

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

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

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич

Официальные оппоненты:

Жабин Александр Борисович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра «Геотехнологий и строительства подземных сооружений», профессор;

Кузиев Дильшиад Алишерович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Горного оборудования, транспорта и машиностроения», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Защита диссертации состоится 23 сентября 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб-сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 проработанности 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. Кутлуни, 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.

Защищаемые научные положения:

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

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (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, а также защищаемые научные положения. 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 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 страницы печатного текста, содержит 21 таблицу и 60 рисунков, список литературы из 116 наименований, 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены: актуальность и степень разработанности темы исследования, цель, задачи, идея и научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя и данные о публикациях.

В первой главе представлены горно-геологические условия, в которых осуществляется строительство Санкт-Петербургского метро и трудности, связанные с ним. Показаны основные направления развития тоннелепроходческой техники для проходки тоннелей, рассмотрены их преимущества и недостатки. Рассмотрены конструкции породоразрушающего инструмента, применяемого на исполнительных органах тоннелепроходческих щитов. Выполнен анализ работы роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита при разрушении неоднородного массива в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга. Определены цель и задачи исследования.

Во второй главе произведен анализ процесса разрушения

горных пород резцовым и шарошечным породоразрушающим инструментом. Выполнен анализ методик расчета усилий на породоразрушающем инструменте, показавший, что расчет усилий на породоразрушающем инструменте, в том числе моделирование его взаимодействия с породным массивом, при проходке тоннелей в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга целесообразно производить с использованием методик ЦНИИподземмаш – для резцового породоразрушающего инструмента, J. Rostami – L. Ozdemir – для шарошечного породоразрушающего инструмента.

На основании предварительного силового расчета роторного исполнительного органа была построена номограмма зависимости крутящего момента и производительности тоннелепроходческого щита от скорости подачи. Анализ номограммы показал, что во время проходки тоннелей по смешанным массивам, состоящим из кембрийской глины и твердых прослоек известняка, в виду изменения физико-механических свойств разрушаемого массива, происходит увеличение усилий на породоразрушающем инструменте с последующим ростом крутящего момента на исполнительном органе. Таким образом, уменьшается скорость подачи исполнительного органа на забой, что приводит к снижению темпов проходки тоннеля.

В настоящий момент существует проблема, связанная с отсутствием универсального породоразрушающего инструмента, предназначенного для разрушения неоднородного массива. Однако известны эффективные способы разрушения массивов путем наложения ударных нагрузок на породоразрушающие инструменты. Поэтому для интенсификации процесса разрушения неоднородного массива предлагается наложить на дисковые шарошки ударную нагрузку (виброактивные шарошки).

Для исследования процесса разрушения неоднородного массива с помощью дисковой шарошки с накладываемой на нее ударной нагрузкой были выполнены теоретические исследования, в ходе которых было определено, что глубина внедрения диска шарошки в породу состоит из глубины внедрения, полученной в результате воздействия осевого усилия P_{oc} (1) и глубины

внедрения, полученной в результате воздействия ударной нагрузки $A_{y\partial}$ (2):

$$h_{Poc} = \frac{3 \cdot 10^2 \cdot P_{oc}}{R \cdot f \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu \right) \cdot K_3}, \quad (1)$$

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

$$h_{A_{y\partial}} = \sqrt{\frac{P_{y\partial}}{Z \cdot d \cdot \sigma_{сж} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu \right) \cdot K_3 \cdot n_{y\partial}}}, \quad (2)$$

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

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 глубин внедрения, полученных в результате воздействия осевого усилия и ударной нагрузки (3):

$$h = h_{Poc} + h_{A_{y\partial}}, \quad (3)$$

Теоретические исследования при изменяемых осевых усилиях и неизменной величине ударной нагрузки показали линейную зависимость глубины внедрения диска виброактивной шарошки. При этом прирост глубины внедрения в образец кембрийской глины составил 25 %, а в образец известняка 33 % (рисунок 1 а). В тоже время величина глубины внедрения шарошки в породу при постоянном осевом усилии и изменяемой ударной нагрузке интерпретируется экспоненциальной зависимостью (рисунок 2).

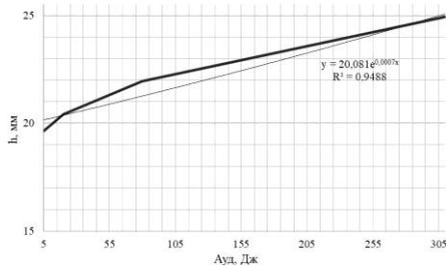


Рисунок 2 – Зависимость глубины внедрения шарошки в породу при постоянном осевом усилии и изменяемой ударной нагрузке

Третья глава посвящена проверке выдвинутых во второй главе предположений о том, что наложение ударной нагрузки позволяет увеличить глубину внедрения породоразрушающего инструмента и объем скола породы, а также о том, что для определения глубины внедрения возможно применение правила аддитивности. Для этого была разработана методика проведения экспериментальных исследований, а также спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд.

Методика включала в себя 8 серий опытов с наложением на трехшарошечную модель ударной нагрузки 5,4 Дж и без, с 4 осевыми усилиями: 0,125 кН, 0,175 кН, 0,225 кН, 0,275 кН. При этом количество опытов в каждой серии составило 4. Для конструкции модели шарошки были приняты следующие допущения: угол заострения шарошки $\alpha=60^\circ$; диаметр шарошки $d=60$ мм (рисунок 4 в).

Экспериментальный стенд (рисунок 4 а, б) представляет собой рамную конструкцию, состоящую из неподвижного основания 1 внутрь которого устанавливается исследуемый образец породы 2. Вторая подвижная часть стенда состоит из подвижной рамы 3 с закрепленным при помощи захвата 4 перфоратором 5 и вставленной в него штангой 7 с моделью шарошки 6. Центрирование модели осуществляется при помощи центрирующей направляющей 8. Изменение осевого усилия происходило путем нагружения подвижной рамы тарированными грузами 9.

Экспериментальные исследования проводились на образцах кембрийской глины (рисунок 3 а) с крепостью $f=1$ ($\sigma_{сж}=5$ МПа), а также известняка (рисунок 3 б) с крепостью $f=6$ ($\sigma_{сж}=75$ МПа),

отобранных при строительстве Лахтинско-Правобережной линии Санкт-Петербургского метро. Результаты экспериментальных исследований показаны на рисунке 1.

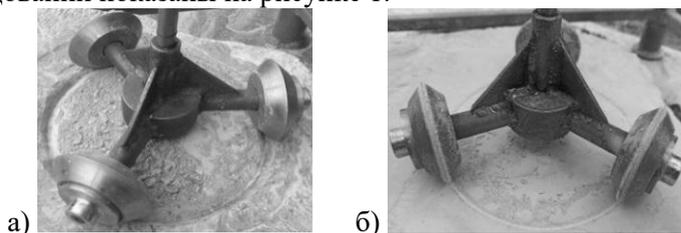


Рисунок 3 – Проведение экспериментальных исследований на образцах: а – кембрийской глины; б – известняка

В ходе исследований было выявлено, что зависимость изменения глубины внедрения h от предела прочности на сжатие с накладываемой ударной нагрузки $A_{уд}$ (5,4 Дж) и без нее не полностью удовлетворила условие аддитивности. Поэтому для мягких пород (кембрийская глина) необходимо использование в формуле (3) уточняющего коэффициента $k=1,03$, а для крепких (известняк) $k=0,94$.

В тоже время, в ходе проведения экспериментальных исследований был доказан прирост глубины внедрения шарошки при наложении на нее ударной нагрузки до 25 % для кембрийской глины, и более 30 % для известняка (рисунок 1 а). Для дальнейшего расчета параметров процесса разрушения вводится коэффициент $k_{уд}=1,3$, показывающий увеличение глубины внедрения породоразрушающего инструмента при наложении на него ударной нагрузки. При изучении изменения объема скола породы был выявлен прирост более 50 % для глины и до 60 % для известняка при наложении ударной нагрузки на шарошки (рисунок 1 б).

Для оптимизации процесса разрушения кембрийской глины резцами были проведены экспериментальные исследования, показавшие что при значении толщины срезаемой стружки $h>15$ мм происходит переход от стадии хрупкого разрушения в пластичную, характеризующуюся меньшим сколом породы (рисунок б). Поэтому для разрушения кембрийской глины с заданным значением толщины срезаемой стружки была разработана схема расстановки резового породоразрушающего инструмента на исполнительном органе (рисунок 5 а) и определен

режим работы со скоростью подачи $v_n=0,0005$ м/с и частотой вращения исполнительного органа $n=0,05$ с⁻¹.

Обработка результатов экспериментальных исследований показала, что при доверительной вероятности $p=0,95$, значения доверительного интервала и дисперсии не превышают допустимого значения (3-5 %), что означает достаточную воспроизводимость экспериментальных данных.

В четвертой главе представлен вариант конструкции роторного исполнительного органа тоннелепроходческого щита, оснащенного виброактивными шарошками, предназначенного для проходки тоннелей по неоднородным массивам, обладающим различными физико-механическими свойствами.

Проходка тоннелей по неоднородному массиву в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга характеризуется низкой скоростью подачи исполнительного органа на забой, связанной с невозможностью разрушения резцовым породоразрушающим инструментом массива, состоящего из кембрийской глины с прослойками известняка или песчаника.

Для повышения эффективности механического разрушения по результатам проведенных ранее исследований была разработана конструкция виброактивных шарошек (рисунок 7). При взаимодействии шарошки 1 с твердыми прослойками происходит ее отжатие вместе с толкателем 4 в направляющей 5 в противоположную забою сторону. Пружина 7, сцентрированная в кольцевых пазах 14, сжимаясь, позволяет снизить ударную динамику, возникающую при изменении физико-механических свойств разрушаемого массива. В момент сжатия пружины 7 происходит включение концевого датчика 11, подающего сигнал на включение генератора колебаний 8. Включение генератора колебаний 8 происходит при отжатии шарошки от пластины 13. Колебания от генератора 8 передаются на шарошку 1 через толкатель 4 и ось 2. Таким образом, происходит скол породы, образование систем трещин и последующее ослабление массива.

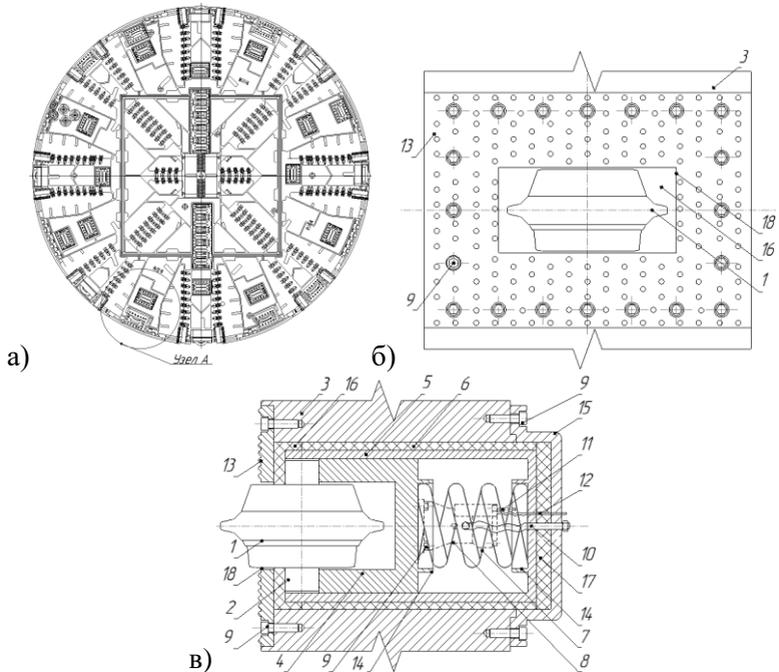


Рисунок 7 – Исполнительный орган: а – общий вид исполнительного органа; б, в – конструкция виброактивной шарошки

Для силового расчета роторного исполнительного органа и определения скорости проходки тоннеля проходческим щитом сформулирована методика, включающая:

1. Определение усредненного предела прочности на сжатие неоднородного массива (4):

$$\overline{\sigma_{сж}} = \sigma_{гл} \cdot \left(1 - \frac{S_{тв}}{S_{общ}}\right) + \sigma_{тв} \cdot \left(1 - \frac{S_{гл}}{S_{общ}}\right), \quad (4)$$

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

2. Определение толщины срезаемой стружки (5):

$$h = \frac{v_n}{n_{uo} \cdot m}, \quad (5)$$

где v_n – скорость подачи исполнительного органа, м/с; n_{uo} – частота вращения ротора, c^{-1} ; m – число резцовых породоразрушающих инструментов (резцов, ковшей) в линии резания.

При этом, для исполнительного органа оснащённого виброактивными шарошками значение толщины срезаемой стружки (6), как и скорость подачи будет выше на коэффициент $k_{y\partial}$, определенный при проведении исследований.

$$h = \frac{v_n}{n_{uo} \cdot m} \cdot k_{y\partial} \quad (6)$$

3. Определение среднего усилия резания по методике ЦНИИподземмаш (7):

$$P_{zp} = P_k \cdot k_\alpha \cdot k_b \cdot (0,25 + 0,018 \cdot t \cdot h) + 0,27 \cdot \mu_\partial \cdot P_k \cdot F_{cp}, \quad (7)$$

где P_k – контактная прочность породы, МПа; k_b – коэффициент, учитывающий влияние ширины режущей кромки резцовых породоразрушающих инструментов; k_α – коэффициент, учитывающий влияние угла резания; μ_∂ – коэффициент трения; F_{cp} – средняя величина проекции площадки затупления резцового породоразрушающего инструмента, mm^2 ; t – шаг расстановки резцового породоразрушающего инструмента, м.

4. Определение крутящего момента идущего, на резание породы (8):

$$M_{pi} = P_{zpi} \cdot n_i \cdot R_{cpi}, \quad (8)$$

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; i – число групп.

Для получения общего значения крутящего момента необходимо просуммировать значения крутящих моментов групп расстановки резцовых породоразрушающих инструментов (9):

$$M_p = \sum_{i=1}^3 M_{pi} \quad (9)$$

5. Определение глубины внедрения виброактивных шарошек, осуществляется по формуле (10):

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

6. Определение усилий на дисковых шарошках по методике J. Rostami, L. Ozdemir (11):

$$P_z = \frac{2,12 \cdot \sqrt[3]{\frac{s \sigma_{сж}^2 \sigma_p}{\gamma \sqrt{RT}} RT \gamma}}{1 + \psi} \sin \frac{\gamma}{2}, \quad (11)$$

где s – шаг резания, мм (рисунок 5 б); $\sigma_{сж}$ – 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; $\gamma = \arccos \frac{R-h}{R}$ – угол контакта между шарошкой и горной породой, рад; h – глубина внедрения диска шарошки, мм; ψ – коэффициент, описывающий функцию распределенной нагрузки (находится в пределах от $-0,2$ до $0,2$) уменьшаясь по мере увеличения ширины режущей кромки.

Как показали проведенные экспериментальные исследования (рисунок 1), согласующиеся с результатами исследований виброактивных исполнительных органов горных машин, выполненных группой исследователей под руководством профессора В.А. Бреннера, наложение виброударной нагрузки на породоразрушающий инструмент не приводит к существенному увеличению усилий на нем из-за снижения коэффициента трения f_n . Таким образом, можно допустить, что значение усилия перекачивания виброактивных шарошек будет соответствовать значению усилия перекачивания дисковых ($P_{z \text{ вибр}} = P_{z \text{ диск}}$).

7. Определение крутящего момента на шарошечного породоразрушающего инструмента (12):

$$M_{ш} = P_z \cdot n \cdot R_{cp}, \quad (12)$$

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

8. Определение крутящего момента на разрушение горной породы (13).

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

$$M_{рез} = M_{рез} + M_{ков} + M_{заб} + M_{ш} ; \quad (13)$$

9. Определение общего крутящего момента на роторном исполнительном органе (14):

$$M_{кр} = M_{рез} + M_{мп} + M_x + M_{nn} , \quad (14)$$

где $M_{рез}$ – момент, необходимый только на резание горной породы; $M_{мп}$ – 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.

Во время проходки туннеля 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 % от общего момента (по монографии «Щитовые проходческие комплексы»). Таким образом, зная теоретически рассчитанное значение крутящего момента, идущего на разрушение породы $M_{рез}$, можно определить общий крутящий момент на исполнительном органе (15):

$$M_{кр} = k \cdot M_{рез} , \quad (15)$$

где $k=4$ – коэффициент, учитывающий значения крутящих моментов, достаточных для преодоления сил трения и холостого хода, преодоления усилий на перемешивание породы.

10. Определение производительности проходческого щита (16):

$$Q_{теор} = \pi \cdot R_{щ}^2 \cdot v_{под} \cdot 3600 , \quad (16)$$

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

11. При недостаточном значении производительности увеличить частоту вращения исполнительного органа $n_{щ}$ и повторить расчет

В соответствии с представленной методикой был произведен расчет основных силовых показателей, на основании которых была

построена номограмма зависимости крутящего момента и производительности от скорости подачи исполнительного органа (рисунок 8).

При работе щита основными факторами, ограничивающими скорость подачи исполнительного органа на забой, являются: номинальное значение крутящего момента (линия 5, рисунок 8), совокупность ограничений, связанных с производительностью привода подачи исполнительного органа, скоростью выдачи отработанной породы из призабойного пространства, тампонажем заобделочного пространства (линия 6, рисунок 8). Таким образом, исполнительный орган щита, оснащенный резами и дисковыми шарошками, при проходке тоннеля по массиву, состоящему из кембрийской глины, будет иметь скорость подачи до 0,0007 м/с (точка А'), ограниченную совокупностью представленных выше факторов, и 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 щита по неоднородному массиву, состоящему из кембрийской глины и прослоек известняка суммарной мощностью до 1 м, скорость подачи будет ограничена значением номинального крутящего момента (точка В), составляющего 12000 кНм. При этом скорость подачи будет составлять 0,000485 м/с (точка В'). При такой скорости подачи, значения теоретической производительности и эксплуатационных темпов проходки будут составлять $Q_m = 3733 \text{ м}^3/\text{сут}$ (точка В'') или $\Pi_{эм} = 16,4 \text{ м/сут}$.

Модернизация исполнительного органа путем установки виброактивных шарошек и совершенствованием схемы расстановки резцов позволят интенсифицировать процесс разрушения массива. 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 $\Pi_{эм} = 19,7 \text{ м/сут}$.

Таким образом, предложенная номограмма позволяет определить фактические значения скорости проходки для различных горно-геологических условий. Расчеты показывают, что

установка на исполнительном органе тоннелепроходческого щита Herrenknecht S-782 разработанных виброактивных шарошек в совокупности с усовершенствованной схемой расстановки резцов и уточненным режимом работы позволяют увеличить до 20 % скорость проходки, снизить вероятность аварийных простоев, уменьшить затраты на дополнительное оснащение ротора дорогостоящими твёрдосплавными материалами и расширить область применения тоннелепроходческих щитов для работы в горно-геологических условиях шахт Метростроя Санкт-Петербурга.

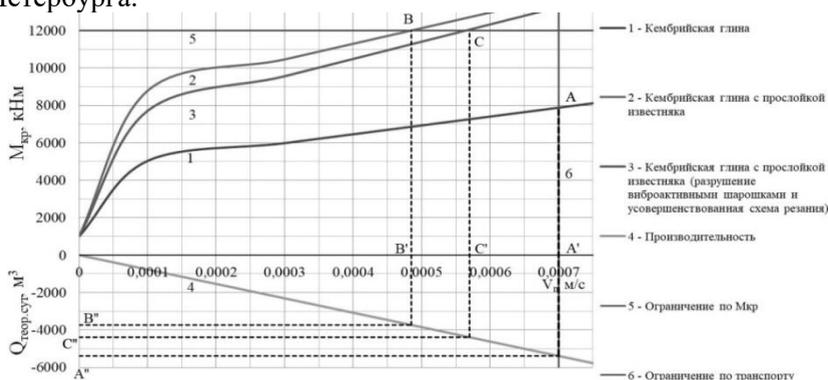


Рисунок 8 – Зависимости крутящего момента и производительности от скорости подачи исполнительного органа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение скорости проходки перегонных тоннелей в неоднородном массиве, состоящем 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 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

Публикации в изданиях из Перечня ВАК и входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Лукин, Д.Г. Совершенствование работы исполнительного органа проходческого щита КТ 1-5,6М / Д.Г. Лукин, Д.А. Юнгмейстер, **А.И. Ячейкин**, А.И. Исаев / Горный журнал. 2018. – № 12. – С 73 – 77.

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

4. 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.Y. Urzabakhtin / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. – № 11. Т 15. – pp. 1282–1288.

5. 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.

Патент:

6. Патент № 2701764 С1 Российская Федерация, МПК E21D 9/093, E21C 27/24. Виброактивный исполнительный орган: № 2019105393 заявл. 26.02.2019, опубл. 01.10.2019 / Юнгмейстер Д.А., **Ячейкин А.И.**, Уразбахтин Р.Ю.; заявитель СПГУ. – 9 с.: ил.

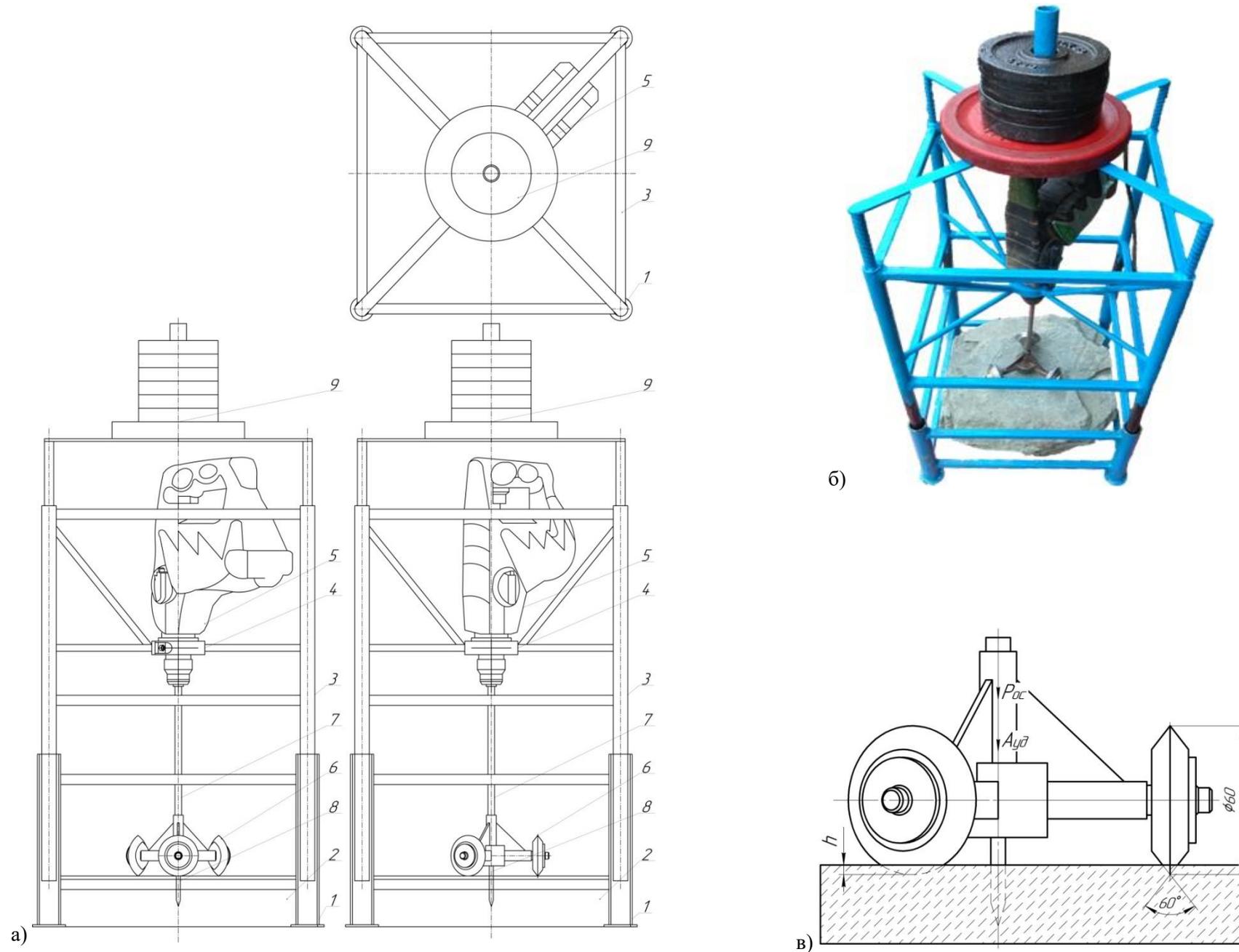
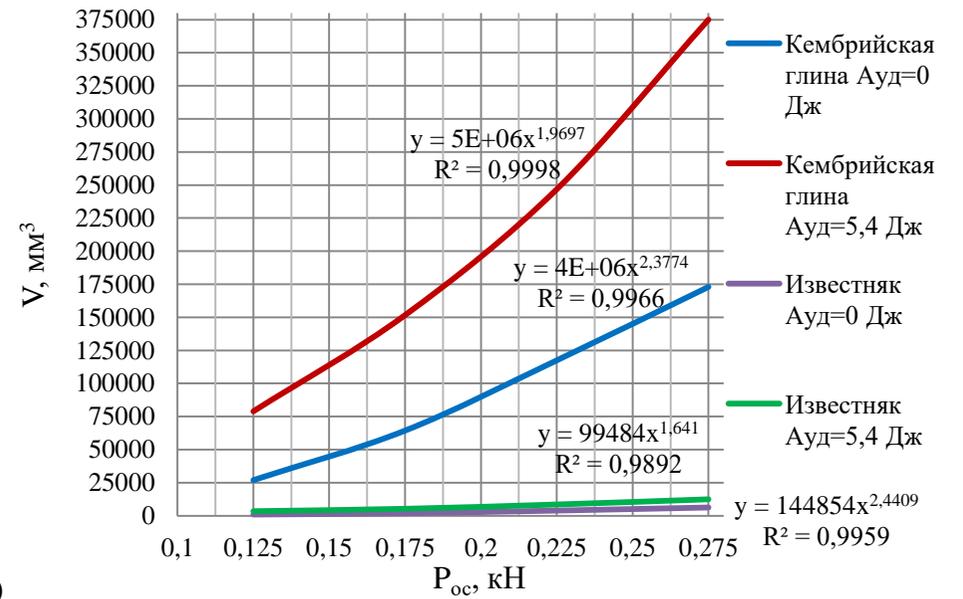
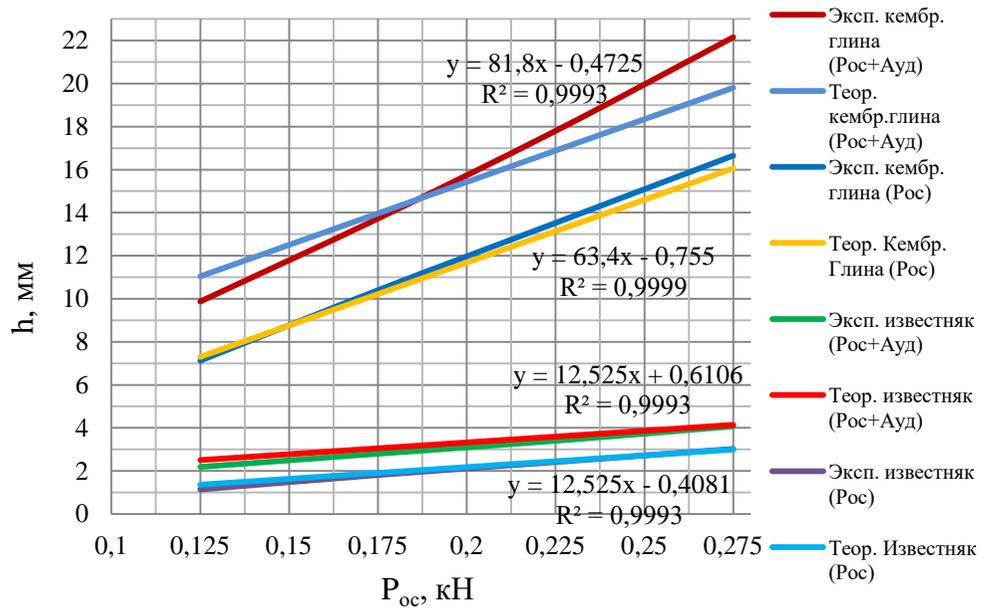
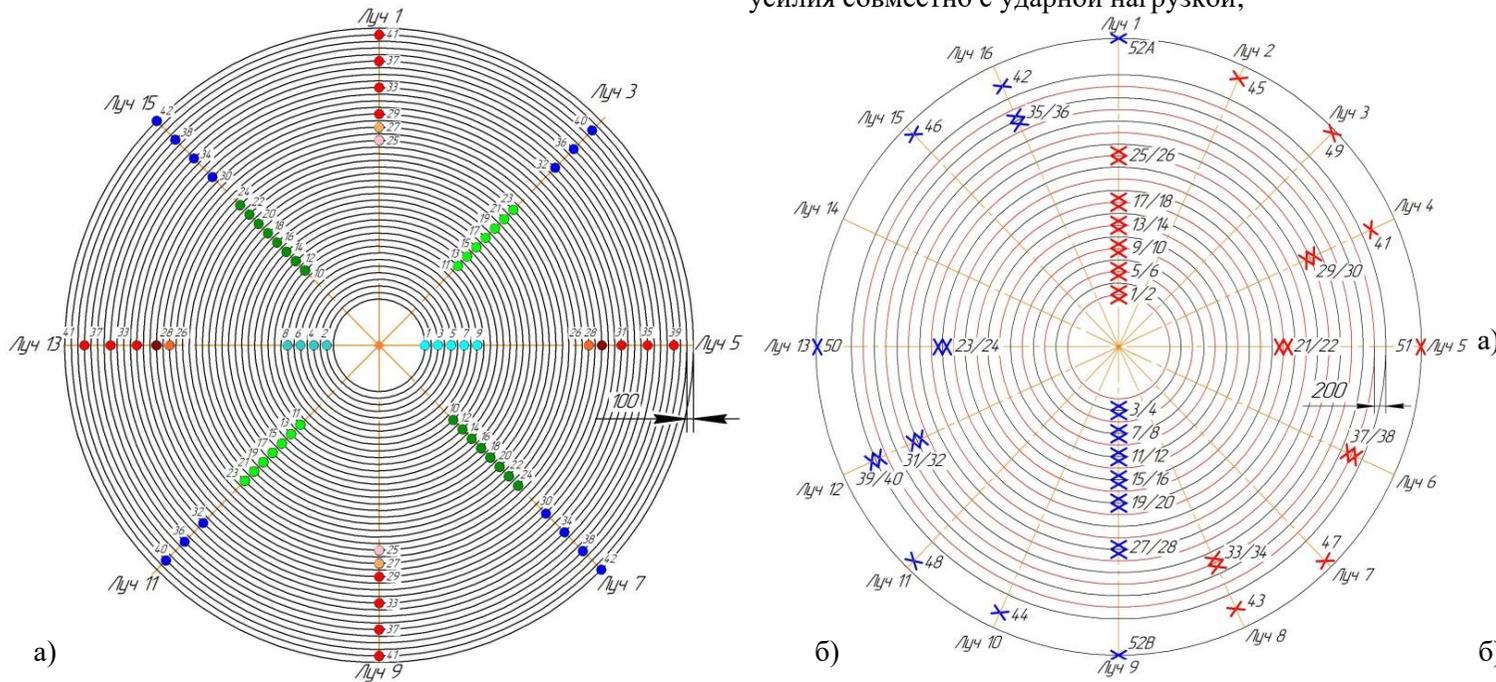


Рисунок 4 - Экспериментальный стенд: а - сборочный чертеж: 1- основание; 2 – образец породы; 3 – подвижная рама; 4 – захват; 5 – перфоратор; 6 – модель шарошки; 7 – штанга; 8 – центрирующая направляющая; б - общий вид; в – модель шарошки



а) б)
 Рисунок 1 - Результаты экспериментальных исследований: зависимости глубины внедрения (а) и объема скола породы (б) от осевого усилия и осевого усилия совместно с ударной нагрузкой;



а) б)
 Рисунок 5 – Схемы расстановки породоразрушающего инструмента: а – резцов; б – шарошек (X – одинарные; XX – двойные; X – одинарные виброактивные; XX – двойные виброактивные)

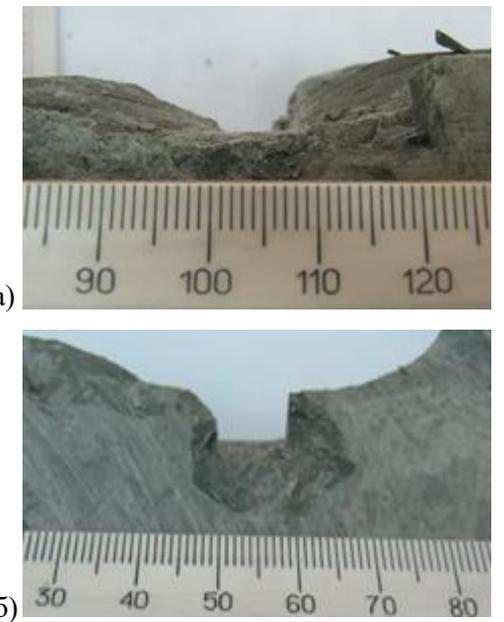


Рисунок 6 – Стадии разрушение кембрийской глины: а – хрупкая; б – пластичная