25-33.
24. Габов, В.В. Схема расстановки резцов на шнековых исполнительных органах с подрезными, парными и групповыми срезами / В.В. Габов, В.С. Нгуен, Д.А. Задков, И.Д. Ключник, Д.Ч. До // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2020, – № 4, – С 3 – 14.
25. Газета ОАО «Метростроитель». 2014, – № 7 (3698)
26. Гамильтон, У.Г. Совершенствование шарошечного инструмента тоннелепроходческих машин бурового действия / У.Г. Гамильтон, Дж. Долингер // Глюкауф. 1980. – №17. – С. 13-19.
27. Герике, Б.Л. Некоторые особенности процесса разрушения крепких горных пород дисковым скалывающим инструментом. Кемерово, 1988. Деп. в ВИНТИ 22.01.88, – №609-B88, – 12 с.
28. Гетопанов, В.Н. Некоторые закономерности процесса разрушения горных пород резцовым инструментом выемочных горных машин. Научные труды, сб. №17. – М.: МГИИ, 1956. – С. 21-27.

29. Гигиняк, И. Е. Сооружение наклонного хода станции метрополитена с помощью ТПМК фирмы "Херренкнехт" в Санкт-Петербурге // Метро и Тоннели. 2009. – №5. – С. 4-5.
30. Гульелметти, В. Механизированная проходка тоннелей в городских условиях. Методология проектирования и управления строительством / В. Гульелметти, П. Грассо, А. Махтаба, Ш. Сю / GeodataS.p.A. Турин, Италия – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 602 с.
31. Дашко, Р.Э. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей / Р. Э. Дашко, П. В. Котюков, А. В. Шидловская. Записки Горного Института. 2012. – Т. 199. – С. 9.
32. Дашко, Р.Э. Инженерно-геологическое обеспечение эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге / Р.Э. Дашко, П. В. Котюков // Записки Горного Института. 2011. – Т. 190. – С. 71.
33. Дворников, Л.Т. Надежность буровых агрегатов / Л.Т. Дворников, В.А. Туров – М.: Недра, 1990. – 166 с.
34. Докукин, А.В. Выбор параметров выемочных машин. Научно-методические основы / А.В. Докукин, А.Г. Фролов, Е.З. Позин – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 144 с.
35. Жабин, А.Б. Основы проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих машин / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин, Ю.Н. Линник // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. – №6. – С. 156-164.
36. Жабин, А.Б. Основы проектирования исполнительных органов тоннелепроходческих машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. – № 9. – С. 299–304.
37. Жабин, А.Б. Расчет роторного исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса КТПМ-6.0 /

А.Б. Жабин, Ан.В. Поляков, Ал.В. Поляков, А.Д. Фомичев, Ю.В. // Горное оборудование и электромеханика. 2012. – № 2. – С. 16-23.

38. Жабин, А.Б. Сопоставление отечественных и зарубежных методов расчета усилий на лобовых дисковых шарошках при разрушении горных пород / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин // Горный журнал. 2018. – №12. – С. 65-68.

39. Жабин, А.Б. Состояние научных исследований в области разрушения горных пород резцовым инструментом на рубеже веков /А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин, В.И. Сарычев // Известия тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. – №1. – С. 230-247.

40. Зайков, В.И. «Проходческие щиты» М. МГГУ. 1994 г.

41. Задков, Д.А. Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин / Д.А. Задков, В.В. Габова, Кхак Линь Нгуен // Записки Горного Института. 2019. – Том 236. – С. 153.

42. Иванов, В.Н. Методика определения перспективных показателей бурового оборудования для подземных работ с пневматическими и гидравлическими перфораторами. Сб. науч. тр. «Разработка и совершенствование техники и технологии для предприятий горнорудной промышленности». Изд. ин-та Гипроникель, Л., 1991. – С. 19-25.

43. Иванов, К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 272 с.

44. Информационно – технический проспект ф. Ловат (Канада)

45. Исаев, А.И. Обоснование параметров сдвоенного ударного исполнительного органа проходческого комплекса для проведения вспомогательных выработок в кембрийских глинах: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. Санкт-Петербург. – 140 с.

46. Карасев, Е.А. Особенности работы сборных обделок транспортных тоннелей. Записки Горного Института. 2010. – Т. 185. – С. 180.

47. Каркашадзе Г.Г. Исследование процесса разрушения пород дисковыми шарошками / Г.Г. Каркашадзе, А.В. Бабич // ГИАБ. 2017. – № 1. – С. 109–116.
48. Карташов, Ю.М. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев - М.: Недра, 1979. – 269 с.
49. Карцев, А.К. Проходческий комбайн роторного типа для крепких пород / А.К. Карцев, К.Ф. Деркач // Уголь Украины. – 1978. – Л 2. – С. 27-29.
50. Клорикьян, В.Х. Горнопроходческие щиты и комплексы // В.Х. Клорикьян, В.А. Ходош – Москва : Недра, 1977. – 325 с.
51. Коломийцов, М.Д. Эксплуатация горных машин и автоматизированных комплексов. – Л.: ЛГИ, 1988. – 96 с.
52. Коршунов, В.А. Новый способ определения предела прочности при растяжении горных пород / В.А. Коршунов, Ю.М. Карташов // Записки горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 202–206.
53. Крапивин, Н.Г. Горные инструменты. – 3-е изд., перераб. и доп / Н.Г. Крапивин, Р.Я. Раков, А.И. Сысоев – М.: Недра, 1990. – 256 с.
54. Кутеко, В.С. Исследование работы дисковых шарошек // Торн машины и автоматика. – 1971. - №6. – С. 14-16.
55. Лавренко, С.А. Analysis of Cambrian clay cutting during Saint-Petersburg subway construction (Исследование процесса разрушения кембрийских глин резанием при проходке выработок метро Санкт-Петербурга) / С.А. Лавренко, И.А. Королев Горный журнал. 2018. – №2. – pp. 53-58.
56. Лавренко, С.А. Обоснование параметров исполнительных органов комплекса для проведения вспомогательных выработок в условиях кембрийских глин: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. Санкт-Петербург. – 182 с.
57. Леванковский, И.А. Научные основы создания высокоэффективных инструментов для разрушения горных пород и породосодержащих композитов: Автореф. дис. д-ра техн. наук. М., 1999. 38 с.

58. Леванковский, И.А. Разработка методов расчета нагруженности и износостойкости лобовых дисковых шарошек проходческих комбайнов: Автореферат дис. канд. техн. наук. – М. 1983. – 15 с.
59. Левин, А.М. Метод расчета нагрузок на исполнительных органах буровых проходческих комбайнов, оснащенных дисковыми шарошками / А.М. Левин, Б.А. Дейниченко, Н.А. Святый, Л.М. Шептева // Физ. тех. пробл. полез. ископаемых. – 1984. – №4. – С. 53-59.
60. Луганцев, Б.Б. Методика расчета параметров струговых установок: монография / Б.Б. Луганцев, Б.А. Ошеров, А.Н. Аверкин – ШахтНИУИ. – Новочеркасск: Лик. 2010. – 135 с.
61. Луганцев, Б.Б. Расчет и конструирование струговых установок / Б.Б. Луганцев, Б.А. Ошеров, Л.И. Файнбурд, А.Н. Аверкин // Москва : Горная книга. 2011. – 291 с.
62. Лукин, Д.Г. Совершенствование работы исполнительного органа проходческого щита КТ1-5,6М / Д.Г. Лукин, Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин**, А.И. Исаев // Горный журнал. 2018. – С. 73-77.
63. Малевич, Н.А. Комплексы оборудования для проходки и бурения вертикальных стволов: Учебник для вузов. – М.: «Недра», 1965. – 287 с.
64. Метод расчета усилий, действующих на поворотные резцы при разрушении горных пород. М.: НПЦ "ПИГМА-ЦЕНТР" АГН РФ, 1998. 5 с.
65. Одуло, Б.Г. Разрушение горных пород шарошками // Горные машины и автоматика / Б.Г. Одуло, В.С. Кутеко 1970. – С. 46-49.
66. ОСТ 12.44.258-84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчёт сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. – М.: Министерство угольного машиностроения, 1986. – 108 с.
67. Панкратов, М. Механизированные тоннелепроходческие комплексы. Мосметрострой. 2012. – 217 с.
68. Патент № 2701764 Российская Федерация, МПК E21D 9/093, E21C 27/24. Виброактивный исполнительный орган: № 2019105393; заявл.

- 26.02.2019, опубл. 01.10.2019 / Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин**, Р.Ю. Уразбахтин; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 9 с.
69. Пивнев, В.А. Обоснование параметров и выбор материалов деталей для ударной системы «поршень – боек – инструмент» перфоратора / В.А. Пивнев, Д.А. Юнгмейстер, М.Ю. Непран, С.А. Лавренко, Г.В. Соколова // Труды 10-ой Международной научно-практической конференции «Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения», Воркута: Воркутинский горный институт (филиал) ФГБ ОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2012. – т.2. – С. 395-399.
70. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ / Р. Ю. Подэрни. - М. : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та (МГГУ). 1998. – 422 с.
71. Позин, Е.З. Разрушение углей выемочными машинами / Е.З. Позин, В.З. Меламед, В.В. Тон – М.: Недра, 1984. – 288 с.
72. Поляков, А.В. Выбор и расчет рабочего органа тоннельной щитовой машины с активным пригрузом забоя / А.В. Поляков, А.Б. Жабин, П.Н. Чеботарев, В.Г. Хачатурян // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2019. – С. 139-149.
73. Прейс, Е.В. Моделирование образования объема крупных элементов при разрушении угля дисковой шарошкой / Е.В. Прейс, В.В. Кузнецов // Горное оборудование и электромеханика. 2015. – № 7. – С. 37–41.
74. Протасов, Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. М.: Недра, 1985. – 242 с.
75. Протоद्याконов, М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протоद्याконов, Р.И. Тедер - М.: Наука, 1970. – 76 с.
76. Протосеня, А.Г. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг / А.Г. Протосеня, Ю.Н. Огородников, П.А. Деменков, М.А. Карасев, М.О. Лебедев, Д.А. Потемкин, Е.Г. Козин – СПб: СПГГУ-МАНЭБ, 2011. – 355 с.
77. Проходческая техника, открывающая новую эру для подземных

- транспортных систем: Проспект “Херренкнехт тоннельсервис”, 2007, – 20с.
78. Проходческие щиты для сооружения тоннелей. Методические указания к курсовому проектированию. Москва, 1987 г.
79. РД 12.25.137-89 Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом
80. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород: Учебник для вузов / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик – М.: Недра, 1984. – 359 с.
81. Родин, Р.А. О механизме роста трещины при разрушении упруго-хрупкого тела // Горный журнал. Изв. ВУЗов. -1991. – №10. – С. 5-12.
82. Семенченко, А.К. Перспективы создания проходческих комбайнов нового технического уровня / А.К. Семенченко, О.Е. Шабает, Д.А. Семенченко, Н.В. Хиценко // журнал «Горная техника». 2005. – №7. – С. 20-23.
83. Смирнов, В.В. Исследование механизма разрушения горных пород при ударе // ФТПРПИ, 1968. – №4. – С. 39-46.
84. Солод, В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов – М.: Недра, 1981. – 503 с.
85. Танайно, А.С. Сопоставление классификаций горных пород по прочности // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2003. – № 6. – С. 13-17.
86. Уразбахтин, Р.Ю. Обоснование и выбор схемных решений комплекса для проведения выработок малого сечения в условиях угольных шахт: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. Санкт-Петербург. – 135 с.
87. Ушаков, Л.С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С. Ушаков, Ю.Е. Котылев, В.А. Кравченко – М: Машиностроение, 2000. – 416 с.
88. Федунец, Б.И. Технология проведения горных выработок в крепких породах комбайнами. Учебн. пособие. – М., МГИ, 1988, 106 с.
89. Харченко, В.В. Процессы очистных работ на пластах угольных шахт:

- учебник / В.В. Харченко, Н.П. Овчинников, В.И. Сулаев, А.А. Гайдай, В.В. Русских // Учеб. пособие. - Днепропетровск.: Изд-во НГУ. 2009. – 242 с.
90. Херренкнехт, М. Новейшие достижения в развитии механизированных щитов. Международная науч - практ. конференция «Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века – опыт и перспективы» / М. Херренкнехт, К. Бапплер - М.: 2002 г.
91. Ходош, В.А. Мировой технический уровень щитового способа сооружения тоннелей / В.А. Ходош, В.Н. Власов // Метрострой, 1990. – №3. – С. 31-33.
92. Хорешок, А.А. Основные этапы разработки и моделирования параметров дискового инструмента проходческих и очистных горных машин / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, В.И. Нестеров, А.Ю. Борисов // Горное оборудование и электромеханика. 2015. – № 7. – С. 9–16.
93. Хорешок, А.А. Прогнозирование максимального объема разрушенного материала дисковым инструментом / А.А. Хорешок, В.В. Кузнецов, А.Ю. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. – № 9. – С. 299–304.
94. Цехин, А.М. Оборудование и инструмент щитовых проходческих комплексов / А.М. Цехин, А.Ю. Борисов, Л.Е. Маметьев // Кузбасский государственный технический университет (ГУ КузГТУ). 2011. 34 с.
95. Черепанов, Г.П. Механика разрушения горных пород в процессе бурения – М.: Недра. 1987. – 308 с.
96. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения – М.: Наука, 1974. – 640 с.
97. Шишлянников, Д.И. Повышение эффективности отделения калийной руды от массива резцами добычных комбайнов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. Санкт-Петербург. – 159 с.
98. Эткин, С.М. Сооружение подземных выработок проходческими щитами / С.М. Эткин, В.М. Симошенко – М.: Недра, 1980. – 304 с.

99. Юнгмейстер, Д.А. Модернизация исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса Herrenknecht S-782 / Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин** // Горное оборудование и электромеханика. 2017. – №3. – С. 3-7.
100. Юнгмейстер, Д.А. Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка / Д.А. Юнгмейстер, А.И. Исаев, **А.И. Ячейкин**, П.Д. Соболева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. – № 3. – С. 28–36.
101. Юнгмейстер, Д.А. Совершенствование исполнительного органа тоннелепроходческого комплекса s-782 для условий метро Санкт-Петербурга / Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин** // Мир транспорта и технологических машин. 2017. – №3. – С. 66-73.
102. Юнгмейстер, Д.А. Устройство для интенсификации разрушения твердых прослоек при проходке выработок в массивах шахт метростроя Санкт-Петербурга / Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин**, Р.И. Королев, К.Е. Соболев // Сб. трудов XVII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург. 2019. – С. 80-81.
103. Юнгмейстер, Д.А. Виброактивный породоразрушающий инструмент для интенсификации разрушения сложносруктурированного забойного массива / Д.А. Юнгмейстер, М.Ю. Насонов, **А.И. Ячейкин** // Сб. трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург. 2020. – С. 123-125.
104. Юнгмейстер, Д.А. Использование исследовательских стендов для аспирантов и студентов / Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин** // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса. Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции. 2020. – С. 526-529.
105. Юнгмейстер, Д.А. Совершенствование роторных исполнительных

органов тоннелепроходческих щитов для интенсификации разрушения сложноструктурированного забойного массива / Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2020. – С.415-418.

106. Юнгмейстер, Д.А. Разработка конструкции комплекса для проходки коротких выработок в кембрийских глинах / Д.А. Юнгмейстер, А.И. Исаев, П.Д. Наумова // Горное оборудование и электромеханика. 2018. № 2 (136). – С. 35-40.

107. **Ячейкин, А.И.** Разработка специального породоразрушающего инструмента для тоннелепроходческого комплекса / А.И. Ячейкин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2018. – С. 138.

108. **Ячейкин, А.И.** Совершенствование исполнительного органа тоннелепроходческого комплекса работающего в условиях шахт «Метростроя Санкт-Петербурга» / А.И. Ячейкин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019. Сборник научных трудов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2019. – С. 338-340.

109. **Iacheikin, A.I.** Vervollständigung des Bohrkopfes von der Tunnelbohrmaschine Herrenknecht S-782 / A.I. Iacheikin // Scientific Reports on Resource Issues. - 2018. – Volume 1. pp. 197–202.

110. Rostami, J. A new model for performance prediction of hard rock TBMs / J. Rostami, L. Ozdemir // Rapid Excavation and Tunneling Conference: Proceedings. Boston. 1993. – P. 793–809.

111. Rostami, J. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models / J. Rostami, L. Ozdemir, B. Nilson // Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology, Las

Vegas. 1996. – Pp. 1-10.

112. Rostami, J. Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters / International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 57. – P. 172–186.

113. Rostami, J. A new model for performance prediction of hard rock TBMs / J. Rostami, L. Ozdemir // Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference. – Society for mining, metallurgy & exploration, Inc. 1993. – Pp. 793-793.

114. Yungmeister, D.A. Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the Metrostroy Saint Petersburg mines / D.A. Yungmeister, S.A. Lavrenko, **A.I. Yacheikin**, R. Yu. Urazbakhtin // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. – Volume 15. Issue 11. – Pages 1282-1288.

115. Yungmeister, D.A. Choice of materials and justification of the parameters for the over-bit hammer / D.A. Yungmeister, A.I. Isaev, R.I. Korolev, **A.I. Yacheikin** // Journal of Physics Conference Series. – 2020

116. Zhabin, A. Scale factors for conversion of forces on disc cutters for the main domestic and foreign methods / A. Zhabin, A. Polyakov, E. Averin // Mining of mineral deposits. 2017. – №11. – C. 50-55.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов диссертационной работы



Управление механизации –
филиал

ОАО «Метрострой»

198095, Санкт-Петербург тел: 252-47-70
ул. Маршала Говорова, 39 факс: 252-49-23
бухг: 252-27-21

sekretar@ummetrostroy.com



«Одтверждаю»

Директор

Управление механизации филиал
ОАО «Метрострой»

 А.Л. Шахов

«18» декабря 2020 года

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Ячейкина Алексея Игоревича на тему: «Определение рациональных конструкций и параметров исполнительного органа проходческих щитов большого диаметра для горно-геологических условий шахт Метростроя СПб»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы «Определение рациональных конструкций и параметров исполнительного органа проходческих щитов большого диаметра для горно-геологических условий шахт Метростроя СПб» Ячейкина Алексея Игоревича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 – Горные машины, выполненной в Санкт-Петербургском горном университете, за период с 2017г. по 2019г. приняты к внедрению.

Форма внедрения результатов диссертационной работы:

1. Рекомендации по области применения разработанного исполнительного органа тоннелепроходческого щита;
2. Методика расчета основных параметров разработанного исполнительного органа;
3. Компонировочные схемы исполнительного органа, согласно патенту (№ 2701764) РФ.

Указанные выше материалы будут использоваться при проектировании исполнительных органов тоннелепроходческих комплексов для проведения тоннелей в условиях шахт ОАО «Метрострой» города Санкт-Петербурга. Использование разработанной конструкции исполнительного органа позволит повысить производительность проходческих работ.

От предприятия:
Начальник ПТО



Коновалов С.А.

Главный механик



Чуев Е.В.



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Определение технико-экономических показателей

Определение капитальных затрат модернизированного исполнительного органа:

Стоимость оснащения исполнительного органа виброактивными шарошками (1):

$$C_M = (P_{ш} \cdot n_{ш} + P_p \cdot n_p + P_{уд} \cdot n_{уд} + P_{авт} \cdot n_{авт} + P_{рвд} + P_M) \cdot \alpha, \quad (1)$$

где $\alpha = 1,15$ коэффициент, учитывающий расходы на транспортировку и монтаж; $P_{ш} = 30000$ – стоимость дисковой шарошки без учета затрат на транспортировку, руб.; $n_{ш} = 33$ – количество шарошек; $P_p = 5000$ – стоимость резцов без учета затрат на транспортировку, руб.; $n_p = 146$ – количество резцов; $P_{уд} = 20000$ – стоимость ударника без учета затрат на транспортировку, руб.; $n_{уд} = 16$ – количество ударников; $P_{авт} = 10000$ – стоимость распределителей без учета затрат на транспортировку, руб.; $n_{авт} = 16$ – количество распределителей; $P_{рвд} = 30000$ – стоимость подводимых рукавов высокого давления без учета затрат на транспортировку, руб.; $P_M = \eta \cdot N = 20000 \cdot 2 = 40000$ руб. стоимость без учета затрат на доставку и монтаж, где η – стоимость 1 т металла, N – масса металла необходимого на переоснащение исполнительного органа, т.

Стоимость исполнительного органа равняется 2610500 руб.

Капитальные затраты (2):

$$C = C_M + K_{НИОКР} = 2610500 + 100000 = 2710500 \text{ руб.}, \quad (2)$$

где $K_{НИОКР}$ – затраты на научно-исследовательские и проектные работы на разработку нового оборудования.

$$K_{НИОКР} = 100000 \text{ руб.}$$

Итого по капитальным затратам с учетом дополнительных расходов на доставку и монтаж: $C = 2710500$ руб.

Определение эксплуатационных расходов

Расчет заработной платы:

Время, за которое разрабатывается требуемый объем породы при проходке тоннеля протяженностью 5000 м (3):

$$\tau_{\Pi} = \frac{L}{\beta} = \frac{5000}{19,7} = 254 \text{ дня} \approx 9 \text{ мес.} \quad (3)$$

где $L = 5000$ – общая протяженность разрабатываемого тоннеля, м;
 $\beta = 19,7$ м/сут – средняя производительность при новом варианте проходки.

Затраты на заработную плату рабочих, занятых обслуживанием комплекса, определяются (4):

$$C_z = C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{страх. взн}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{страх. взн}}$ – страховые взносы, составляет 34 % от суммы основной заработной платы; $C_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $C_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, составляет 10 % от основной заработной платы.

Тарифные ставки по данным ОАО «Метрострой» на 2020 год: проходчик V разряда – 2000 руб.; машинист проходческого комплекса – 2200 руб.; машинист МТС – 2000 руб.; оператор тубинг-крана – 2000 руб.; оператор эректора 2100 руб; обслуживающий персонал - 2000 руб.

Заработная плата машинистов проходческого комплекса:
 87323 руб/мес;

Заработная плата машинистов МТС: 80325 руб/мес;

Заработная плата проходчиков: 80325 руб/мес;

Заработная плата оператора тубинг-крана: 80325 руб/мес;

Заработная плата оператора эректора: 87323 руб/мес;

Заработная плата обслуживающего персонала: 80325 руб/мес;

Итого заработная плата за весь период проходки составит:
 18199089 руб.

Определение затрат на потребляемую энергию (5):

$$C_{эл} = \Pi_p \cdot P_3 + \Pi_3 \cdot W \cdot t_{раб}, \quad (5)$$

где P_3 – заявленная мощность потребителей, $P_3 = 2500$ кВт; Π_p – дополнительная плата за потребляемую электроэнергию, $\Pi_p = 4,76$ руб/кВт·ч; Π_3 – основная плата в месяц, $\Pi_3 = 250,45$ руб/кВт; W – суммарная мощность всех потребителей, $W = 3000$ кВт; $t_{раб}$ – время работ машины за весь период проходки тоннеля: $t_{раб} = 2 \cdot T_{см} \cdot k_p \cdot n_c = 1738$ час.,

где $T_{см}$ – количество часов в смене, $T_{см} = 12$ часов; k_p – коэффициент включения машины, $k_p = 0,75$; n_c – количество суток работы, $n_c = 254$ дней.

Затраты на потребляемую электроэнергию за весь период проходки составят $C_{эл} = 65913160$ руб.

Затраты на сжатый воздух (6):

$$C_{п} = 60 \cdot g \cdot n_0 \cdot T_{ц} \cdot \eta \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot C_в, \quad (6)$$

где g – номинальный расход воздуха, $g = 0,27$ м³/мин; $\eta = 0,8 \div 1,0$; $i_1 = 1,1$ и $i_2 = 1,0$ – коэффициенты, учитывающие потери сжатого воздуха соответственно в сети и в двигателе при среднем износе его деталей; $C_в = 0,9$ руб. – стоимость 1 м³ сжатого воздуха; n_0 – число одновременно работающих ударников, $n_0 = 2$; $T_{ц}$ – продолжительность разработки породы, $T_{ц} = 4$ ч.

Затраты на сжатый воздух равняются 493020 руб.

Итого энергетические затраты составят: 66406180 руб.

Определение амортизационных отчислений для исполнительного органа оснащенного виброактивными шарошками совместно с усовершенствованной схемой расстановки резцов (7):

$$A_{м} = C \frac{N_T}{12 \cdot 100\%} = 22587,5 \text{ руб/мес}, \quad (7)$$

где $N_T = 10$ % годовая норма амортизационных отчислений.

Итого по амортизационным отчислениям: 203288 руб.

Определение расходов на текущий ремонт исполнительного органа (8):

$$C_p = 2710500 \cdot \frac{0,05}{12} = 11294 \text{ руб/мес.} \quad (8)$$

Итого по расходам на текущий ремонт – 101644 руб.

Определение капитальных затрат заводского исполнительного органа

Стоимость породоразрушающего инструмента (9):

$$C_{\text{ПИ}} = (\Pi_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}} + \Pi_{\text{р}} \cdot n_{\text{р}}) \cdot \alpha, \quad (9)$$

где $\Pi_{\text{ш}} = 30000$ – стоимость дисковой шарошки без учета затрат на транспортировку, руб.; $n_{\text{ш}} = 33$ – количество шарошек; $\Pi_{\text{р}} = 5000$ – стоимость резцов без учета затрат на транспортировку, руб.; $n_{\text{р}} = 202$ – количество резцов; $\alpha = 1,5$ – коэффициент резервного оборудования. Итого по капитальным затратам: $C = C_{\text{ПИ}} = 2300000$ руб.

Определение эксплуатационных расходов

Расчет заработной платы:

Время, за которое разрабатывается требуемый объем породы при проходке тоннеля длиной 5000 метров (10):

$$\tau_{\text{п}} = \frac{L}{\beta} = \frac{5000}{16,4} = 305 \text{ дней} \approx 11 \text{ мес.} \quad (10)$$

где $L = 5000$ – общая длина разрабатываемого тоннеля, м; $\beta = 16,4$ м/сут – средняя производительность при новом варианте проходки.

Затраты на заработную плату рабочих, занятых обслуживанием комплекса определяются по формуле (4):

Заработная плата машинистов проходческого комплекса:
87323 руб/мес;

Заработная плата машинистов МТС: 80325 руб/мес;

Заработная плата проходчиков: 80325 руб/мес;

Заработная плата оператора тубинг-крана: 80325 руб/мес;

Заработная плата оператора эректора: 87323 руб/мес;

Заработная плата обслуживающего персонала: 80325 руб/мес;

Итого заработная плата за весь период проходки составит:

22243331 руб.

Определение затрат на потребляемую энергию:

Стоимость электроэнергии по базовому варианту по формуле (5) составит: 79022200 руб.

Итого энергетические затраты составят: 79022200 руб.

Определение амортизационных отчислений для исполнительного органа по формуле (7): $A_M = 210833,333$ руб.

Определение затрат на текущий ремонт исполнительного органа: $C_p = 105417$ руб.

Полученные данные по учтенным элементам эксплуатационных затрат по новому и базовому вариантам проходки вспомогательных выработок и станционных тоннелей в условиях ОАО «Метрострой» сведены в таблицу В.1.

Таблица В.1 – Эксплуатационные затраты по вариантам (руб/мес)

Эксплуатационные затраты	Базовый вариант	Проектный вариант
Заработная плата	22243331	18199089
Амортизационные отчисления	210834	203288
Энергетические затраты	79022200	66406180
Текущий ремонт	105417	101644
ИТОГО	45020530	40171624

Экономия эксплуатационных затрат (11):

$$\Delta C = C_1 \frac{T_2}{T_1} - C_2 = 37067923 \text{ руб.} \quad (11)$$

Годовой экономический эффект (12):

$$\mathcal{E} = 0,8 \cdot 37067927 = 29654338 \text{ руб.} \quad (12)$$