

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ДРИПАН ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ

УДК 622.281.74.2

**ОБОСНОВАНИЕ БЕЗКЛЕЕВОГО СПОСОБА УСТАНОВКИ
АНКЕРОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ
НАГРУЗКОЙ**

Специальность 25.00.22 – Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Новиков Александр Олегович,
доктор технических наук,
профессор



Идентичность всех экземпляров диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:
Учёный секретарь диссертационного совета Д 01.008.01

д-р техн. наук, доцент



Донецк – 2022.

И.А. Бершадский

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Раздел 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Анализ состояния горных выработок на угольных шахтах.....	11
1.2 Существующие способы и конструктивные решения анкерного за- крепления породных массивов горных выработок	13
1.3 Краткий анализ исследований, посвященных изучению напряженно- деформированного состояния породных массивов, закрепленных ан- керной крепью	22
1.4 Цель и задачи исследований	34
Раздел 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯ- ЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «АНКЕР – ПОРОДНЫЙ МАССИВ» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПА- РАМЕТРОВ	37
2.1 Общая методика и основные методы исследований	37
2.2 Математическая модель устойчивости анкера при закреплении пород- ного массива под действием статической нагрузки	40
2.3 Математическая модель напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – анкер» под действием нагрузки с уче- том волновых процессов	44
2.4 Напряженное состояние породного массива с учетом коэффициента динамичности нагрузки	69
2.5 Выводы по второму разделу	83
Раздел 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАГРУЗОК ПРИ УСТАНОВКЕ И ИЗВЛЕЧЕНИИ АНКЕРОВ В ХОДЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА.....	85
3.1 Методика проведения исследований в лабораторных условиях	85
3.1.1 Методика определения статической нагрузки для закрепления анкера.....	91
3.1.2 Методика определения динамической нагрузки и времени закреп- ления анкера в шпуре	93
3.1.3 Методика определения нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы.....	95

3.2 Результаты лабораторных исследований по определению нагрузок при установке и извлечении анкеров	97
3.2.1 Результаты исследований по определению статических нагрузок для закрепления анкеров	97
3.2.2 Результаты исследований по определению динамической нагрузки и времени закрепления анкера в шпуре	107
3.2.3 Результаты исследований по определению нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы	113
3.3 Выводы по разделу	121
Раздел 4. ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА ПРИ УСТАНОВКЕ И ИЗВЛЕЧЕНИИ АНКЕРОВ	123
4.1 Методика проведения исследований	123
4.2 Результаты шахтных исследований по определению параметров способа при установке и извлечении анкеров	133
4.3 Выводы по главе	139
Раздел 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ	141
5.1 Сопоставление результатов теоретических, лабораторных и шахтных исследований	141
5.2 Разработка технологии реализации способа	147
5.3 Разработка методики расчёта параметров	149
5.4 Внедрение основных результатов работы	153
5.5 Расчёт ожидаемого экономического эффекта от внедрения предлагаемого способа установки анкеров	153
5.6 Выводы по главе	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение А Результаты испытаний моделей по определению статических нагрузок при закреплении анкеров, а также нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при их извлечении	177

Приложение Б	Результаты исследований изменения статической нагрузки в моделях	180
Приложение В	Результаты испытаний моделей по определению времени установки анкеров	184
Приложение Г	Результаты исследований по определению нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы	187
Приложение Д	Схемы крепления боков выработки анкерной крепью	194
Приложение Е	Утвержденная «Методика определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера»	196
Приложение Ж	Справка о внедрении «Методики расчета параметров анкеров...» на шахтах ГУП ДНР «ДУЭК»	197
Приложение К	Утвержденные «Рекомендации по поддержанию подготовительных выработок шахт ГП «ДУЭК», проводимых в соответствии с программой развития горных работ на 2021 год, разработанных на основании методики расчета параметров анкерных породо-армирующих систем»	198
Приложение Л	Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Угольная промышленность – одна из ведущих отраслей народного хозяйства, важнейшая задача, которой в условиях рыночной экономики, состоит в повышении производительности труда и снижении себестоимости продукции. Повысить эффективность работы шахт можно путем совершенствования способов крепления и поддержания выработок за счет применения новых инновационных технических решений. Перспективным направлением, позволяющим улучшить состояние выработок, является использование несущей способности приконтурного массива с помощью анкерной крепи, которая позволяет снизить трудоемкость работ по креплению, улучшить условия труда и повысить технико-экономические показатели добычи угля.

Наибольшее распространение в условиях шахт Донецкого угольного бассейна получили сталеполимерные анкеры, технология установки которых и параметры крепи определяются в соответствии с действующими в отрасли нормативными документами. Однако до 40 % стоимости установки таких анкеров составляют затраты на ампулы с полимерными смолами, с помощью которых анкер закрепляют в шпурах.

В настоящее время в мировой практике строительства и поддержания горных выработок применяется большое количество безраспорных конструкций анкеров, которые не получили широкого применения на шахтах Донбасса. Основными причинами этого являются необходимость изготовления анкеров из высокопрочных упругих сталей, а так же потребность в дорогом дополнительном оборудовании для их установки и высокие требования к культуре производства работ.

В ДОННТУ разработан способ установки анкера большего диаметра, чем диаметр направляющего шпура, с помощью динамической нагрузки, использование которого позволит существенно снизить затраты, в том числе при извлечении после эксплуатации, обеспечить устойчивость выработок и безопасность ведения горных работ.

В связи с этим, исследования, направленные на установление закономерностей взаимодействия горных пород и анкера при его установке динамической нагрузкой в направляющий шпур меньшего диаметра для обоснования области применения и параметров способа установки анкеров, обеспечивающих повышение безопасности ведения горных работ и устойчивости выработок, снижение материальных затрат, является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие представлений о взаимодействии анкерной крепи с вмещающим массивом, в разработку конструкций и технологий возведения крепи внесли ученые и специалисты отечественных и зарубежных научно-исследовательских центров в Австралии, Великобритании, Германии, США, Канаде и ЮАР. Это также работы ученых из стран СНГ – Бабиюка Г.В., Баклашова И.В., Борзых А.Ф., Борисова А.А., Булата А.Ф., Булычева Н.С., Виноградова В.В., Касьяна Н.Н., Кизиярова О.Л., Ковалевской И.А., Махно Е.Я., Новикова А.О., Симановича Г.А., Старикова Г.П., Шашенко А.Н., Широкова А.П., Черняка И.Л., Мельникова Н.И., и ученых зарубежных стран Айзаксона Э., М. Junker, Каммера В., Коста А., Лангоша У., Панека Л.А., Скотта Д., Stilborg В., Фармера Я., Югона А., Якоби О. и многих других.

В них рассмотрены различные конструкции анкеров (в том числе, некоторые безклеевые), технологии их установки и методики расчета параметров.

Анализ литературных источников показал, что исследования, направленные на установление закономерностей взаимодействия горных пород и анкера, устанавливаемого динамической нагрузкой в направляющий шпур меньшего диаметра не проводились. Это не позволяет установить область применения и параметры такого способа установки, сдерживает развитие новых инновационных технологий крепления выработок.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Одним из основных научных направлений кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» ГОУВПО «ДОННТУ» является разработка и совершенствование способов охраны и поддержания горных выработок, обеспечивающих их устойчивое состояние. Диссертация является частью этих исследований и выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем: Д-9-05 «Геомеханическое обоснование средств обеспечения устойчивости горных выработок на разных этапах их эксплуатации» (№ гос. регистрации 0105U002290); Н-10-18 «Усовершенствование способов поддержания выработок глубоких шахт на основе инновационных технологических решений» (приказ № 6-15 от 31.01.2018 г.), а также Н-2019-6 «Обеспечение устойчивости подготовительных выработок на шахтах Донбасса с помощью анкерных породо-армирующих систем» (приказы №8-15 от 31.01.2019 г.; №3-15 от 25.02.2021 г.), в которых автор являлся исполнителем.

Цель и задачи исследований

Цель работы – установление закономерностей взаимодействия горных пород и анкера при его установке динамической нагрузкой в направляющий шпур

меньшего диаметра для обоснования области применения и параметров способа установки анкеров, обеспечивающих устойчивость горных выработок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ существующих способов и конструктивных решений закрепления анкерами породного массива горных выработок угольных шахт;
2. Разработать математические модели, позволяющие оценить устойчивость анкера на начальном этапе его установки, а также закономерности взаимодействия горных пород и анкера при реализации предложенного способа;
3. Выполнить лабораторные и шахтные исследования по определению основных параметров предлагаемого способа;
4. Разработать технологию реализации способа и методику определения его параметров.

Объект исследований – способ установки анкера в горные породы.

Предмет исследований – закономерности взаимодействия горных пород и анкера при его установке динамической нагрузкой в направляющий шпур меньшего диаметра.

Методология и методы исследований. При выполнении диссертационной работы использован комплексный подход, содержащий анализ и обобщение ранее полученных результатов научных исследований в данном направлении; математическое и физическое моделирование напряженно-деформированного состояния при определении устойчивости, прочности анкера и горных пород с учетом волновых процессов, сопротивления в продольном направлении и сил трения по боковой поверхности породного массива с использованием классических основ теории удара – двухмерного решения задачи теории упругости; исследования в лабораторных и шахтных условиях с последующей статистической обработкой данных.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. **Доказано**, что устойчивость сплошного металлического анкера диаметром 22-30 мм и длиной не более 2,5 м, изготовленного из стали марки Ст 4 и выше, устанавливаемого в направляющий шпур меньшего диаметра (коэффициент натяга 1,1-1,3) обеспечивается под действием нагрузки до 100 кН с коэффициентом динамичности, равным двум;
2. Теоретически **установлена** и экспериментально **подтверждена** возможность установки сплошного металлического анкера динамической нагрузкой с энергией удара 45 Дж в направляющий шпур меньшего диаметра (коэффициент

натяга 1,1-1,2), пробуренный на глубину до 1,5 м в породы с прочностью на одноосное сжатие от 20 до 50 МПа. При этом обеспечивается устойчивость горных пород и анкера, его несущая способность составляет от 50 до 150 кН, а время установки – не более 200 с.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что **впервые** установлены:

1. Закономерности и зависимости, описывающие изменение критической нагрузки и эквивалентных напряжений на начальном этапе установки анкера с диаметром большим, чем у направляющего шпура в породный массив под действием статической или динамической нагрузки, учитывающие механические свойства пород и материала анкера, его геометрические размеры, гибкость и глубину закрепления, что позволило обосновать параметры анкера, обеспечивающие его устойчивость.

2. Закономерности, описывающие изменение напряженно-деформированного состояния анкера с большим диаметром, чем у направляющего шпура, при его закреплении в породном массиве под действием статической или ударной нагрузки, учитывающие геометрические размеры анкера и механические свойства материала, контактное давление, скорость распространения акустических волн, сопротивление перемещению анкера в осевом направлении за счет трения по боковой поверхности, массу анкера и ударного устройства для установки, его скорость движения, коэффициент динамичности статической нагрузки. Это позволило определить напряжения и деформации, возникающие в анкере и породах, время установки анкера в массив, требуемую для этого статическую и динамическую нагрузку, параметры ударного устройства и статическую нагрузку, необходимую для преодоления сил трения при извлечении анкера.

3. Зависимости, позволяющие определить изменение статических и динамических нагрузок на анкер при его закреплении в породе, времени его установки, а также статических нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров, от соотношений: диаметров анкера и направляющего шпура, механических характеристик горной породы и материала анкера, глубины установки анкера и его диаметра. Это позволило подтвердить адекватность разработанных математических моделей, обосновать область применения способа и его параметры.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что разработаны и получены:

- математическая модель напряженного состояния анкеров в зависимости от геометрических, механических параметров и материала, которая позволила определить их устойчивость при закреплении породного массива;

- математическая и физическая модели напряженно-деформированного состояния анкера с бóльшим диаметром, чем шпура, а также горных пород с учетом: сопротивлений в продольном направлении, сил трения по боковой поверхности, волновых процессов, статической и динамической нагрузок, которые позволили выбрать параметры ударного устройства для обеспечения надежного закрепления породного массива с точки зрения устойчивости;

- зависимости для определения нагрузок при установке и извлечении анкеров, времени установки от соотношения параметров: диаметра анкера и шпура, модуля упругости горной породы и материала анкера, длины анкера и его диаметра, а также максимальные суммарные напряжения, возникающие в анкере и горных породах;

- методика определения параметров установки анкеров с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера;

- результаты диссертационной работы будут использованы при чтении следующих дисциплин: «Прикладная механика», «Крепление горных выработок», «Способы охраны горных выработок», «Ремонт и погашение горных выработок», а также при выполнении студентами выпускных квалификационных работ.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 205 руб. 28 коп. на один анкер длиной 1,5 м.

Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- корректным использованием основных положений теории устойчивости и удара двух сопряженных тел с учетом волновых процессов при определении деформаций и напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «порода - анкер» при использовании статической и ударной нагрузок;

- использованием метода плоского НДС, теорий упругости и сопряженных тел при определении напряженного состояния горных пород слоистого массива;

- использованием метода многофакторного эксперимента при физическом моделировании в лабораторных условиях;

- результатами исследований в натуральных условиях;

– удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и данных экспериментальных исследований, максимальная погрешность которых не превышает 30 %.

Личный вклад соискателя состоит в формулировании цели и задач исследований, научных положений и результатов исследований, выводов, при разработке математической и физической моделей, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обобщении и систематизации результатов, разработке технологии по повышению устойчивости выработок угольных шахт при закреплении анкерами породного массива под действием нагрузки.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы доложены на: Международной научно-практической конференции «Школа геомеханики» (г. Гливице, Польша, 1999 г.); Практической конференции «Проблемы горной технологии» (г. Красноармейск, Украина, 2012г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве» (г. Донецк, 2016); Международной научно-практической конференции «Современные проблемы развития и совершенствования технологии разработки месторождений полезных ископаемых» в ГОУ ВО ЛНР «ДонГТУ» (г. Алчевск, ЛНР, 1999, 2019, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» (г. Донецк, 2019, 2021 г.); Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (г. Тула, Россия, 2020 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 22 научных изданиях, в том числе: 3 – в рецензируемых специализированных научных изданиях ВАК ДНР; 6 – в рецензируемых научных изданиях; 4 – публикации в других научных изданиях; 2 – патента; 7 – по материалам научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 194 наименований на 18 страницах, 9 приложений на 23 страницах. Работа изложена на 199 страницах машинописного текста, в том числе 146 страниц основной части, содержит 44 рисунка и 24 таблицы.

Автор выражает искреннюю благодарность первому научному руководителю доктору технических наук, профессору Касьяну Н.Н. и кандидату технических наук, доценту Шестопалову И.Н. за ценные советы в процессе выполнения диссертации.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ состояния горных выработок на угольных шахтах

Традиционными источниками энергии в настоящее время являются нефть, природный газ, уголь. Мировое потребление энергии в пересчете на условное топливо составляет 10,6 млрд. тонн в год, из которых 38 % приходится на нефть, 30 % на уголь, 20 % природный газ, 12 % другие источники энергии [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

На территории Донбасса уголь является основным энергоносителем, запасов которого при современном потреблении хватит на 100 лет. Согласно отчету Министерства топлива и энергетики Донецкой Народной Республики, добыча угля в 2015 г. предприятиями всех форм собственности ДНР составила 9 млн. т., в 2016 г. – 12 млн. т., в 2018 г. – 7,4 млн. т. [8, 9].

Техническое же оснащение очистных и подготовительных забоев в настоящее время не соответствует современным требованиям. На 10 из 18 угольных шахтах ДНР работает по одному очистному забою, что приводит к высокой стоимости угледобычи [10, 11]. Кроме того, в связи с увеличением глубины разработки и усложнением горно-геологических условий отработки шахтопластов, протяжённость выработок, находящихся в неудовлетворительном состоянии, ежегодно увеличивается. Повышение глубины разработки составляет, в среднем, 17-19 м/год [12].

В среднем, на одной шахте Донбасса поддерживается около 50 км горных выработок. До 30% из них не соответствуют требованиям ПБ и ПТЭ и нуждаются в ремонте.

Данные об объемах применения различных видов крепи в выработках шахт [13] представлены на рисунке 1.1.

Динамика изменения состояния выработок, закрепленных выше названными видами крепи за последние 7 лет, представлена данными в таблице 1.1.

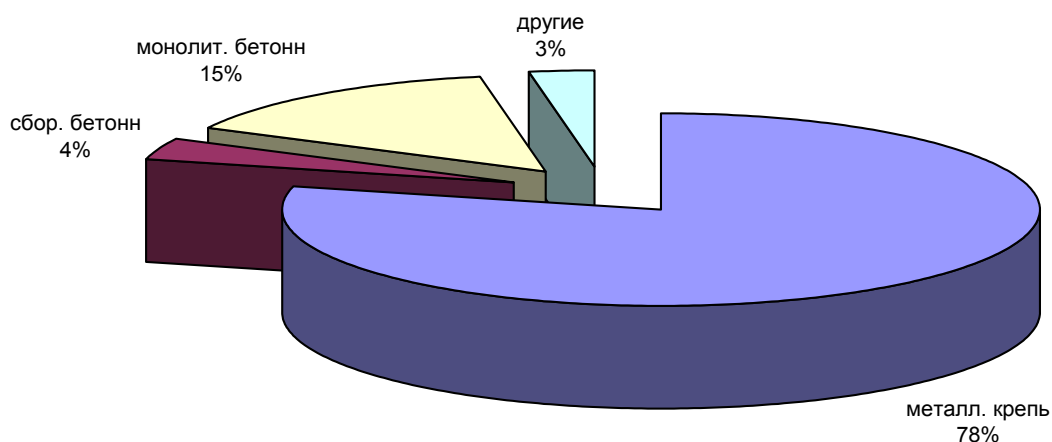


Рисунок 1.1 – Объемы применения различных видов крепи в действующих выработках ГУП «ДУЭК» по состоянию на 2020 год.

Таблица 1.1 – Протяженность выработок, закрепленных различными видами крепи на шахтах ГУП «ДУЭК», находящихся в неудовлетворительном состоянии

Год	Тип крепи			
	Металлическая	Сборная бетонная	Монолитная бетонная	Другие
2014	36,4	17,2	10,9	35,5
2017	39,2	18,3	12,9	29,5
2018	40,5	18,3	13,5	27,7
2019	42,2	18,3	12,5	27,0
2020	41,9	18,3	12,7	27,1

Как видно из данных, представленных в таблице 1.1, за период с 2014 по 2020 годы протяженность выработок, находящихся в неудовлетворительном состоянии увеличилась на 1,1–5,5 %.

Следует отметить, что стоимость ремонта 1 п.м. выработки составляет от 70 до 130 % от стоимости ее проведения. Работы по ремонту практически немеханизированы и высоко травмоопасны.

Статистические данные о травматизме в угольной отрасли (рис. 1.2), показывают, что 31,4 % несчастных случаев происходят от обрушений горных пород в забойной части протяженных выработок при ведении подготовительных работ из-за несвоевременной установки или отсутствия временного крепления. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы на угольных шахтах является

установка анкерной крепи сразу после выемки породы в забое. Технологичность и высокий уровень механизации ее возведения позволяют повысить в 2–3 раза темпы ведения работ и обеспечить высокий уровень безопасности производства.

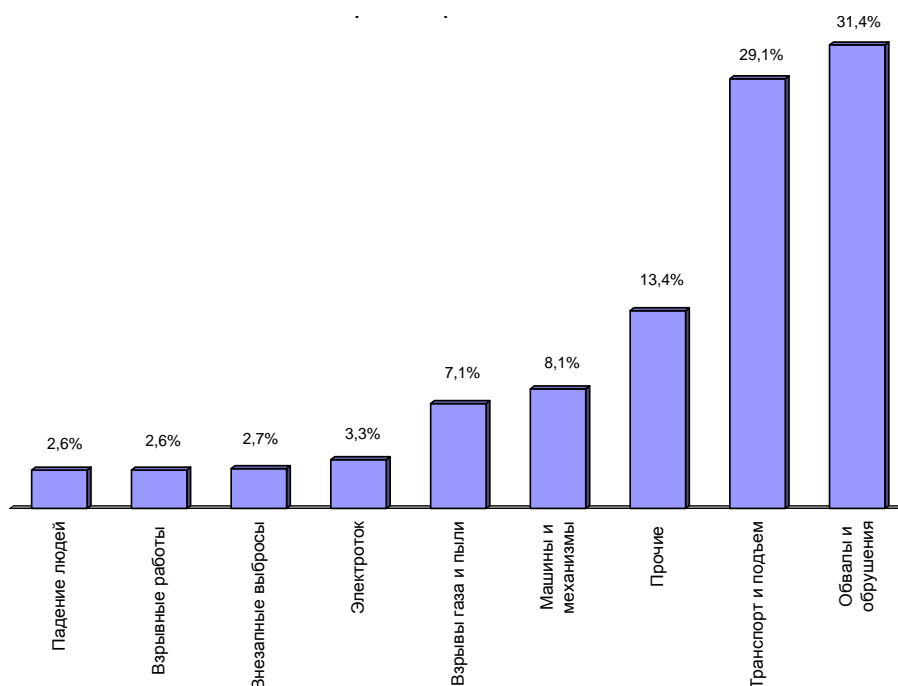


Рисунок 1.2 – Причины производственного травматизма на угольных шахтах

Проведенный анализ состояния горных выработок на угольных шахтах показал, что проблема повышения их устойчивости до настоящего времени полностью не решена и требует создания и внедрения эффективных конструкций крепи и средств механизации её возведения в подготовительных выработках. Перспективным направлением, позволяющим улучшить состояние выработок, снизить материалоёмкость крепи, повысить темпы проведения выработок, является применение анкерной крепи в качестве временной, либо как элемента комбинированной крепи.

1.2 Существующие способы и конструктивные решения анкерного закрепления породных массивов горных выработок

Несмотря на долгую историю развития и большой опыт промышленного использования для крепления выработок в шахтах ведущих угледобывающих стран мира, анкерная крепь не нашла широкого применения в отечественной

практике. Это объясняется отчасти более сложными по сравнению с США, Англией и Австралией горно-геологическими условиями отработки месторождений, а также непониманием роли анкерной крепи в процессе поддержания выработки.

В настоящее время на угольных шахтах за рубежом происходит неуклонное увеличение объемов применения анкерного крепления, доля которого составляет: Австралия – 87 %, КНР – 83 %, США – 52 % [14, 15, 16]. Это позволяет в 5-10 раз уменьшить расход металлопроката, бетона и леса; в 3-5 раз повысить производительность работ при креплении выработок; в 2-3 раза повысить темпы проходки; вдвое сократить затраты на крепление и поддержание крепи в рабочем состоянии в период эксплуатации. Для внедрения анкерной крепи на шахтах Донбасса была создана программа «Анкер» и создан Центр анкерного крепления. Специалисты центра разработали общие технические требования для системы обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением, а ГП «ДонУГИ» создал конструкторскую документацию на изготовление компонентов материально-технических средств системы. Несмотря на это, объем крепления выработок с использованием анкерных крепей и систем на отечественных шахтах в настоящее время не превышает 2 %.

Большой вклад в развитие представлений о взаимодействии анкерной крепи с вмещающим массивом, в разработку конструкций и технологий возведения крепи внесли ученые и специалисты отечественных и зарубежных научно-исследовательских центров Австралии, Великобритании, Германии, США, Канады, ЮАР и стран СНГ. Это работы Бабиюка Г.В., Баклашова И.В., Борзых А.Ф., Борисова А.А., Булата А.Ф., Булычева Н.С., Виноградова В.В., Глушко В.Т, Ерофеева Л.М., Зорина А.Н., Касьяна Н.Н., Кизиярова О.Л., Ковалевской И.А., Махно Е.Я., Новикова А.О., Питаленко Е.И., Симановича Г.А., Старикова Г.П., Шашенко А.Н., Широкова А.П., Толпанкороева А.Т., Черняка И.Л., Чукана В.К., Мельникова Н.И., Ткачева В.А., Усаченко Б.М., Айзаксона Э., M. Junker, Камера В., Коста А., Лангоша У., Mark С., Middendorf Н., Molinda G., Ополони К., Панека Л.А., Скотта Д., Stankus J., Stilborg В., Фармера Я., Югона А., Wang Z., Якоби О. и многих других.

Опыт применения анкерной крепи и существующие представления о ее работе можно обобщить в виде следующих основных схем:

Первая схема – формирование из слоистых пород грузонесущей конструкции (сшивка) основана на представлении, что создаваемая в кровле выработки породо-анкерная плита является несущей конструкцией. При этом, скрепляемые анкерами породы испытывают сжатие, а сами анкеры – растяжение. Эта схема была предложена Якоби [17] и была развита в работах Семевского [18], Панака [19, 20, 21], Тимофеева [22, 23, 24], Борисова [25, 26, 27] и многих других [28, 29]. К первой группе схем можно отнести также опорно-анкерное крепление [30].

Вторая схема – подшивка, основана на том, что часть не устойчивых пород, в пределах формирующейся зоны неупругих деформаций (свода обрушения) вокруг выработки прикрепляются анкерами к более устойчивым породам за ее пределами. Впервые она была предложена Ф. Баки и развита в дальнейшем Л. Рабцевичем, Б.К. Чуканом, А.П. Широковым и др. [31, 32, 33, 34].

Схема подшивки до сих пор имеет множество сторонников, что объясняется ее доступностью и простотой определения параметров анкерования. Однако схемы сшивки и подшивки имеют ряд существенных недостатков:

1. Рассматривается только часть пород непосредственно в кровле или боках выработки, при этом не учитывается наличие зоны неупругих деформаций.

2. Не учитывается роль, закрепленных анкерами пород в предотвращении смещений на контуре выработки.

3. Невозможно применять анкера при размерах ожидаемых обрушений более 2 м, или при отсутствии на указанном расстоянии прочных пород основной кровли.

Третья схема обеспечивает предотвращение отдельных вывалов пород кровли (механическое укрепление) и применяется в условиях прочных, но трещиноватых вмещающих пород как способ их локального укрепления [29]. К ее недостаткам следует отнести сложность получения достоверной информации о параметрах трещиноватости вмещающих выработку пород, а, следовательно, и о нагрузках, на которые следует рассчитывать анкерную крепь.

Четвертая схема – энергетического взаимодействия породного массива с анкерной крепью. Она основана на представлении, что в результате перераспределения напряжений в массиве, вызванного проведением выработки, высвобождается потенциальная энергия, расходуемая на деформирование и разрушение пород, а также на преодоление сопротивления крепи, играющей роль энергетического компенсатора [35, 36, 37, 38]. Схема не нашла практического применения из-за необходимости проведения в каждом конкретном случае значительного объема дополнительных исследований, с целью получения входных параметров для расчета анкерной крепи.

Пятая – экспериментально-аналитическая схема взаимодействия анкерной крепи и массива [39, 40, 41, 42, 43], [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50] основана на научном анализе многолетнего производственного опыта применения анкерного крепления на угольных шахтах [51, 52, 53, 54, 55], [56, 57, 58, 59, 61, 62, 63]. Исследователями достигнуто понимание того, что устойчивость породных обнажений, закрепленных анкерной крепью, определяется глубиной анкерования, плотностью установки штанг, сцеплением анкеров с породой, а также другими важными параметрами. В основу положен эмпирический подход, позволяющий как аналитически [64, 65, 66, 67, 68], [69, 70, 71, 72, 73], так и экспериментально [74, 75, 76, 77, 78, 79, 80] прогнозировать устойчивость выработок с анкерным креплением и рассчитывать его параметры, обеспечивающие отсутствие обрушений пород в различных горно-геологических и горнотехнических условиях поддержания выработок.

Все вышеуказанные схемы работы анкерной крепи не учитывают ее влияние на геомеханические процессы, происходящие во вмещающей выработку массиве, и не позволяют достоверно оценить роль крепи в процессе поддержания выработки. Они не объясняют, в результате чего формируется нагрузка на крепь, что не позволяет обосновано разработать метод расчета ее параметров.

Рассмотрим основные конструкции анкеров, применяемых в горнодобывающей промышленности. Несмотря на их разнообразие, все они могут быть систематизированы в две большие группы: **замковые**, то есть закрепленные в скважине специальным устройством (замком) и **беззамковые**, закрепляемые за счет контакта с породными стенками скважины по всей ее длине. В качестве несущих

элементов применяются стержни из металла и синтетических материалов, канаты. В практике подземного строительства встречаются также смешанные конструкции, представляющие комбинацию замковых и беззамковых анкеров.

Замковые анкеры подразделяются на клинощелевые, распорные и безраспорные.

Анкеры с клинощелевыми замками состоят из стального стержня диаметром от 22 до 25 мм, натяжной гайки и опорной плиты. На замковом конце стержня делается прорезь шириной от 2 до 4 мм, длиной 150-200 мм, в которую при установке анкера вводят клин, а на противоположном конце нарезают резьбу под натяжную гайку на участке длиной от 120 до 150 мм. Щелевой конец стержня и клин составляют замок. В породах с коэффициентом крепости $f = 5 \div 8$ несущая способность анкера достигает 150 кН.

Достоинством этого типа анкеров является их простота, значительная несущая способность, невысокая стоимость. К недостаткам следует отнести сравнительно узкий диапазон пород, в котором возможно их использование, невозможность повторного использования, высокие требования к качеству бурения скважин, низкая устойчивость к буровзрывным работам.

Анкеры с распорным замком состоят из круглого стального стержня диаметром от 16 до 22 мм со специальной распорной головкой конусного или клинового типа, двух рифленых полумуфт, опорной плиты и натяжной гайки. Перед установкой анкера полумуфты накладывают на распорную головку и соединяют резиновым кольцом. На стержень монтируют установочную трубу и с ней анкер вводят в скважину. Ударами по концу установочной трубы полумуфты сдвигают вверх. Они раздвигаются и внедряются в стенки скважины, обеспечивая зацепление.

Ряд конструкций распорных головок (АК-8 и АК-9) КузНИУИ и (ШК-3) ВНИИГидроуголь и ИГД им. А.А. Скочинского допускает установку анкера без помощи установочной трубы.

Распорная самозаклинивающаяся головка АД-1 конструкции ДонУГИ состоит из двух клиньев, имеющих со стержнем резьбовое соединение, и приваренной к клину гайки. При установке анкера клин с гайкой навинчивают на верхний

конец стержня, а другой клин прикладывают к стержню и с помощью установочной трубы вводят анкер в скважину. Ударяя по ней надвигают нижний клин на верхний; расклинивая замок. Окончательно анкер раскрепляют натяжной гайкой.

Для рассмотренных конструкций распорных анкеров несущая способность АР-2 составляет от 70 до 80 кН в породах, АК-8 – 100 кН, а АК-86 АК-8с и АК-9 – от 120 до 180 кН.

Достоинством распорных анкеров по сравнению с клинощелевыми является возможность применения в слабых породах ($f < 4$), частичного или полного извлечения из скважин, установки в скважинах, диаметр которых на 8-16 мм превышает диаметр замка, причем в любой точке скважины. Стоимость одного распорного анкера с распорным замком выше, чем клинощелевого. Анкеры со взрыво-распорным замком конструкции ЛГИ состоят из металлического круглого стержня и навинчивающейся пустотелой цилиндрической головки. Диаметр стержня 20-25 мм, диаметр головки 38-40 мм. В головку помещают от 20 до 40 зарядов ВВ массой 20-40 г, в результате взрыва заряда диаметр головки увеличивается и анкер закрепляется в породе. Эта конструкция эффективна в мягких породах и для борьбы с пучением пород почвы.

Распорные анкера характеризуются низкой устойчивостью к взрывным работам и другим динамическим нагрузкам, развитие которых возможно в аварийных ситуациях.

К анкерам с безраспорными замками относят железобетонные и сталеполимерные анкера, закрепляемые только в замковой части скважины. Данный вариант закрепления широкого распространения не получил.

К группе беззамковых относят железобетонные, сталеполимерные, канатные и винтовые анкера.

Закрепление породных массивов беззамковыми конструкциями анкеров осуществляют специальными смесями на основе минеральных и синтетических составов, которые подаются в шпуровые нагнетанием или в капсулах (патронах), представляющих собой легко-разрушающуюся оболочку, в которой размещены обособленные капсулы с вяжущим составом и отвердителем. Альтернативу этому

способу составляют анкеры, закрепляемые минеральными заполнителями, в качестве исходного материала могут использоваться речной песок, отходы обогащения или доменного производства, буровая мелочь и т.п. Пластификатором служит вода или водный раствор.

Железобетонный анкер состоит из стального стержня (чаще периодического профиля), цементно-песчаного раствора, нагнетаемого в шпур, уплотняющего кольца и натяжной гайки. Такие анкеры способны воспринимать нагрузку только через 10-12 ч, что ограничивает область их применения.

Сталеполимерные анкеры представляют собой стальной стержень, закреплённый по всей длине шпура заполнителем из быстротвердеющих смесей на основе цементов или синтетических смол.

Например, для закрепления анкера АКЦ применяют патроны, состоящие из оболочки с двумя отделениями, в одном – цементно-песчаная смесь, а в другом – жидкое стекло. При установке анкера в шпур вводят 2,3 патрона и досылают до забоя стержнем. При вращении стержня патроны разрушаются, цементно-песчаная смесь перемешивается с жидким стеклом, схватывается и анкер закрепляется. Через 2-3 часа можно производить предварительное натяжение. Несущая способность анкера – 150 кН.

Канатные анкеры, благодаря их гибкости, применяются чаще всего в случаях, когда необходимо упрочнить породы на глубину, превышающую поперечные размеры горной выработки.

Винтовой анкер конструкции ИГД им. А.А. Скочинского представляет собой стержень с резьбой специального профиля, имеющей наружный диаметр на 4-5 мм больший, чем диаметр скважины. Завинчивают анкер в скважину бурильной машиной, при этом его резьба внедряется в стенки скважины на 2–3 мм, чем и обеспечивается закрепление анкера.

К числу перспективных и сравнительно новых разработок следует отнести трубчатые конструкции анкеров – гидрораспорного, взрывного и пружинного закрепления [81, 82]. Их закрепление в породах происходит без применения вяжущих составов, за счет сцепления силами трения тела анкера со стенками шпура.

Известна анкерно-пневматическая крепь, предназначенная для временного крепления забоя выработок, в условиях слабых глинистых пород [83]. Разработаны, испытаны в шахтных условиях и освоены в производстве армированные стеклопластиковые трубчатые анкера с механическим клиновым или комбинированным закреплением в шпуре.

В соответствии с современными понятиями жесткие анкеры следует классифицировать как «ограниченно податливые». В то же время для выработок с большой ожидаемой конвергенцией необходимы податливые анкера. В этой связи разработаны «скользящие» анкера, допускающие критическую конвергенцию от 30 до 50 % высоты выработки в проходке, и податливые анкера с величиной податливости до 550 мм, при этом обеспечивающие несущую способность до 150 кН [84, 85, 86].

Беззамковые анкеры обладают преимуществами перед замковыми, главным из которых является способность воспринимать нагрузки, практически, сразу после их установки. Так, через 1 ч после установки они набирают 50 % несущей способности, а через 4 ч – 85 %. Кроме этого, они, обеспечивают высокую несущую способность и практически не деформируются, вплоть до возрастания нагрузки до предельного значения. Их установка отличается большей степенью механизации и меньшей трудоемкостью.

Таким образом, беззамковые анкера (устанавливаемые без связующих составов и механических замков) представляют собой высокоэффективную конструкцию анкерной крепи, которую можно совершенствовать, применяя инновационные технологические решения и технологии их установки.

Все известные способы закрепления выработок анкерной крепью можно условно разделить на три группы.

К *первой* относятся способы, основанные на использовании замков различной конструкции, которые распираются в шпуре при вращении анкера. Их несущая способность составляет от 20 до 60 кН при времени установки 2-3 мин. Этот тип анкеров сложен в изготовлении. Анкера нельзя использовать повторно.

Ко *второй* группе относятся способы, предусматривающие использование вяжущих материалов. При этом анкер закрепляют на некотором участке или по

всей длине. Несущая способность составляет от 50 до 150 кН. Время установки 3-5 мин. Однако, время вступления в работу анкера зависит от времени схватывания связующего состава. А также до 50 % от стоимости анкера они составляют на вяжущие материалы.

Третью группу представляют способы, в которых закрепление анкера производят без связующих составов и механических замков – беззамковые способы. В этом случае установку анкера производят за счет использования естественного деформирования пород по контуру шпура (анкера типа «Свеллекс» и «Сплит-Сет»). Такие конструкции анкеров, способы и их технология закрепления в горных выработках описаны в работах [87, 88]. Известны способы, при которых металлические анкеры устанавливают в статическом режиме. Они являются более перспективными с точки зрения затрат на установку анкерной крепи.

Однако эта группа имеет следующие недостатки:

- сложность конструкции анкера, следовательно, более высокая стоимость;
- необходимость наличия дополнительного оборудования для его установки в забое;
- необходима подготовка более квалифицированных рабочих и «культура» производства.

В настоящее время наибольшее распространение в условиях шахт Донецкого угольного бассейна получили сталеполимерные анкеры, технология установки которых и параметры крепи определяются в соответствии с действующими в отрасли нормативными документами [89, 90, 91]. Однако до 50 % стоимости установки таких анкеров составляют затраты на ампулы с полимерными смолами, с помощью которых анкеры закрепляют в шпурах.

В ГОУВПО «ДОННТУ» предложен и запатентован способ установки стального анкера в направляющий шпур меньшего диаметра с помощью динамической нагрузки, который принципиально отличается от вышеприведенных способов [92, 93]. При этом, происходит упругое деформирование тела анкера и окружающего его массива пород. А закрепление анкера осуществляется за счёт возникающих сил трения между поверхностью анкера и породным массивом по контуру шпура.

1.3 Краткий анализ исследований, посвященных изучению напряженно-деформированного состояния породных массивов, закрепленных анкерной крепью

Наличие различных конструкций анкеров, схем взаимодействия крепи с породным массивом и разнообразие горно-геологических условий, в которых они применяются, привело к возникновению большого числа методик расчета ее параметров. В зависимости от этих факторов все известные методики можно разделить на пять групп:

- **первая** – методики, позволяющие определить параметры крепи, с использованием основных положений сопротивления материалов и строительной механики;
- **вторая** – методики, учитывающие влияние крепи на напряженно-деформированное состояние вмещающих горную выработку пород;
- **третья** – методики, направленные на сохранение энергетического баланса в системе «крепь-массив»;
- **четвертая** – методики, позволяющие получить расчетные формулы с помощью физического и математического моделирования;
- **пятая** – методики, основанные на инженерном анализе и обработке данных экспериментальных исследований с помощью теории вероятности и математической статистики.

К основным расчетным параметрам анкерной крепи относятся: диаметр анкерной штанги, ее активная длина, усилие начального натяжения, несущая способность анкера, плотность установки анкеров и параметры, характеризующие схему их расположения.

В классических работах по анкерному креплению [34], относящихся к **первой группе**, несущая способность сталеполимерных анкеров определяется меньшей из величин: прочность анкера на разрыв, прочность закрепления стержня анкера в скрепляющем растворе и адгезия скрепляющего раствора со стенками шпура.

Длина анкера для крепления кровли выработки при этом складывается из величины заглубления анкеров за контур возможного вывала пород (0,3-0,4 м), высоты возможного вывала и длины части анкера, выступающего за контур выра-

ботки. Расстояние между анкерами в ряду и расстоянием между рядами анкеров определяются площадью кровли поддерживаемой одним анкером. За искомое расстояние между анкерами в поперечном сечении и вдоль продольной оси выработки принимается наименьшая величина из трех рассчитываемых значений, определяемых по несущей способности анкера, по устойчивости породного контура между анкерами, или из условия образования породного свода.

В работе [94] расчет анкерной крепи выполняется в следующей последовательности.

1. Первоначально определяется прогнозируемая глубина отжима горных пород, а затем ожидаемая глубина расслоения пород по нормали к их напластованию.

2. Определяются нагрузки на анкерную крепь. Анкерная крепь, по мнению автора, воспринимает с одной стороны нагрузку, обусловленную прогибом и расслоением нависающих слоев, а с противоположной стороны давление, вызванное пучением подстилающих слоев.

3. Несущая способность анкера определяется по наименьшему значению прочности закрепления замка анкера или разрывного усилия стержня.

4. Длина анкеров определяется графически по размерам деформируемой части массива вокруг выработки.

5. Шаг установки анкеров определяется из расчета восприятия анкерами возникающей нагрузки, и зависит от соотношения действующих сил и несущей способности анкера. Среднее расстояние между анкерами в ряду рекомендуется принимать от 0,7 до 1,5 м.

А.А. Борисов [25, 26, 27] основывает расчет параметров крепи на представлении о разрушении трещиноватых пород в кровле выработки с образованием трех шарнирных арок. При расчетах длина анкеров принимается не менее 1,5 высоты возможного обрушения, а расстояние между анкерами для сводчатой формы выработки определяется по формуле:

$$a \leq \sqrt{\frac{R}{n \cdot \gamma \cdot \ell}}, \quad (1.1)$$

где a – расстояние между анкерами, м;
 R – прочность закрепления анкера в шпуре, Н;
 n – коэффициент запаса;
 γ – объемный вес пород, Н/м³;
 ℓ – длина анкера, м.

По А.А. Борисову, работа анкеров сводится к скреплению между собой породных блоков, что препятствует разрушению 3-х шарнирных арок.

В работах Лидера В.А., Пислякова Б.Г., Коскова И.Г. [95] и Мельникова Н.И. [29] и др. длина анкеров принимается больше высоты возможного обрушения пород на величину заглубления замка, а плотность их установки определяется прочностью закрепления анкера в породе.

Л. Рабцевич [96] предлагает метод расчета анкерной крепи, основанный на допущении, что в кровле выработки образуется свод разрушения, высота которого равна половине расстояния от забоя до ближайшего к нему ряда анкеров. Основной расчетной величиной в его методике является расстояние между анкерами a , определяемое из выражения:

$$a^2 = \frac{P_n}{k \cdot \gamma \cdot \ell_a} \quad (1.2)$$

где P_n – несущая способность анкера, кН;
 k – коэффициент запаса;
 γ – объемный вес пород, т/м³;
 ℓ_a – активная длина анкера, м.

Для условий средне-трещиноватых пород, при сводчатой форме поперечного сечения выработки, когда в кровле образуется свод разрушения, Б.К. Чуван [97] предложил методику расчета параметров анкерной крепи, основанную на гипотезе М.М. Протодряконова. Для определения длины анкеров и расстояния между ними применены положения статики сооружений, для расчета арочной крепи. Расстояние между анкерами определяется из условия отсутствия обрушения пород между соседними анкерами.

Аналогичная методика изложена в работах А.С. Курисько [98]. Для однородных или тонкослоистых трещиноватых пород значительной мощности, с крепостью от 1,5 до 4. Он рекомендует принимать активную длину анкеров равной удвоенной высоте свода обрушения по проф. М.М. Протодьяконову. При крепости пород кровли выше средней, активная длина анкера принимается не менее четверти ширины выработки по кровле, а расстояние между анкерами – не более семидесяти процентов от активной длины анкера.

Для случая, когда в кровле залегают слабые породы небольшой мощности, а выше – прочные породы основной кровли, Е.Я. Махно [99] предлагает следующую методику расчета крепи:

1. Определяется расстояние между анкерами из условия восприятия ими веса пород непосредственной кровли;
2. Определяется допустимое расстояние между анкерами по несущей способности наиболее слабого нижнего слоя, возможность отслаивания которого наибольшая;
3. Рассчитывается прочность закрепления анкера, которая должна быть не менее прочности анкера на разрыв.
4. Определяется длина стержня анкера, которая складывается из мощности пород непосредственной кровли, глубины заделки анкера в основную кровлю и размера контурного замка.

В работах проф. Viron и Arioglu [100] предлагается использовать при расчете крепи фактор безопасности (SF), учитывающий одновременное действие на анкер веса подшиваемых пород, сил трения, возникающих между анкером и породой, а также проекции продольных сил, действующих на анкер. Для достижения укрепляющего эффекта, анкер должен быть заглублен в породы основной кровли не менее, чем на 9 дюймов.

В работах проф. Хиу [101], при расчете предельных деформаций на изгиб многослойной несущей балки из пород непосредственной кровли предложено учитывать мощности и модули упругости всех слагающих балку слоев.

При механическом укреплении анкерами разбитых наклонными трещинами

пород кровли, проф. Peng предлагает определять максимальное продольное усилие в анкере (σ_b) по формуле:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_p \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi)}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1.3)$$

где σ_p – горизонтальное давление;

α – угол наклона трещин в породах к горизонту;

φ – угол внутреннего трения пород.

Для условий слоистых не трещиноватых пород слои пород в кровле выработки, соединенные анкерами, В.Н. Семевский рассматривает как составную балку с заземленными концами, нагруженную поперечной равномерно распределенной и продольной сжимающей нагрузками.

Немецкий ученый В. Гетце [102, 103, 104] и его ученики видят роль анкеров в создании кольцевой крепи высокого сопротивления, быстро воспринимающей нагрузку. Анкеры, при этом, выполняют функцию предотвращения обрушений, вызванных образованием трещин в породном массиве над кровлей и в боках выработки.

Рассмотренные выше методики не учитывают взаимодействие крепи с вмещающим массивом, чем и объясняется несоответствие результатов расчетов и фактических данных.

Во второй группе методик делается попытка учесть влияние анкерной крепи на напряженно-деформированное состояние вмещающих пород.

В работах проф. Gerrard [105] доказана возможность повышения устойчивости пород кровли за счет предварительного натяжения анкеров, позволяющих создать в приконтурных породах зону сжатия. Этот способ получил название «опорно-анкерное крепление» [106, 107]. Задача анкерной крепи состоит в том, чтобы перевести вмещающие породы из менее устойчивой категории, в I категорию.

Концепция опорно-анкерного крепления имеет в своей основе британскую технологию скоростного крепления выработок [108]. Действие анкера по этой

технологии направлено на повышение сопротивления сдвигу у пород кровли. За счет этого, предотвращается перераспределение напряжений вокруг выработки, которое может привести к обрушению кровли. Измерение напряжений в породах производится при помощи ультразвукового экстензометра, установленного в шпуре.

В своих монографиях В.В. Виноградов [107] дает оценку анкерной крепи как средства управления состоянием пород приконтурной зоны выработки. Установка анкеров изменяет распределение напряжений в приконтурной зоне. На контуре выработки компоненты радиальных (σ_r) и тангенциальных (σ_Θ) напряжений будут равны:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= P_b, \\ \sigma_\Theta &= 2 \cdot \gamma \cdot H - P_b \cdot \frac{r_H - 1}{r_H + 1},\end{aligned}\quad (1.4)$$

где P_b – давление, создаваемое натяжением анкеров на внутреннюю границу породной оболочки, Па ($P_b = F_a / 2\pi R_0 a$);

a – расстояние между рядами анкеров, м;

r_H – внешний радиус армированной породной оболочки, м ($r_H = 1 + \ell_a$);

ℓ_a – относительная длина анкера, $\ell_a = l/R_0$.

Методика расчета параметров анкерной крепи, основанная на положениях теории сжатия пород кровли взята также за основу в работах Ж. Талобра, Р. Квапила, А. Югона и А. Коста [109, 110]. Согласно методике, работа анкерной крепи сводится к сжатию скрепляемой толщи пород и предотвращению возникающих в ее нижних слоях растягивающих напряжений. Если сразу же после выемки горной массы установить анкерную крепь, сжав породы усилием, равным предварительному натяжению анкеров развитие растягивающих напряжений прекратится, и разрушение пород на контуре выработки не произойдет.

Ж. Талобр [109] считает, что при установке анкеров в массиве создаются дополнительные напряжения, которые вызывают образование несущего кольца. Анкерная крепь создает радиальное сжатие в слое горной породы, толщина которого примерно равна длине анкера.

А. Югон, А. Кост [110] выделяют два случая применения анкерной крепи:

1. Анкеры устанавливаются до образования вокруг выработки зоны пониженных напряжений.

2. Анкеры устанавливаются после или во время понижения напряжений.

При этом авторы рекомендуют стремиться к первому случаю.

Работа анкеров сводится к образованию зоны сжатия в породе на глубину. Таким образом, вокруг выработки или над ней образуется кольцевая зона. Сжатие пород в этой зоне увеличивает их сопротивление возникающим усилиям.

Длина анкера при этом должна быть больше зоны распространения тангенциальных напряжений. Следует стремиться к большей длине анкеров, не превышающей допустимых пределов.

Согласно методике, разработанной немецким ученым Х.О. Лютгендорфом [17], при анкерном креплении образуется несущий свод из приконтурного породного массива, работающих на растяжение радиально расположенных анкерных штанг. Эффективная толщина подобного комбинированного несущего свода d равна длине анкеров ℓ за вычетом расстояния между анкерами e :

$$d = \ell - e. \quad (1.5)$$

Действующие на анкерные штанги растягивающие усилия A создают равномерно-распределенное радиальное напряжения σ_r в пределах породной оболочки толщиной d :

$$\sigma_r = A/e^2. \quad (1.6)$$

Предполагается, что несущая способность массива возрастает на величину $\Delta\sigma_1$ в направлении, перпендикулярном к направлению наименьшего главного напряжения, созданного дополнительным напряжением сжатия: $\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_r$; $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3 = a_1\Delta\sigma_r$. При увеличении радиального напряжения на $\Delta\sigma_r$ тангенциальное напряжение возрастает на величину $\Delta\sigma_t$, а именно в a_1 раз:

$$a_1 = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \rho/2). \quad (1.7)$$

Несущая способность породной оболочки зависит от угла внутреннего трения – ρ , несущей способности анкера – N , его длины – ℓ , расстояния между анкерами – e и эквивалентного радиуса выработки – r_0 .

Методика расчета параметров анкерной крепи О. Натау и В. Ляйхница [17, 111] основана на установленной зависимости прочности породных образцов от показателя гибкости λ . Под показателем гибкости понимается отношение между высотой образца и его диаметром. Установлено, что прочность образцов на одноосное сжатие возрастает по экспоненциальной зависимости при уменьшении λ :

$$\sigma_d / \beta_d = 1 + B\lambda - n, \quad (1.8)$$

где σ_d – прочность образца на одноосное сжатие при $\lambda \neq 1$;

β_d – то же, при $\lambda = 1,0$;

B, n – коэффициенты, $B \leq 1,0$, $n > 1,0$.

В монографии В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевской, Г.А. Симановича и В.В. Поротникова [112] описаны геомеханические процессы взаимодействия трубчатого взрыво-распорного анкера ТА1 с породным массивом, представленным крепкими и средней крепости горными породами. Освещены особенности исследования динамического деформирования системы «трубная заготовка – порода», определения напряженного состояния системы «трубчатый анкер ТА1 – порода» при статическом взаимодействии с породными стенками шпура. Описан метод расчета параметров трубчатого анкера ТА1 и особенности его внедрения.

Изучением отдельных вопросов, связанных с проектированием анкерного крепления для выработок угольных шахт США и Канады занимались многие исследователи. Так, обоснованию областей применения анкерной крепи посвящены работы [48, 55, 58, 64, 68, 70, 73], [113, 114, 115, 116, 117, 118, 119], геометрических размеров анкеров – [78, 80, 100, 117], [120, 121, 122, 123, 124], [125, 126, 127, 128, 129, 130], [131, 132, 133, 134, 135], схем расположения анкеров – [20, 60], [136, 137, 138, 139]. Методики расчета усилий предварительного натяжения анкеров предложены в работах [44, 120, 140].

Отдельно можно выделить группу исследователей [22, 141], которые видят роль анкерной крепи в упрочнении боковых пород.

По мнению Н.А. Вагина [142], анкеры повышают сопротивляемость боковых пород действующим на контуре выработки напряжениям. Поэтому они должны располагаться соответственно характеру распределения напряжений вокруг выработки.

Третья группа методик направлена на сохранение энергетического баланса в системе «крепь-массив».

В своих работах А.Т. Топалкароев [35, 36, 37] предложил рассматривать совместную работу крепи и вмещающих пород. В его представлении анкерная крепь – это податливая крепь нарастающего сопротивления, опирающаяся на породы упругой области, то есть часть массива, которая почти не разрушается.

Развитием такого подхода к расчету крепи стал метод, разработанный проф. Г.Н. Кузнецовым [143], основанный на идее энергетического баланса.

Г.Н. Кузнецовым и А.Т. Топалкароевым [37] было доказано, что равновесное состояние в массиве с анкерной крепью не достигается сразу после ее установки, а возникает как результат развивающегося во времени процесса взаимодействия массива и крепи.

Четвертая группа методик основана на использовании расчетных зависимостей, полученных лабораторными и аналитическими методами исследований. Типичным примером использования результатов аналитических исследований являются работы проф. Peng S.S. [64, 68, 70, 73], в которых он на основе метода граничных элементов и теории размерностей определил рациональные параметры сталеполимерной анкерной крепи.

В работе Круковского А.П. [144], на основе исследований взаимодействия анкеров с массивом методом конечных элементов, обоснованы параметры и условия применения анкеров с высокой несущей способностью для крепления выработок.

В монографии проф. Jun Lu Luo [145] подробно изложен разработанный им численный метод (KBES), позволяющий с учетом плотности пород, глубины за-

ложения выработки, а также таких механических свойств анкеруемых пород, как модули упругости, сдвига и всестороннего сжатия, угла внутреннего трения, когезии, коэффициента разрыхления и прочности на растяжение рассчитывать основные параметры анкерования кровли.

Ранек [19, 21] предложил метод расчета анкерной крепи (выбор конструкции анкера, его длины, начального натяжения), позволяющий достигнуть оптимального эффекта при возведении в кровле выработки несущей балки. Полученные результаты базируются на натуральных и лабораторных экспериментах, а также численном моделировании.

Проф. Стилборг [146] для классических схем взаимодействия анкерной крепи с массивом, приводит номограммы для выбора ее параметров. Правильность выбора параметров крепи проверяется по величине критерия устойчивости, изменяющегося от 1,25 до 10,0. В других методиках [58, 147, 148], в основу которых положен показатель качества пород кровли, выбирается не только плотность установки анкерной крепи, но и дополнительные меры по ее усилению. Расстояние между анкерами варьируется от 1,0 до 3,5 м. В случае, когда анкерная крепь, как самостоятельная конструкция не способна обеспечить устойчивость выработки, рекомендуется применять усиление в виде сетчатой затяжки, набрызгбетона, бетонных арочных сводов и т.д.

Бабиюк Г.В. и Леонов А.А. [149, 150, 151, 152, 153] предлагают подход к расчету параметров анкерной крепи, основанный на формировании в кровле выработки породно-анкерной конструкций при помощи предварительного уплотнения расслоившихся пород гидростойками с последующей установкой анкеров и рамной крепи с распором.

Н.Н. Касьян [154, 155, 156] считает, что анкерная крепь, установленная при проведении выработки, выполняет роль армирующего элемента, повышающего условно-мгновенную прочность пород вокруг выработки.

В.П. Сажнев [157] рассматривает анкерную крепь как способ, позволяющий полнее использовать эффект саморасклинивания горных пород. По его мнению, анкеры должны иметь пространственное расположение, что позволит сгладить

неравномерность конвергенции по длине выработки, которая вызвана разнозначным движением пород вдоль оси выработки. Угол установки анкеров, согласно рекомендациям автора, изменяется от 5 до 40 градусов.

Вопросы влияния способа закрепления анкеров скрепляющих воедино слоистую кровлю, их начального натяжения и плотности установки на характер деформирования и разрушения формируемой несущей балки изучали Snyder [48, 158, 159], Krohn [160], Jeffrey и Daemen [161], Xiu [101], Fairhurst и Singh [136], Stimpson [162], Stankus и Guo [122].

В основу пятой группы положены результаты обработки данных экспериментальных исследований, методы инженерного анализа, теории вероятности и математической статистики.

В работах [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46] на основании пофакторного анализа совокупности причин, приводящих к обрушению, закрепленных анкерами кровель пластов получены эмпирические зависимости для определения безопасных параметров анкерной крепи при различных схемах ее использования. Влияющими факторами являются: категории непосредственной кровли пласта по устойчивости, глубина залегания, величины горизонтальной составляющей горного давления, ширины выработки по кровле, несущей способности анкеров, плотности их установки и длины анкерных болтов. Они позволяют с надежностью не менее 76 % обеспечить безопасные условия труда шахтеров при их использовании.

В работе А.В. Ремезова [163] приведены методики расчета параметров сталеполимерных, винтовых и канатных анкеров глубокого заложения для условий шахт Кузбасса.

В работах Заславского Ю.З. [164, 165, 166] и Борзых А.Ф. [167, 168], величину зоны нарушенных пород, за пределами которой должен располагаться глубинный замок анкера, рекомендуется определять по данным натурных наблюдений.

Действующим нормативным документом, регламентирующим применение анкерной крепи на шахтах Российской Федерации [168] предлагается следующая методика расчета. Для прямоугольной или трапециевидной формы выработок, расчет параметров анкерной крепи производится в зависимости от: интенсивности

горного давления, определяемого с учетом размеров и глубины заложения выработки; параметров способа ее охраны от влияния очистных работ; прочности, трещиноватости и устойчивости пород кровли. В качестве критерия интенсивности горного давления принимаются расчетные смещения кровли выработки с анкерной крепью, определяемые по методике НИМИ [169, 170].

Аналогичный порядок расчета параметров анкерного крепления регламентируется в действующих нормативных документах [169, 171, 171, 172, 173].

Все анализируемые в данном разделе методики расчета параметров анкерной крепи не позволяют учесть характер взаимодействия с массивом анкера большего диаметра, чем диаметр направляющего шпура в предложенном ГОУ ВПО «ДОН-НТУ» способе установке и рассчитать его «несущую способность». В предложенном способе закрепление анкера происходит за счет сил упругого взаимного деформирования тела анкера и окружающего его массива пород.

Наиболее близкой к решению рассматриваемой задачи является теория продольного упругого удара для определения сопротивлений боковой поверхности сваи, и ее нижнего конца, с учетом волновых процессов, при погружении в грунт [174]. Другая известная работа в этом направлении [175], только описывают методики и результаты экспериментальных исследований по забиванию свай, проведенные в лабораторных и натуральных условиях.

В нашем случае, при выводе основных зависимостей для определения параметров системы «анкер – породный массив» с учетом волновых процессов будет использован общий подход, приведенный в работе [174].

Однако этот расчёт имеет несколько неуточнённых вопросов.

- допущение, что материал грунта однородный, изотропный и вязкоупругий;
- при расчёте не определялась контактная нагрузка q на посадочной поверхности соприкосновения сваи и грунта (в нашем случае анкера и породы);
- имеются отличия в зависимости сопротивления в осевом направлении;
- не получены зависимости для напряжений, возникающих в месте соприкосновения сваи и грунта;
- не приведены результаты исследований по определению параметров сваи;

– скорость падающего груза при забивании является незначительной (максимум 6 м/с), в результате чего волновые процессы практически не влияют на НДС свай и грунта.

Поэтому в дальнейшем эта теория не нашла применения. Кроме этого, в данном случае возникает вопрос об устойчивости анкера при закреплении породного массива.

Поэтому, в данной работе необходимо:

- выполнить теоретические и экспериментальные исследования устойчивости анкера и НДС системы «анкер – порода»;
- выбрать параметры устройства, которые позволят обеспечить надежное закрепление породного массива;
- снизить материальные затраты на крепление;
- повысить безопасность горных работ и обеспечить устойчивость выработок.

1.4 Цель и задачи исследований

На основании выполненного анализа научно-технической литературы, посвященной исследуемой теме можно сделать следующие выводы:

- проблема обеспечения устойчивости горных выработок с увеличением глубины разработки приобретает большое значение, так как при этом повышается величина горного давления, что обуславливает значительные деформации крепи;
- анкерная крепь является эффективным средством управления состоянием приконтурной зоны не только при заложении выработок в породах 3 и 4 категорий устойчивости, но и в породах более низких категорий, в которых размер зоны разрушения превышает длину анкера;
- анкерная крепь повышает безопасность ведения горных работ, хорошо противостоит взрывным работам. Ее можно устанавливать в забое в качестве временной, что позволит повысить безопасность работ, снизить травматизм. Она обладает потенциальными возможностями для полной механизации установки, требует меньшего расхода крепежных материалов и может использоваться в выра-

ботках с меньшим поперечным сечением; имеет меньшее аэродинамическое сопротивление по сравнению с рамной крепью;

– ее использование позволит: сократить капитальные затраты; снизить металлоёмкость крепи; снизить трудоемкость работ; увеличивает темпы горнопроходческих работ;

– за рубежом анкера используют в качестве практически единственного безопасного средства крепления массива горных выработок, как самостоятельной конструкции, так и в составе комбинированных крепей;

– на шахтах ведущих угледобывающих стран применяются многочисленные безраспорные конструкции анкеров, такие как винтовые, анкера «Сплит-Сет» и «Свеллекс», трубчатые взрывораспорные анкера и т.д. Однако они не получили широкого применения в практике из-за необходимости изготовления анкеров из высокопрочных упругих сталей и дорогого оборудования для их установки;

– на шахтах Донбасса преимущественно применяют сталеполлимерные анкера с наполнителем на основе цемента или синтетических смол, на приготовление которых расходуется до 50 % от стоимости крепи;

– запатентованный в «ДОННТУ» способ установки стального анкера большего диаметра, чем диаметр шпура, устанавливаемый в породный массив с помощью динамической нагрузки позволит: существенно снизить затраты, в том числе при извлечении после эксплуатации; обеспечить устойчивость выработок и безопасность ведения горных работ.

Для определения параметров системы «анкер - породный массив» при использовании предлагаемого способа необходимо провести теоретические, лабораторные и шахтных исследований, которые в настоящее время отсутствуют.

Цель работы – установление закономерностей взаимодействия горных пород и анкера при его установке динамической нагрузкой в направляющий шпур меньшего диаметра для обоснования области применения и параметров способа установки анкеров, обеспечивающих устойчивость горных выработок.

Основные задачи исследований:

1. Выполнить анализ существующих способов и конструктивных решений закрепления анкерами породного массива горных выработок угольных шахт.
2. Разработать математические модели, позволяющие оценить устойчивость анкера на начальном этапе его установки, а также закономерности взаимодействия горных пород и анкера при реализации предложенного способа;
3. Выполнить лабораторные и шахтные исследования по определению основных параметров предлагаемого способа;
4. Разработать технологию реализации способа и методику определения его параметров.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «АНКЕР – ПОРОДНЫЙ МАССИВ» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

2.1 Общая методика и основные методы исследований

На рисунке 2.1 представлена структурная блок-схема общей методики и основных методов исследований.

При исследованиях будут использованы следующие критерии устойчивости и прочности для напряжений, представленные в виде следующих функциональных зависимостей от параметров соответственно:

$$\sigma_{\text{э}} = f_1(P, E, D, l, \mu) \leq \sigma_{\text{пц}}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\text{max}} = f_2(P, v_0, a, E_{\text{п}}, E, v, v_{\text{п}}, D, d, l, l_0, m, m_1, \gamma, f, H, t) \leq \sigma_{\text{пц}},$$

$$\sigma_{\text{э}} > \sigma_{\text{max}}, \quad (2.2)$$

где $\sigma_{\text{э}}, \sigma_{\text{пц}}$ – эквивалентное напряжение устойчивости и предел пропорциональности (прочности на сжатие) материала анкера, МПа;

P – внешняя нагрузка, Н;

v_0 , – скорость анкера в момент удара, м/с;

a – скорость звука в материале анкера, м/с;

$E, E_{\text{п}}$ – модули упругости материала анкера и породного массива соответственно, МПа;

$\nu, \nu_{\text{п}}$ – коэффициенты Пуассона материала анкера и породного массива соответственно;

D, l, d – диаметр, длина анкера, диаметр шпура соответственно, м;

μ – коэффициент длины, зависящий от способа закрепления концов анкера;

l_0 – длина окружности сечения анкера, м;

m, m_1 – масса анкера и ударного устройства соответственно, кг;

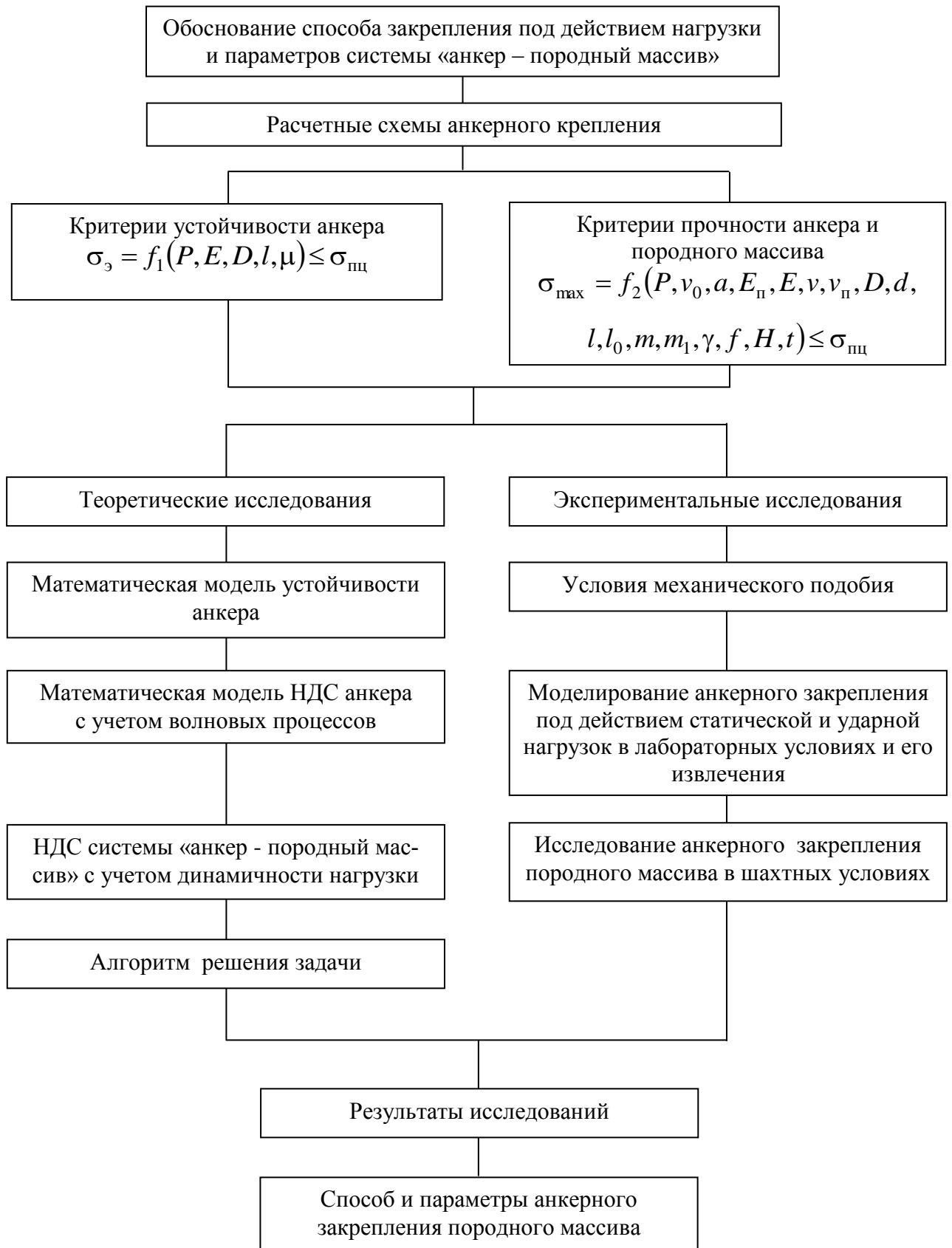


Рисунок 2.1 – Структурная блок-схема общей методики и основных методов исследований установки анкера в породный массив под действием динамической нагрузки

γ – удельный вес материала анкера, Н/м³;

f – коэффициент трения анкера по породе;

H – расстояние между ударным устройством и анкером, м;

t – время, с.

Цель теоретических исследований – выявление существенных связей между исследуемым объектом (напряженно-деформированное состояние системы «анкер – породный массив») и варьируемыми параметрами (2.1, 2.2), обобщение результатов исследований и выявление общих закономерностей.

Работа выполнена в следующей последовательности. Сначала разработана математическая модель устойчивости анкера с различными геометрическими размерами на начальном этапе его установки. Затем предложена модель, описывающая изменение НДС в системе «анкер – породный массив» под действием нагрузки, позволяющая определить необходимые для установки нагрузки, напряжения и деформации в анкере и породах с учетом сопротивлений в продольном направлении, трения по боковой поверхности и волновых процессов.

Для разработанных моделей были выполнены расчеты следующих величин: эквивалентных и максимальных напряжений; статических и динамических нагрузок, необходимых для установки анкеров в шпур; контактных динамических нагрузок; максимальных динамических напряжений, возникающих в анкере и породах; времени установки анкеров в шпур и нагрузок для преодоления сил трения при извлечении анкеров. Указанные величины были определены для обозначенных ранее пределов изменения влияющих факторов. Это позволило установить закономерности и зависимости изменения НДС системы «породный массив-анкер».

С целью проверки адекватности разработанных математических моделей были проведены лабораторные и шахтные исследования. Они позволили установить сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований, определить область применения предложенного способа установки, обосновать параметры оборудования, необходимого для установки анкеров, и разработать методику расчета параметров способа.

2.2 Математическая модель устойчивости анкера при закреплении породного массива под действием статической нагрузки

Для надежной работы системы «анкер – породный массив» необходимо, в первую очередь, чтобы анкер под действием сжимающих сил P оставался устойчивым, а не искривился, что вызовет появление изгибающих моментов и возникнут добавочные напряжения от изгиба. Поэтому, помимо проверки анкера на прочность, необходима и проверка на устойчивость. Для осуществления этой проверки надо определить условия, при которых устойчивость прямолинейной формы сжатого анкера нарушается.

Рассмотрим достаточно длинный по сравнению с его поперечными размерами анкер, шарнирно-прикрепленный к опорам (рис. 2.2) и нагрузим его сверху центральной силой P , постепенно возрастающей. Пока эта сила сравнительно мала, анкер будет сохранять прямолинейную форму. При попытках отклонить его в сторону, например, путем приложения кратковременно действующей горизонтальной силы, он будет после ряда колебаний возвращаться к первоначальной прямолинейной форме.



Рисунок 2.2 – Схема анкера под действием нагрузки в начальный момент закрепления породного массива

При постепенном увеличении силы P анкер будет все медленнее возвращаться к первоначальному положению при проверках его устойчивости; наконец, можно довести силу до такой величины, при которой анкер, после небольшого отклонения его в сторону, уже не выпрямится, а останется искривленным. Если

мы, не удаляя силу, выпрямим анкер, он уже, как правило, не сможет сохранить прямолинейную форму. Другими словами, при этом значении силы P , называемом критическим P_k , будем иметь такое состояние равновесия, когда исключается вероятность сохранения анкером заданной ему прямолинейной формы.

Переход к критическому значению силы P происходит внезапно; стоит очень немного уменьшить сжимающую силу по сравнению с ее критической величиной, как прямолинейная форма равновесия вновь является устойчивой.

С другой стороны, при очень небольшом превышении сжимающей силой до ее критического значения прямолинейная форма анкера является крайне неустойчивой. Достаточно при этом небольшого эксцентриситета приложенной силы, неоднородности материала по сечению, чтобы анкер искривился, и не только не вернулся к прежней форме, а продолжал искривляться под действием все возрастающих при искривлении изгибающих моментов. Процесс искривления заканчивается либо достижением совершенно новой (устойчивой) формы равновесия, либо разрушением.

Исходя из этого, необходимо, практически, считать критическую величину сжимающей силы $P_{кр}$ эквивалентной нагрузке, «разрушающей» сжатый анкер, выводящей его (и связанный с ним породный массив) из условий нормальной работы. Конечно, при этом надо помнить, что «разрушение» анкера нагрузкой, превышающей ее критическую, может происходить при непременном условии беспрепятственного возрастания его искривления. Поэтому, если при боковом выпучивании анкер встретит боковую опору, ограничивающую его дальнейшее искривление, то разрушение может и не наступить.

Это объясняется наличием ряда обстоятельств, неизбежных в нашем случае (начальная кривизна, эксцентриситет действия, нагрузки, неоднородность и трещиноватость материала и т. д.) и почти не отражающихся на работе конструкции при других видах деформации.

Критическую силу по форме потере устойчивости Эйлера определяют из дифференциального уравнения изогнутой оси анкера, справедливой для любого его сечения, в пределах которого продольная нагрузка неизменна.

Для анкера с постоянной жесткостью дифференциальное уравнение устойчивости имеет вид [176]

$$\frac{d^4 U}{dx^4} + \alpha^2 \frac{d^2 U}{dx^2} = 0, \quad (2.3)$$

где

$$\alpha = \left(\frac{P}{EI} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.4)$$

U – прогиб сечения с абсциссой x , м;

E – модуль упругости материала анкера, Н/м²;

I – момент инерции сечения анкера, м⁴;

P – продольная сила, Н;

x – координата, м.

При начальной нагрузке ударного устройства и соединении анкером менее прочными породами возникает вопрос об определении его таких параметров, как длина, диаметр, модуль упругости материала, предел прочности при сжатии, которые обеспечивают его устойчивость [177, 178].

При этом формула (2.3) уже не определяет истинного значения критического напряжения. Согласно формуле (2.4) критическая сила равна

$$P_{\text{кр}} = \frac{4\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (2.5)$$

где μ – коэффициент длины, зависящий от способа крепления концов анкера, примем его равным единице для расчетной схемы с граничными условиями шарнирное крепление в ударном устройстве и в опоре при входе анкера в массив горных пород.

Формулой (2.5) можно пользоваться при условии, что гибкость анкера λ , определяемая выражением

$$\lambda = \frac{l}{(I/F)^{1/2}}, \quad (2.6)$$

удовлетворяет неравенству

$$\lambda_3 \leq \pi \left(\frac{E}{\sigma_{\text{пц}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.7)$$

В формуле (2.6) обозначение $F = \pi D^2/4$ – площадь сечения анкера, м².

Приведенные выше соотношения относятся к случаям потери устойчивости в упругой области, то есть справедливы при условии, что вплоть до достижения критического состояния максимальные напряжения не превышают предела пропорциональности материала.

Если условие (2.7) не выполняется, то потеря устойчивости анкера наступит при напряжениях, превосходящих его значение. В этом случае расчет на устойчивость анкера с первоначальной прямолинейной осью, критическое напряжение определяют по формуле Эйлера

$$\sigma_3 = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (2.8)$$

где гибкость анкера определяется из выражения

$$\lambda = \frac{l}{r_{\text{min}}}, \quad (2.9)$$

r_{min} – наименьший радиус инерции поперечного сечения, м;

$$r_{\text{min}} = \left(\frac{I_{\text{min}}}{F} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.10)$$

I_{min} – наименьший момент инерции поперечного сечения анкера, м⁴.

Если

$$\sigma_3 > \sigma_{\text{пц}}, \quad (2.11)$$

то потеря устойчивости происходит за пределами пропорциональности.

Критической гибкостью называют величину,

$$\lambda_3 = \pi \left(\frac{E}{\sigma_{\text{пц}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.12)$$

которая зависит только от свойств материала анкера, значения которой для различных сталей являются справочными.

Если $\lambda > \lambda_0$, то потеря устойчивости анкера может произойти в пределах пропорциональности материала, что должно выполняться при расчетах.

2.3 Математическая модель напряженно-деформированного состояния системы «породный массив – анкер» под действием нагрузки с учетом волновых процессов

Рассмотрим одноосное напряженно-деформированное состояние анкера при установке в породный массив.

При моделировании процесса движения анкеров с диаметром большим, чем диаметры шпура, воспользуемся теорией упругого удара, предложенной Сен-Венаном, уточненной в дальнейшем Бусинеском [179, 180].

Изложим основы теории упругого удара, предложенной Сен-Венаном.

Пусть на нижнем основании цилиндрического тела в момент времени $t = 0$ действует динамическая нагрузка, кинетическая энергия которой равна

$$W_0 = m \frac{v_0^2}{2},$$

где m – масса движущегося тела, кг;

v_0 – его скорость в момент удара, м /с².

Этот удар воспринимается нижним сечением анкера, а затем распространяется вверх со скоростью a (a – скорость звука в материале, из которого изготовлен анкер, м/с²). Следовательно, можно предположить, что в момент удара его влияние ощущается нижним сечением анкера, а скорость этого сечения v_1 совпадает со скоростью ударного инструмента v_0 , которая может быть меньше или равна v_0 .

В теории Сен-Венана скорость v_1 равна скорости ударного тела v_0 на основании следующих соображений.

Предположим, что в момент удара скорость нижнего сечения v_1 меньше скорости ударного инструмента v_0 . Тогда, согласно закону сохранения энергии, разность кинетических энергий должна реализовываться эффектом вблизи нижнего основания анкера, так как он в момент удара не ощущает его воздействия. Результатом этого воздействия может быть проявление неупругих деформаций в нижнем сечении анкера. Учитывая результаты, полученные в работах Юнга, имеем: за время dt , следующее за моментом удара $t = 0$, нижнее сечение анкера переместится вверх на величину $v_1 dt$. С другой стороны, деформация распространится на величину $a dt$. Следовательно, деформация нижнего сечения анкера будет равна $\varepsilon_x = \frac{v_1}{a}$.

Возникающее напряжение в материале в нижнем сечении анкера будет равно $\sigma_x = E\varepsilon_x$. При упругом состоянии анкера должно быть соблюдено условие

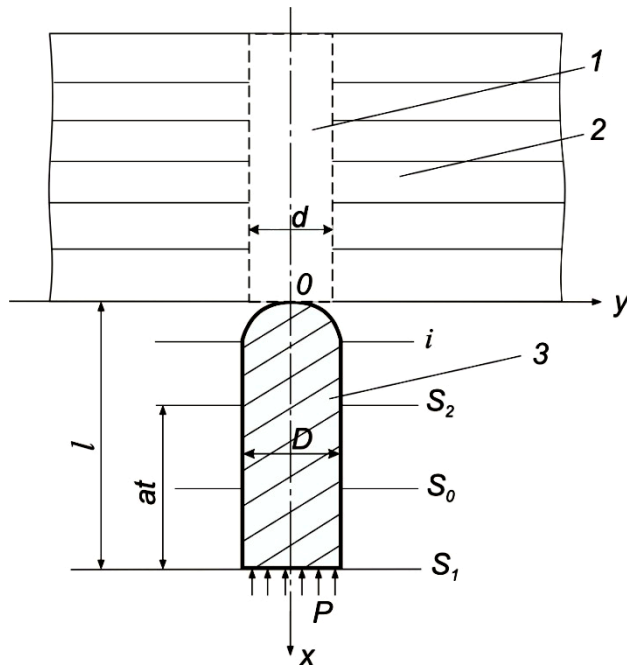
$$E \frac{v_0}{a} \leq \sigma_{\text{пц}}, \quad (2.13)$$

Это условие имеет место лишь при вполне гладком соприкосновении в момент удара нижнего сечения анкера, так как только при нем все точки поверхности верхнего сечения получают в момент удара одинаковую скорость v_1 [180]. В противном случае неровности верхнего сечения анкера испытывают неупругие деформации, т.е. смятие, поэтому скорость движения анкера v_1 должна быть меньше скорости v_0 .

Учитывая вышеизложенное, получим дифференциальное уравнение продольного удара по анкеру, представляющего собой цилиндрическое тело длиной ℓ .

Рассмотрим расчетную схему крепления анкера в породном массиве (см. рисунок 2.3) [181].

Расположим начало координат в нижнем сечении анкера и направим положительную ось Ox по его оси в верхнем направлении.



1 – шпур; 2 – горный массив; 3 – анкер; i, S_0, S_1, S_2 – сечения;
 D, d – диаметры анкера и шпура соответственно

Рисунок 2.3 – Расчётная схема динамической установки анкера
 в породный массив

Тогда каждому поперечному сечению анкера будет соответствовать определенная координата, выражающая местоположение этого сечения от нижней его поверхности до удара. При ударе каждое поперечное сечение получит вертикальное перемещение U , которое будет различно для разных сечений и меняться с течением времени t . Следовательно, величина U будет функцией независимых переменных x, t . Относительное перемещение каждого сечения (деформация ε_x)

будет выражаться величиной $\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}$, напряжение, согласно закону Гука,

$\sigma_x = E \frac{\partial U}{\partial x}$, где E – модуль упругости материала, из которого изготовлен анкер, а

скорость каждого сечения в любой момент времени – функцией $\frac{\partial U}{\partial x}$.

Для описания механизма удара, с помощью которого осуществляется процесс установки анкеров в породный массив, достаточно найти вид функции $U(x, t)$.

Для вывода дифференциального уравнения равновесия анкера рассмотрим элементарный кубик со сторонами dx , dy , dz под действием силы P .

На нижней и верхней поверхностях этого кубика возникают напряжения σ_x и $\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx$, отличающихся друг от друга на бесконечно малую величину. Следовательно, на кубик будет действовать сила P , равная разности

$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dydz - P dydz = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx dy dz \quad (2.14)$$

Согласно началу Даламбера [180] внешняя сила должна уравновешиваться силой инерции, возникающей от движения этого кубика, т.е. силой, равной

$$\frac{\gamma}{g} dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (2.15)$$

где γ – удельный вес материала, Н/м³;
 g – ускорение силы тяжести, м/с².

Приравняв соотношения (2.14) и (2.15), после элементарных преобразований, получим

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (2.16)$$

Подставив в уравнение (2.16) выражение σ_x через деформацию и модуль упругости материала, т.е. $\sigma_x = E \frac{\partial U}{\partial x}$, получим уравнение вида

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (2.17)$$

где $a = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}$ – скорость распространения деформации вдоль анкера, т.е. скорость звука.

Полученное уравнение (2.17) является основным дифференциальным уравнением упругого удара. Это уравнение в частных производных второго порядка и его общее решение, согласно [181] может быть представлено в виде двух произвольных функций от аргументов $at + x$ и $at - x$, т.е.

$$U = f_1(at - x) + f_2(at + x), \quad (2.18)$$

где f_1 и f_2 – произвольные функции от аргументов, стоящих в их скобках. Вид функций f_1 и f_2 определим из соответствующих граничных и начальных условий. В том, что выражение (2.18) является общим решением уравнения (2.17) убедимся непосредственно подстановкой (2.18) в (2.17). Имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= f_1'(at - x) + f_2''(at + x), \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} &= a^2 f_1'(at - x) + a^2 f_2''(at + x). \end{aligned} \quad (2.19)$$

Подставив соотношения (2.19) в уравнение (2.17), получим

$$a^2(f_1''(at - x) + f_1''(at + x)) = -a^2(f_2''(at - x) + f_2''(at + x)).$$

Важным является тот факт, что любой вид функций f_1 и f_2 будет являться решением уравнения (2.17), т.е. описывать процесс продольного упругого удара при условии, что аргументами этих функций будут $(at - x)$ и $(at + x)$.

Приведем сначала решение Сен-Венана для случая удара по цилиндрическому телу (в нашем случае) длиной ℓ с закрепленным верхним концом. Из этого условия следует, что верхнее основание анкера (его верхнее сечение) $x = 0$ (см. рисунок 2.3) в течение всего процесса удовлетворяет условию

$$(U)_{x=0} = 0. \quad (2.20)$$

Тогда из представления общего решения (2.18) имеем

$$0 = f_1(at) + f_2(at) \quad (2.21)$$

для любых значений t , и введя аргумент $z = at$, получим

$$f_2(z) = -f_1(z).$$

Следовательно, общее решение уравнения (2.17) в этом случае может быть представлено в виде

$$U = f_1(at - x) - f_1(at + x). \quad (2.22)$$

Для определения вида функции f_1 обратимся к упругому состоянию анкера в начале рассматриваемого процесса, т.е. в момент удара $t = 0$. В этот момент во всех сечениях анкера их скорости $\frac{\partial U}{\partial t}$ и напряжения σ_x равны нулю. Учитывая (2.22) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} &= -f_1'(at - x) - f_1'(at + x) \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= af_1'(at - x) - af_1'(at + x). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Положив в соотношениях (2.22) $t = 0$, получим

$$\begin{aligned} 0 &= -f_1'(-x) - f_1'(x) \\ 0 &= af_1'(-x) - af_1'(x), \end{aligned}$$

для всех сечений анкера, т.е. для всех $x \in [0, \ell]$.

Решая систему уравнений (относительно функций $f_1'(-x)$ и $f_1'(x)$), получим

$$\begin{aligned} f_1'(x) &= 0 \\ f_1'(-x) &= 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

для значений $x \in [0, \ell]$.

Откуда следует, что $f_1'(z) = 0$ для всех значений аргумента z в интервале $x \in [-\ell, \ell]$.

Рассмотрим состояние анкера в момент времени t после удара, причем $at < \ell$.

Отложим от верхнего основания S_1 величину, равную at .

Рассмотрим сечение i , лежащее выше сечения S_2 . Определим скорость и напряжение в этом сечении. Из рисунка видно, что $at + x < \ell$, а значит и $at - x < \ell$. Раньше было установлено, что $f_1'(z) = 0$ при $z < \ell$. Следовательно, подставив вместо z соответствующие выражения, получим

$$f_1'(at + x) = f_1'(at - x) = 0. \quad (2.25)$$

Тогда, из уравнений (2.23) следует, что в этом сечении

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \varepsilon_x = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial t} = 0,$$

т.е. деформации и скорости любого сечения, лежащего ниже сечения S_2 , будут равны нулю, т.е. эти сечения будут находиться в покое.

Рассмотрим сечение S_0 , лежащее выше сечения S_2 . Для него имеет место следующие соотношения: $at - x < \ell$, $at + x > \ell$.

Следовательно, согласно (2.24) имеем

$$\begin{aligned} f_1'(at - x) &= 0 \\ f_1'(at + x) &\neq 0. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Воспользовавшись уравнениями (2.23) и учитывая (2.26), для деформации ε_x и скорости в сечении S_0 будем иметь:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -f_1'(at + x), \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -af_1'(at + x). \quad (2.28)$$

Полученные результаты указывают на то, что волна деформаций распространяется от нижнего сечения анкера, воспринимающего удар со скоростью звука « a », а все сечения, которые не захвачены волной, находятся в покое (соотно-

шения (2.25,2.26)). В сечениях, захваченных волной, деформации и скорости описываются уравнениями (2.27) и (2.28).

Для определения вида функции $f_1'(z)$ при $z > \ell$ воспользуемся условием движения нижнего сечения анкера непосредственно получившего удар. В этом сечении $x = \ell$. Значит $at + x = at + \ell > \ell$ с момента удара и, следовательно, это сечение захватывается ударной волной с начала процесса.

Используя уравнение движения ударного инструмента массой m под действием реакции нижнего конца анкера, определяемое тем же началом Даламбера [182], после элементарных преобразований соотношение (2.29) приведем к виду

$$k\ell \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{x=\ell} = -a \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=\ell}. \quad (2.29)$$

Здесь k – отношение массы ударного инструмента m к массе анкера m_1 , то есть m/m_1 .

Из уравнений (2.27) определим $\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{x=\ell}$ и $\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=\ell}$.

Имеем

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{x=\ell} = a^2 f_1'(at - \ell) - a^2 f_1'(at + \ell). \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=\ell} = -f_1'(at - \ell) - f_1'(at + \ell). \quad (2.31)$$

Подставив выражения (2.30), (2.31) в уравнение (2.29) получим уравнение вида

$$k\ell [f_1''(at - \ell) - f_1''(at + \ell)] = f_1'(at - \ell) - f_1'(at + \ell). \quad (2.32)$$

Считая, что $at + \ell = z$, откуда $at - \ell = z - 2\ell$, после некоторых преобразований из уравнения (2.32) получим для определения вида искомой функции $f_1'(z)$ уравнение

$$f_1''(z) + \frac{1}{k\ell} f_1'(z) = f_1''(z - 2\ell) - \frac{1}{k\ell} f_1'(z - 2\ell). \quad (2.33)$$

Далее, рассматривая изменение аргумента z в интервале $\ell < z < 3\ell$, будем иметь $-\ell < z - 2\ell < \ell$, следовательно, как ранее было установлено, $f_1'(z - 2\ell) = 0$ и его производная тоже равна нулю, т.е. $f_1''(z - 2\ell) = 0$.

Тогда из соотношения (2.33) для определения неизвестной функции $f_1(z)$ получим уравнение вида

$$\frac{\partial U}{\partial x} = af_1'(at - x) + af_1'(at + x). \quad (2.34)$$

Интегрируя его, получаем

$$f_1'(z) = Ce^{-\frac{z}{k\ell}}. \quad (2.35)$$

Константу C определим из начального момента движения $t = 0$ нижнего конца анкера. С одной стороны, она равна v_0 , а с другой, согласно (2.23) – $f_1'(\ell)$, т.е.

$$f_1'(\ell) = \frac{v_0}{a}, \quad (2.36)$$

или, с учетом (2.35) имеем

$$C \cdot e^{-\frac{1}{k}} = \frac{v_0}{a}. \quad (2.37)$$

Откуда

$$C = \frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{1}{k}},$$

и искомая функция $f_1'(z)$ в интервале $\ell < z < 3\ell$ имеет вид:

$$f_1'(z) = \frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{\ell-z}{k\ell}}. \quad (2.38)$$

Таким образом, в период распространения прямой волны (снизу вверх) скорость и деформация сечений, захваченных ею, описывается соотношениями вида

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -v_0 \cdot e^{\frac{\ell-at-x}{kl}} ; \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{\ell-at-x}{kl}} . \quad (2.40)$$

Определим состояние анкера в момент, когда прямая волна достигает верхнего конца, т.е. в момент

$$at = \ell. \quad (2.41)$$

Тогда, согласно формуле (2.39), (2.40), после подстановки (2.41), получим

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{x}{kl}} . \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -v_0 \cdot e^{\frac{x}{kl}} . \quad (2.43)$$

Следовательно, на верхнем конце анкера ($x = 0$), согласно (2.42) будем иметь

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{v_0}{a} . \quad (2.44)$$

С другой стороны, дойдя до верхнего основания, волна деформации отражается от этой точки и распространяется вниз.

Если она в момент времени t достигла любой текущей точки x , то

$$at = 0i + 0x > \ell .$$

В этом случае для каждого сечения, которое не захвачено отраженной волной имеем

$$\begin{aligned} at + x &> \ell, \\ at - x &< \ell. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Следовательно, в этом сечении $f_1'(at - x) = 0$, а $f_1'(at + x)$ имеет вид (2.38).

При этом скорость и деформации сечения, захваченные прямой волной, но не за-

хваченные отраженной, остаются прежними и при обратном движении волны. Для сечения i , подверженного отраженной волны для этих сечений имеем

$$f_1'(at + x) = \frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{\ell - at - x}{kl}}, \quad (2.46)$$

$$f_1'(at - x) = \frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{\ell - at + x}{kl}}. \quad (2.47)$$

В момент отражения волны $t = \frac{\ell}{a}$ в нижнем конце ($x = 0$), из (2.46) с учетом (2.23) получим

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -2 \frac{v_0}{a}, \quad (2.48)$$

а в последующие моменты:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -2 \frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{\ell - at}{kl}}. \quad (2.49)$$

Формулы (2.44) и (2.47) указывают на то, что в момент отражения деформации на верхнем конце анкера напряжения сразу удваиваются, а затем (согласно (2.49)), в течение последующего процесса уменьшаются по абсолютной величине. Легко убедиться в том, что скорость на верхнем его конце внезапно падает от значения v_0 до нуля, что обусловлено возникновением отраженной волны, получившее обратное направление сверху вниз.

Процесс продолжается до тех пор, пока напряжение в нижнем конце анкера $\sigma_x = E \frac{\partial U}{\partial x}$ не обратится в нуль. Если этого не произойдет в промежуток времени $t \leq 2\ell/a$, то волна вторично отражается от нижнего сечения, при этом функцию $f_1'(z)$ для значения аргумента $3\ell < z < 5\ell$ определяем из уравнения (2.30), которая имеет вид

$$f_1'(z) = \frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{\ell - z}{kl}} + \frac{v_0}{a} \left[1 - \frac{2}{kl}(z - 3\ell) \right] \cdot e^{\frac{3\ell - z}{kl}}, \quad 3\ell < z < 5\ell. \quad (2.50)$$

Рассмотрим закрепление анкера под действием динамической нагрузки в предположении, что его верхний конец неподвижен до тех пор, пока давление в нем ниже величины P , равной сопротивлению пород, приложенному к нижнему концу. При продвижении анкера в породный массив его верхний конец испытывает постоянное напряжение, равное отношению нагрузки P , H , деленной на площадь сечения смятия пород массива S , m^2 , то есть P/S , где

$$S = \frac{\pi d^2 (k_0^2 - 1)}{4}; \quad k_0 = \frac{D}{d}. \quad (2.51)$$

Рассмотрим условие продвижения анкера вглубь породного массива в течение первой отраженной волны. В этом случае сопротивление должно быть меньше $2\varepsilon_x$. При соблюдении этого условия начало продвижения анкера совпадает с моментом достижения прямой волны его верхнего основания, причем в течение всего процесса движения напряжение его конца будет постоянным и равным

$$\sigma_x = E \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -\frac{P}{S}. \quad (2.52)$$

Момент начала движения анкера примем за начальный ($t = 0$). Определим вид функции $f_2(at + x)$ (общее решение уравнения (2.18)) из данных начальных условий.

Из выражения (2.52), имеем

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -\frac{P}{S \cdot E} = -p. \quad (2.53)$$

Продифференцировав соотношение (2.18) по x , получим

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -f_1'(at - x) + f_2'(at + x). \quad (2.54)$$

Подставив в (2.54) $x = 0$ с учетом (2.53), получим

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -f_1'(at) + f_2'(at) = -p. \quad (2.55)$$

Разрешив выражение (2.55) относительно $f_2'(at)$, получим

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -f_1'(at - x) + f_2'(at + x) - p. \quad (2.56)$$

Проинтегрировав уравнение (2.56) по x , и учитывая, что нас устроит любая форма f_1 и f_2 , получим

$$U = f_1'(at - x) + f_1'(at + x) - px. \quad (2.57)$$

Тогда уравнения, описывающие деформацию и скорость любого сечения анкера с учетом (2.57) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} &= -f_1'(at - x) + f_1'(at + x) - p; \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= af_1'(at - x) + af_1'(at + x). \end{aligned} \quad (2.58)$$

Для определения функции $f_1'(z)$ воспользуемся начальным состоянием анкера, т.е. в момент времени $t = 0$. В этот момент времени напряжение и скорость для всех сечений анкера описываются соотношениями (2.42), (2.43).

С другой стороны, подставив в уравнения (2.58) $t = 0$, имеем

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{t=0} &= -f_1'(-x) + f_1'(x) - p; \\ \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{t=0} &= af_1'(-x) + af_1'(x). \end{aligned} \quad (2.59)$$

Приравняв соответствующие уравнения (2.59) и (2.42), (2.43), получим

$$\begin{aligned} -f_1'(-x) + f_1'(x) - p &= -\frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{x}{k\ell}}; \\ af_1'(-x) + af_1'(x) &= -v \cdot e^{\frac{x}{k\ell}}. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Откуда, для $f_1'(-x)$ и $f_1'(x)$ получим соотношения вида

$$f_1'(x) = -\frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{x}{k\ell}} + \frac{P}{2}, \quad (2.61)$$

$$f_1'(-x) = -\frac{P}{2}. \quad (2.62)$$

Так как эти соотношения справедливы для всех x из интервала $[0; \ell]$, то соотношение (2.61) определяет форму функции $f_1'(z)$ для значений аргумента $0 < z < \ell$, т.е.

$$f_1'(z) = -\frac{v_0}{a} \cdot e^{\frac{z}{k\ell}} + \frac{P}{2}, \text{ при } 0 < z < \ell. \quad (2.63)$$

Исходя из соотношения (2.62), для отрицательных значений аргумента z , т.е. $-\ell < z < 0$, имеем

$$f_1'(z) = -\frac{P}{2}. \quad (2.64)$$

Если движение анкера заканчивается в течение времени T , распространения отраженной волны происходит сверху вниз, т.е. при $aT \leq \ell$, тогда полученные соотношения описывают процесс его движения в рассматриваемом случае. Действительно, скорость нижнего конца анкера, т.е. при $x=0$, согласно формуле (2.59), будет иметь вид

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{x=0} = af_1'(at) + af_1'(at) = 2af_1'(at). \quad (2.65)$$

Так как время, соответствующее окончанию движения анкера, удовлетворяет условию $0 < aT < \ell$, то учитывая (2.63), для деформации нижнего конца анкера имеем:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -2v_0 \cdot e^{-\frac{at}{k\ell}} + ap. \quad (2.66)$$

Далее, в момент времени $t=T$ скорость движения анкера должна равняться нулю, так как он в этот момент останавливается. Тогда, подставив в (2.66) $t=T$, получим

$$-2v_0 \cdot e^{-\frac{aT}{k\ell}} + ap = 0. \quad (2.67)$$

Время движения анкера определяется из (2.67) и имеет вид:

$$T = -\frac{k\ell}{a} \cdot \ln\left(\frac{pa}{v_0}\right). \quad (2.68)$$

Перемещение нижнего конца анкера получим из уравнения (2.57) при $x = 0$.

$$(U)_{x=0} = 2f(at). \quad (2.69)$$

Функцию $f(z)$ определим, интегрируя ее производную (2.61). Тогда получим

$$f(z) = \int \left(-\frac{v_0}{a} \cdot e^{-\frac{z}{k\ell}} + \frac{p}{a} \right) dz = kl \cdot \frac{v_0}{a} \cdot e^{-\frac{z}{k\ell}} + \frac{pz}{2} + C_1. \quad (2.70)$$

Подставив в выражение (2.70) $z = at$ и учитывая (2.69), получим формулу для перемещения нижнего конца анкера в виде

$$(U)_{x=0} = 2kl \cdot \frac{v_0}{a} \cdot e^{-\frac{at}{k\ell}} - pat + 2C_1. \quad (2.71)$$

Постоянную C_1 определим из условия, что в начальный момент $t = 0$ перемещение $(U)_{x=0}$ равно нулю, т.е.

$$0 = \frac{klv_0}{a} + C_1,$$

и
$$C_1 = -\frac{klv_0}{a}. \quad (2.72)$$

Подставив (2.72) в (2.71) для перемещения нижнего конца анкера, получим

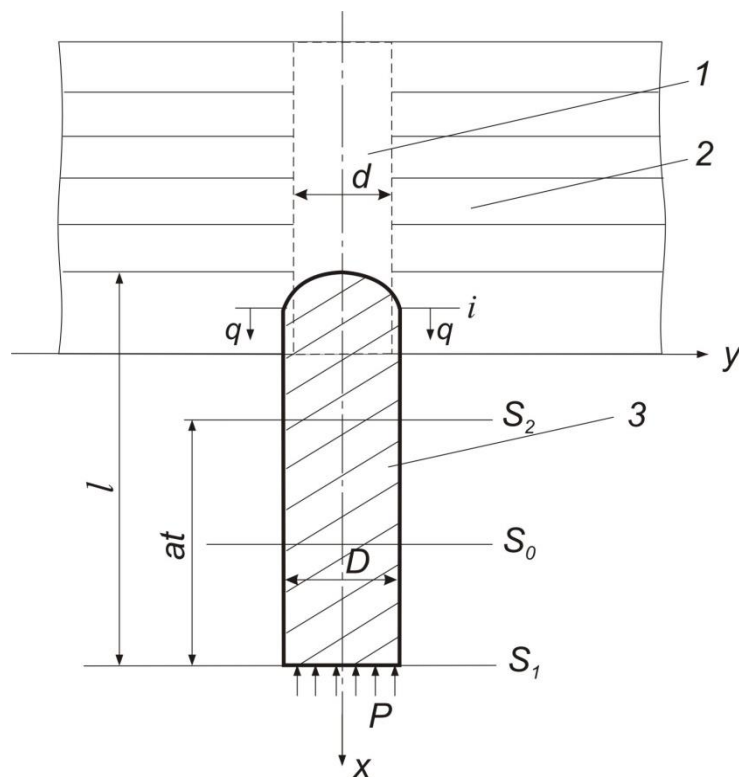
$$(U)_{x=0} = 2kl \cdot \frac{v_0}{a} \left(e^{-\frac{at}{k\ell}} - 1 \right) + apl. \quad (2.73)$$

Для определения координаты нижнего конца анкера при его остановке достаточно подставить в формулу (2.73) $t = T$. Учитывая (2.68), получим:

$$(U)_{\substack{x=0 \\ T=0}} = k\ell \cdot \left[p \cdot \left(1 - \ln \frac{pa}{\ell v_0} \right) - \frac{2v_0}{a} \right]. \quad (2.74)$$

Таким образом, полученные выражения полностью описывают процесс закрепления породного массива анкером при динамическом воздействии на его основание при условии, что верхний его конец, внедряемый в породный массив, испытывает сопротивление при действии нагрузки P .

Рассмотрим процесс продвижения анкера в направляющий шпур с учетом сил трения по его боковой поверхности (см. рисунок 2.4).



1 – шпур; 2 – горный массив; 3 – анкер; i, S_0, S_1, S_2 – сечения анкера; D, d – диаметры анкера и шпура соответственно; q – распределенная по боковой поверхности шпура сила сопротивления за счёт трения; P – динамическая нагрузка

Рисунок 2.4 – Расчётная схема динамической установки анкера в горный массив с учётом сил трения по боковой его поверхности

Считаем, что анкер зажат боковыми породами и удерживается в них трением, равномерно распределенным по его боковой поверхности. Нижний конец ан-

кера не испытывает сопротивления, т.е. в нашем случае $P=0$. Сила трения действует только в случае движения соответствующей части анкера вверх. В силу малости поперечного сечения по сравнению с длиной анкера, введем силу M , H/m^3 , считая, что сопротивление анкера в виде силы q , H/m^2 , приходящейся на единицу его объема, в виде

$$M = \frac{l_0 q}{S}, \quad (2.75)$$

где $l_0 = \pi D$ – длина окружности анкера, м.

Получим дифференциальное уравнение движения, аналогичное уравнению (2.16). Расположив, как и прежде, начало координат в нижнем сечении анкера и направив положительную ось Ox по оси анкера вверх. Тогда, уравнение (2.16) примет вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{l_0 q}{S} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (2.76)$$

Учитывая (2.52), после элементарных преобразований, получим уравнение движения анкера для рассматриваемого случая в виде

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + k_1 a^2 = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (2.77)$$

Общий интеграл уравнения в частных производных второго порядка (2.77), согласно [183], может быть представлен в виде

$$U = f_1(at - x) + f_2(at + x) - \frac{k_1 x^2}{2}. \quad (2.78)$$

Здесь f_1 и f_2 – две произвольные функции. В достоверности этого представления убедимся непосредственной подстановкой вида U (2.78) в уравнение (2.77).

Взяв соответствующие вторые частные производные от функции U (уравнение (2.78)), получим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = f_1''(at - x) + f_2''(at + x) - k_1. \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = a^2 f_1''(at - x) + a^2 f_2''(at + x). \quad (2.80)$$

Подставив (2.79), (2.80) в уравнение (2.77), получим

$$a^2 f_1''(at - x) + a^2 f_2''(at + x) - k_1 a^2 + k_1 a^2 = a^2 f_1''(at - x) + a^2 f_2''(at + x).$$

Следовательно, выражение (2.78) является решением уравнения (2.77), записанное в виде двух произвольных функций f_1 и f_2 , аргументов $at - x$, $at + x$. Для решения поставленной задачи достаточно определить вид этих функций от аргумента z , который для функции f_1 имеет вид $z = at - x$, а для функции $f_2 - z = at + x$. Найдем их вид, исходя из начальных и граничных условий сформулированной задачи.

За начальный момент $t = 0$ примем момент удара ударного инструмента по верхнему основанию анкера. Этот удар будет распространяться вниз по анкеру со скоростью a , при этом во всех сечениях, не захваченных этой волной, $\frac{\partial U}{\partial x}$ и $\frac{\partial U}{\partial t}$ будут равны нулю и, следовательно, их вторые производные для этого периода времени также будут равны нулю. С учетом этого, из уравнения (2.77) получим, что $k_1 = 0$ для сечений, не захваченных этой волной.

С другой стороны, можно считать, что для всех сечений и всех моментов времени справедливы уравнения (2.77) и его общее решение (2.78), если k_1 удовлетворяет следующим условиям в зависимости от величины $at + x$:

$$\begin{aligned} 1) \quad k_1 &= 0, \text{ при } at + x < \ell; \\ 2) \quad k_1 &= \frac{\ell_0 \cdot q}{S \cdot E}, \text{ при } at + x > \ell. \end{aligned} \quad (2.81)$$

Найдем вид функции $f_2(z)$. Так как по условию на нижнем конце анкера напряжения отсутствуют, то продифференцировав выражение (2.78) по x и приравняв в полученной частной производной $x = 0$ (нижнее сечение анкера), получим

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_{x=0} = -f_1'(at - x) + f_2'(at + x) = 0,$$

откуда имеем

$$f_2'(z) = f_1'(z); \quad f_2(z) = f_1(z),$$

или, положив $z = at + x$, получим

$$f_2(at + x) = f_1(at + x). \quad (2.82)$$

Подставив (2.82) в общий интеграл (2.78), получим для перемещения $U(x, t)$ выражения вида

$$U = f_1(at - x) + f_1(at + x) - \frac{k_1 x^2}{2}. \quad (2.83)$$

Тогда деформации и скорость сечения $U(x, t)$ выражаются в виде

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -f_1'(at - x) + f_1'(at + x) - k_1 x, \quad (2.84)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = af_1'(at - x) + af_1'(at + x). \quad (2.85)$$

Кроме этого, для $t = 0$ выполняется неравенство $at + x < \ell$ для всех сечений, а значит $k_1 = 0$. Подставив эти величины в уравнения (2.84) и (2.85), получим вид функции $f_1'(z)$ для всех значений $-\ell < z < \ell$.

Для определения функции вне этих границ, воспользуемся условием движения верхнего сечения, удовлетворяющего уравнению (2.30)

$$k_1 \ell \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right)_{x=\ell} = -a \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{x=\ell}. \quad (2.86)$$

Продифференцировав (2.85) по t и подставив полученное выражение (2.84) в уравнение (2.86), получим:

$$k_1 \ell \cdot [f_1''(at - \ell) + f_1''(at + \ell)] = f_1'(at - \ell) - f_1'(at + \ell) + k_1 \ell. \quad (2.87)$$

Так как в уравнении (2.86) $at + x = at + \ell > \ell$ при всех значениях t , то в этом уравнении $k_1 = \frac{l_0 q}{SE}$ (это следует из второго условия (2.81)).

Полагая в уравнении (2.88) $at + \ell = z$ и $at - \ell = z - 2\ell$, после элементарных преобразований, получим

$$f_1''(z) + \frac{1}{k\ell} f_1'(z) = -f_1''(z - 2\ell) + \frac{1}{k\ell} f_1'(z\ell) + \frac{k_1}{k}. \quad (2.88)$$

Ранее было показано, что при $-\ell < z - 2\ell < \ell$ (т.е. при $\ell < z < 3\ell$) $f_1''(z - 2\ell) = 0$ и $f_1'(z\ell) = 0$.

Тогда уравнение (2.88) примет вид

$$f_1''(z) + \frac{1}{k\ell} \cdot f_1'(z) = \frac{k_1}{k}. \quad (2.89)$$

Интегрируя (2.89), получим вид функции $f_1'(z)$

$$f_1'(z) = k_1 \ell + C_1 \cdot e^{\frac{z}{k\ell}}, \quad (2.90)$$

для всех значений z , лежащих в интервале $\ell < z < 3\ell$.

Неизвестная константа C_1 определяется из начального условия: в момент времени $t = 0$ скорость верхнего сечения анкера ($x = \ell$) равна v_0 и имеет вид

$$C_1 = -\left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell\right) \cdot e^{\frac{1}{k}}. \quad (2.91)$$

Следовательно, функция $f_1'(z)$ для $\ell < z < 3\ell$ имеет вид

$$f_1'(z) = k_1 \ell - \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell\right) \cdot e^{\frac{\ell-z}{k\ell}}. \quad (2.92)$$

Скорость нижнего конца анкера получим, подставив в выражение (2.85) $x = 0$. Получим

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{x=0} = 2af_1'(at). \quad (2.93)$$

Тогда, учитывая (2.92), в каждый момент времени, удовлетворяющего условию $\ell < z < 3\ell$, получим

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_{x=0} = 2a \cdot \left[k_1 \ell - \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \right] \cdot e^{\frac{\ell-at}{k\ell}}. \quad (2.94)$$

Время движения анкера T до его остановки (в этот момент времени скорость нижнего конца равна нулю) при условии, что $aT < 3\ell$, определим из соотношения (2.94). После элементарных преобразований получим

$$aT = \ell - k\ell \cdot \ln \frac{k_1 \ell}{\frac{v_0}{a} + k_1 \ell} = \ell \left[1 + k \cdot \ln \left(\frac{v_0}{ak_1 \ell} + 1 \right) \right]. \quad (2.95)$$

Перемещение нижнего конца анкера за промежуток T определим из уравнения (2.83). Функцию $f_1(z)$ для интервала $\ell < z < 3\ell$ определим, интегрируя (2.92)

$$f_1(z) = k_1 \ell z + k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{\ell-z}{k\ell}} + C_2. \quad (2.96)$$

Постоянную C_2 определим, учитывая следующее: при подходе прямой волны к нижнему концу анкера ($x=0$) $at = \ell$ и $U = 0$. Тогда из уравнения (2.90) после элементарных преобразований функция $f_1(z)$ имеем, в нашем случае, вид [183]

$$f_1(z) = k_1 \ell z + k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{\ell-z}{k\ell}} - k_1 e^2 - k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right). \quad (2.97)$$

Перемещение нижнего конца анкера, с учетом вышеизложенного, будет иметь вид

$$(U)_{x=0} = 2f(at) = 2 \left[k_1 \ell at + k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{\ell-at}{k\ell}} - k_1 e^2 - k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \right]. \quad (2.98)$$

Путь L , который пройдет нижний конец анкера (глубина его проникновения) до его остановки, определим из (2.98), приняв $at = T$. После некоторых преобразований получим

$$L = (U)_{\substack{x=0 \\ t=T}} = 2k\ell \cdot \left[\frac{v_0}{a} - k_1\ell \cdot \ln \left(\frac{v_0}{ak_1\ell} + 1 \right) \right], \quad (2.99)$$

или

$$L = 2k\ell \cdot \left[\frac{v_0}{a} - \frac{P}{E \cdot S} \cdot \ln \left(\frac{v_0}{a} \cdot \frac{S \cdot E}{P} + 1 \right) \right]. \quad (2.100)$$

Отметим, что формулу (2.100) можно использовать при условии, что

$$k < \frac{2}{\ln \left(\frac{v_0}{a} \cdot \frac{S \cdot E}{P} + 1 \right)}. \quad (2.101)$$

При несоблюдении условия (2.101) рассмотрим следующую фазу удара, при которой полученная формула (2.99) будет иная.

Полученные результаты, позволяют описать процессы, происходящие при установке анкера с учетом трения со стороны пород и сопротивления, приложенного к его нижнему сечению. Считаем, что движение нижнего конца анкера начинается с момента достижения волны деформаций, распространяющейся снизу вверх. Причем, до этого момента времени он остается неподвижен.

Общее решение уравнения движения анкера, зажато в породе, определяется соотношением (2.55) и для нашего случая имеет вид

$$U = f_1(at - x) - f_1(at + x) - \frac{k_1x^2}{2}. \quad (2.102)$$

Деформации и скорость любого сечения анкера определяются из выражения (2.102) и равны соответственно

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -f_1'(at - x) - f_1'(at + x) - k_1x. \quad (2.103)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = af_1'(at - x) - af_1'(at + x). \quad (2.104)$$

Как было показано ранее, из условия равенства нулю деформаций и скоростей в момент времени $t = 0$ следует, что $f_1'(z) = 0$ для всех значений $-\ell < z < \ell$.

Для определения вида функции $f_1'(z)$ вне этого интервала воспользуемся уравнением движения верхнего конца анкера (2.23).

Подставляя уравнения (2.103), (2.104) в (2.23) и принимая $x = \ell$, получим

$$a^2 \cdot (f_1''(at - x) + f_1''(at + x)) = -a^2 \cdot (f_2''(at - x) + f_2''(at + x)), \quad (2.105)$$

или, полагая $at + \ell = z$,

$$f_1''(z) + \frac{1}{k\ell} f_1'(z) = f_1''(z - 2\ell) - \frac{1}{k\ell} f_1'(z - 2\ell) - \frac{k_1}{k}. \quad (2.106)$$

Так как выше было показано, что при $-\ell < z - 2\ell < \ell$, $f_1'(z - 2\ell) = f_1''(z - 2\ell) = 0$, то для определения функции $f_1'(z)$ получим (аналогичное ранее) уравнение, окончательное решение которого с учетом того, что при $t = 0$ скорость верхнего конца анкера равна v_0 , имеет вид

$$f_1'(z) = -k_1\ell + \left(\frac{v_0}{a} + k_1\ell \right) \cdot e^{\frac{\ell-z}{k\ell}}, \quad (2.107)$$

для $\ell < z < 3\ell$.

После элементарных преобразований получим, что при достижении прямой волны нижнего конца анкера деформация $\frac{\partial U}{\partial x}$ будет равна

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{\substack{x=0 \\ at=\ell}} = -2 \frac{v_0}{a}. \quad (2.108)$$

Отсюда, с учетом (2.107) и того, что величина $\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0}$ отрицательная, следует, что должно выполняться условие:

$$k_1\ell < 2 \frac{v_0}{a}. \quad (2.109)$$

Кроме того, считаем, что величина P меньше абсолютного значения $\left(k_1\ell - 2 \frac{v_0}{a} \right)$, так как в противном случае нижний конец дает отраженную волну

деформации вверх, оставаясь неподвижным. Это условие может быть выражено неравенством вида

$$\frac{P}{SE} = p < 2 \frac{v_0}{a} - k_1 \ell. \quad (2.110)$$

Следовательно, при соблюдении условий (2.109) и (2.110) движение нижнего конца анкера начнется в момент подхода к нему прямой волны деформаций.

Общий интеграл движения запишем в виде

$$U = f_1(at - x) + f_1(at + x) - \frac{k_1 x^2}{2} - px. \quad (2.111)$$

В начальный момент $t = 0$ (начало движения анкера) упругое состояние анкера описывается в момент достижения прямой волны нижнего сечения, и согласно ранее полученному решению, представим в виде

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{at=\ell} &= k_1 \ell - \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{x}{k\ell}} - k_1 x, \\ \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{at=\ell} &= -a \left[-k_1 \ell + \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{x}{k\ell}} \right]. \end{aligned} \quad (2.112)$$

С другой стороны, из (2.111) имеем

$$\frac{\partial U}{\partial x} = f_1'(at - x) + f_1'(at + x) - k_1 x - px, \quad (2.113)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = af_1'(at - x) + af_1'(at + x). \quad (2.114)$$

Подставив в (2.113) и (2.114) $t = 0$ (момент начала движения анкера) и учитывая (2.112), получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{t=0} &= -f_1'(-x) + f_1'(x) - k_1 x - p = k_1 \ell - \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{x}{k\ell}} - k_1 x; \\ \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{t=0} &= af_1'(-x) + af_1'(x) = -a \left[-k_1 \ell + \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{\frac{x}{k\ell}} \right], \end{aligned} \quad (2.115)$$

для всех значений $x \in [0; \ell]$.

Окончательно функция $f_1'(z)$ будет иметь вид:

$$f_1'(z) = k_1 \ell - \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{-\frac{z}{k\ell}} + \frac{P}{2}, \text{ при } 0 < z < \ell. \quad (2.116)$$

$$f_1'(z) = -\frac{P}{2}, \text{ при } -\ell < z < 0. \quad (2.117)$$

Вид самой функции $f_1(z)$ после элементарных преобразований определим следующим соотношением:

$$f_1(z) = (k_1 \ell + p)z + k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{-\frac{z}{k\ell}} - k\ell \cdot \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right), \quad (2.118)$$

а внедрение анкера (перемещение его нижнего конца) – равенством

$$(U)_{x=0} = 2f_1(at). \quad (2.119)$$

Следовательно, путь L , пройденный анкером до его остановки, т.е. при $t = T$ определится по формуле

$$L = 2k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) - 2(k_1 \ell + p)aT - 2k\ell \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) e^{-\frac{aT}{k\ell}}, \quad (2.120)$$

где время T определяем из уравнения

$$k_1 \ell - \left(\frac{v_0}{a} + k_1 \ell \right) \cdot e^{-\frac{aT}{k\ell}} + \frac{P}{2} = 0. \quad (2.121)$$

Полученные формулы позволяют, зная T и L , определить неизвестные величины k_1 и p и, наоборот.

Для параметра L , с учетом (2.120), можно получить более простую формулу, которая примет вид

$$L = -2k_1 \ell aT - 2p \cdot \left(aT + \frac{k\ell}{2} \right) + 2k\ell \cdot \frac{v_0}{a}. \quad (2.122)$$

Таким образом, в разделе разработана математическая модель установки в породный массив анкера с диаметром бóльшим, чем проходного шпура, при динамическом нагрузке, учитывающая геометрические параметры, механические характеристики, сопротивление его перемещению по сечению и длине, деформации, зависящие от волновых процессов, на основании которой можно определить длину, время (скорость) продвижения анкера в породном массиве, напряжения, возникающие в нем и в горных породах.

2.4 Напряженное состояние породного массива с учетом коэффициента динамичности нагрузки

Приведенный выше метод решения задачи, использующий методы механики массива горных пород при установлении анкера под действием динамической нагрузки с учетом волновых процессов, позволяет определять одноосное его напряженно-деформированное состояние. Однако он не дает ответ, какие напряжения, возникают в горных породах, за счет чего анкер удерживается в проходном шпуре, как сопряженная система, в которой возникает плоское напряженное состояние, какое минимальное отношение диаметров анкера и проходного шпура обеспечивает надежное крепление породного массива. Кроме этого, ранее не учитывали кинетическую и потенциальную энергии ударного устройства, то есть динамичное воздействие нагрузки на анкер, что влияет на его напряженное состояние.

При решении данной задачи рассмотрим упругие деформации анкера и массива горных пород при плоском напряженном состоянии.

При установке анкера на сопрягаемых с массивом контактных поверхностях, вследствие упругих деформаций, возникает давление и соответствующее ему трение, обеспечивающее необходимую их неподвижность.

Используем методы расчета на прочность сопрягаемых деталей (вал-отверстие), используемых в сопротивлении материалов и, в частности – машиностроении [184].

Разность между размерами проходного шпура и анкера определяет характер соединения – так называемую посадку, то есть степень их неподвижности.

Необходимая величина натяга соединения определяется соответствующим давлением q на посадочной поверхности, которое должно быть таким, чтобы силы трения оказались больше внешних сдвигающих сил.

При нагружении соединения двух тел нагрузкой, силы трения N , определяем из выражения

$$N = \frac{q}{Sf} = \frac{q}{\pi Dlf} = \frac{q}{\pi k_0 dlf}, \quad (2.123)$$

где f – коэффициент трения.

Для нагрузки должно выполняться условие

$$P_{ст} \geq N. \quad (2.124)$$

Силы трения связаны с натягом δ зависимостью Ляме, то есть в нашем случае

$$P_{ст} = N = \delta D \left(\frac{c_1}{E} + \frac{c_2}{E_1} \right)^{-1}, \quad \delta = (D - d), \quad (2.125)$$

$$c_1 = \frac{1 + (k_0^2)^{-1}}{1 - (k_0^2)^{-1}} - \nu; \quad c_2 = \frac{1 + k_2^2}{1 - k_2^2} + \nu_{п},$$

где E_1, ν_1 – модуль упругости, МПа, и коэффициент Пуассона породы соответственно;

k_2 – отношение диаметра поверхности контакта к диаметру зоны влияния анкера. Для стали и породы принимаем $k_2 = 1/5$.

Как правило, наибольшие радиальные σ_r и окружные σ_t напряжения возникают у внутренней поверхности породного массива, а наибольшее эквивалентное напряжение σ_3 , равно их разности, они определяются по зависимостям

$$\sigma_r = -q, \quad \sigma_t = q \frac{1 + (k_0^2)^{-1}}{1 - (k_0^2)^{-1}}. \quad (2.126)$$

$$\sigma_3 = \sigma_r - \sigma_t = \frac{2q}{1 - (k_0^2)^{-1}} \leq \sigma_{\text{шт}}. \quad (2.127)$$

Максимальное эквивалентное напряжение равно

$$\sigma_3 = 2q. \quad (2.128)$$

Вышеприведенные зависимости (2.126) для исследования напряженного состояния горного массива получены при действии на анкер статической нагрузки, то есть она медленно нарастает от нуля до своего максимального значения и сжимает анкер на величину $\delta_{\text{ст}}$ [185]. Кроме этого, сопоставим результаты вышеприведенной теории, учитывающей волновые процессы, с теориями по расчету на удар при осевом действии нагрузки на сваю или под воздействием массы бойка на анкер при установке дюбеля в отверстие меньшего отверстия.

В первом случае при осевом на него ударе скорость в очень короткий промежуток времени изменяется на конечную величину. Получающиеся при этом большие ускорения приводят к возникновению значительных инерционных сил, действующих в направлении, противоположном направлению ускорений, то есть в направлении движения анкера.

Статические и динамические перемещения при сжатии определяют по зависимостям соответственно [186, 187].

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{P_{\text{ст}}}{c}; \quad \sigma_{\text{д}} = k_{\text{д}} \delta_{\text{ст}}. \quad (2.129)$$

Изменение деформации при ударном действии нагрузки по сравнению с деформацией при статическом приложении той же нагрузки характеризуется коэффициентом динамичности

$$k_{\text{д}} = \frac{\delta_{\text{д}}}{\delta_{\text{ст}}}, \quad (2.130)$$

откуда динамическая деформация через статическую деформацию выражается зависимостью

$$\delta_{\text{д}} = k_{\text{д}} \delta_{\text{ст}}. \quad (2.131)$$

Учитывая линейную связь между напряжением и деформацией, различные модули упругости анкера и горных пород при статическом и ударном действии нагрузок, связь между соответствующими напряжениями имеет вид

$$\sigma_d = k_d \sigma_{ст}. \quad (2.132)$$

где

$$\sigma_{ст} = \frac{P_{ст}}{S}. \quad (2.133)$$

Здесь $\sigma_{ст}$ – напряжения, возникающие в анкере при сжатии, МПа.

Для того, чтобы использовать формулу (2.132), нужно определить коэффициент динамичности k_d . При этом будем исходить из общепринятого в теории удара допущения, что связь между усилиями и деформациями сохраняется одной и той же, как при статической, так и при динамической нагрузках, то есть

$$\delta_d = \frac{P_d}{c}, \quad (2.134)$$

где P_d – динамическая нагрузка, представляющая собой силу инерции ударного устройства в первый момент его соприкосновения с анкером;

$c = EF/l$ – жесткость анкера, Н/м;

Изменение кинетической энергии ударного устройства численно равно работе, совершенной им при ударе и деформации анкера

$$T = P(H + \delta_d), \quad (2.135)$$

где H – расстояние между ударным устройством и анкером, м.

Потенциальную энергию деформации упругого тела при ударе, накопленную за счет ее уменьшения падающего тела, учитывая выражение (2.134) между усилием и деформацией, можно представить в виде

$$U_d = \frac{1}{2} P_d \delta_d = \frac{c \delta_d^2}{2}. \quad (2.136)$$

При равенстве этих энергий из выражений (2.136) и (2.137) следует

$$\frac{c \delta_d^2}{2} = P(H + \delta_d). \quad (2.137)$$

Учитывая, (2.134) уравнение (2.137) представим в виде

$$\delta_d^2 - 2\delta_{ст}\delta_d - 2\delta_{ст}H = 0,$$

откуда следует

$$\delta_d = \delta_{ст}\sqrt{\delta_{ст}^2 + 2\delta_{ст}H}. \quad (2.138)$$

Знак минус в этой формуле не соответствует физической сущности рассматриваемой задачи, поэтому следует сохранить знак плюс.

Представим формулу (2.138) в виде

$$\delta_d = \delta_{ст}\left(1 + \left(1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}\right)^{\frac{1}{2}}\right). \quad (2.139)$$

и сопоставив ее с формулой (2.131), получим выражение для коэффициента динамичности

$$k_d = 1 + \left(1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.140)$$

Имея в виду, что $H = \frac{v_0^2}{2g}$ (v_0 – скорость устройства в начале удара), коэффициент динамичности представим в виде

коэффициент динамичности представим в виде

$$k_d = 1 + \left(1 + \frac{v_0^2}{g\delta_{ст}}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.141)$$

а с учетом

$$\frac{2H}{\delta_{ст}} = \frac{PH}{\frac{1}{2}P\delta_{ст}} = \frac{T_0}{U_{ст}},$$

его запишем следующим образом:

$$k_d = 1 + \left(1 + \frac{T_0}{U_{ст}}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.142)$$

где T_0 – кинетическая энергия ударного устройства к моменту воздействия на анкер;

U – потенциальная энергия деформации анкера, подвергающегося удару, которая накапливается в нем при статическом действии силы, равной весу ударного устройства P , то есть

$$U_{\text{ст}} = \frac{1}{2} P \delta_{\text{ст}} = \frac{P^2}{2c} = \frac{P^2 l}{2EF}. \quad (2.143)$$

Если $H = 0$, то есть сила прикладывается внезапно, то согласно выражению (2.140) коэффициент динамичности $k_d = 2$. Если расстояние между ударным устройством и анкером H значительно больше $\delta_{\text{ст}}$, то при его определении в выражениях под корнем вторым слагаемым по сравнению с единицей можно пренебречь. Тогда выражение (2.140) примет вид

$$k_d = 1 + \left(\frac{2H}{\delta_{\text{ст}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.144)$$

Или, согласно формуле (2.142)

$$k_d = 1 + \left(\frac{T_0}{U_{\text{ст}}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.145)$$

С учетом выражения для коэффициента динамичности (2.140) напряжение при ударе на основании зависимости (2.141) примет вид

$$\sigma_d = k_d \sigma_{\text{ст}} = \sigma_{\text{ст}} \left(1 + \left(1 + \frac{2H}{\delta_{\text{ст}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (2.146)$$

или

$$\sigma_d = \sigma_{\text{ст}} \left(1 + \left(\frac{2H}{\delta_{\text{ст}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) = \frac{P}{F} + \left(\frac{2PHE}{lF} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.147)$$

Аналогично определяем и усилие при ударе

$$P_d = \sigma_d F = P_{ст} \left(1 + \left(1 + \frac{2H}{\delta_{ст}} \right)^{\frac{1}{2}} \right). \quad (2.148)$$

Приведенная приближенная теория расчета на удар имеет определенные пределы применения. Они обусловлены скоростью ударного устройства к моменту удара и жесткостью анкера, что выражается в формулах (2.140) или (2.142) отношением $\frac{2H}{\delta_{ст}}$ или $\frac{T_0}{U_{ст}}$. Так, если

$$\frac{2H}{\delta_{ст}} = \frac{T_0}{U_{ст}} \leq 100, \quad (2.149)$$

то ошибка расчета не превышает 10%.

Рассмотрим зависимость перемещения и напряжений от массы ударного устройства, его скорости движения, геометрических и механических характеристик анкера.

Тогда перемещение анкера и возникающие в нем напряжения имеют вид [188].

$$\delta_d = \left(\frac{ml}{EF} v_0^2 \right)^{\frac{1}{2}}; \quad \sigma_d = -E \frac{\delta_d}{l} = -E \left(\frac{m}{IEF} v_0^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.150)$$

Далее приведены разработанные структурные блок-схемы алгоритмов решения задач по оценке устойчивости анкера (см. рисунок 2.5) и возникающих в нем и горных породах напряжений (см. рисунок 2.6), где указана последовательность операций с указанием в скобках зависимостей.

Выполненные расчеты указанных ранее величин искомых параметров после обработки с помощью пакета прикладных программ «Statistika» позволили получить поверхности, описывающие их изменение от безразмерных параметров: отношение диаметров анкера и шпура $d_a/d_{ш}$; отношение модулей упругости и пород и материала анкера E_n/E_a и отношение длины анкера к его диаметру l_a/d_a .

Пределы изменения указанных безразмерных параметров: $1,1 < \frac{d_a}{d_{ш}} < 1,3$;

$$0,054 < \frac{E_n}{E_a} < 0,178; \quad 15 < \frac{l_a}{d_a} < 120.$$

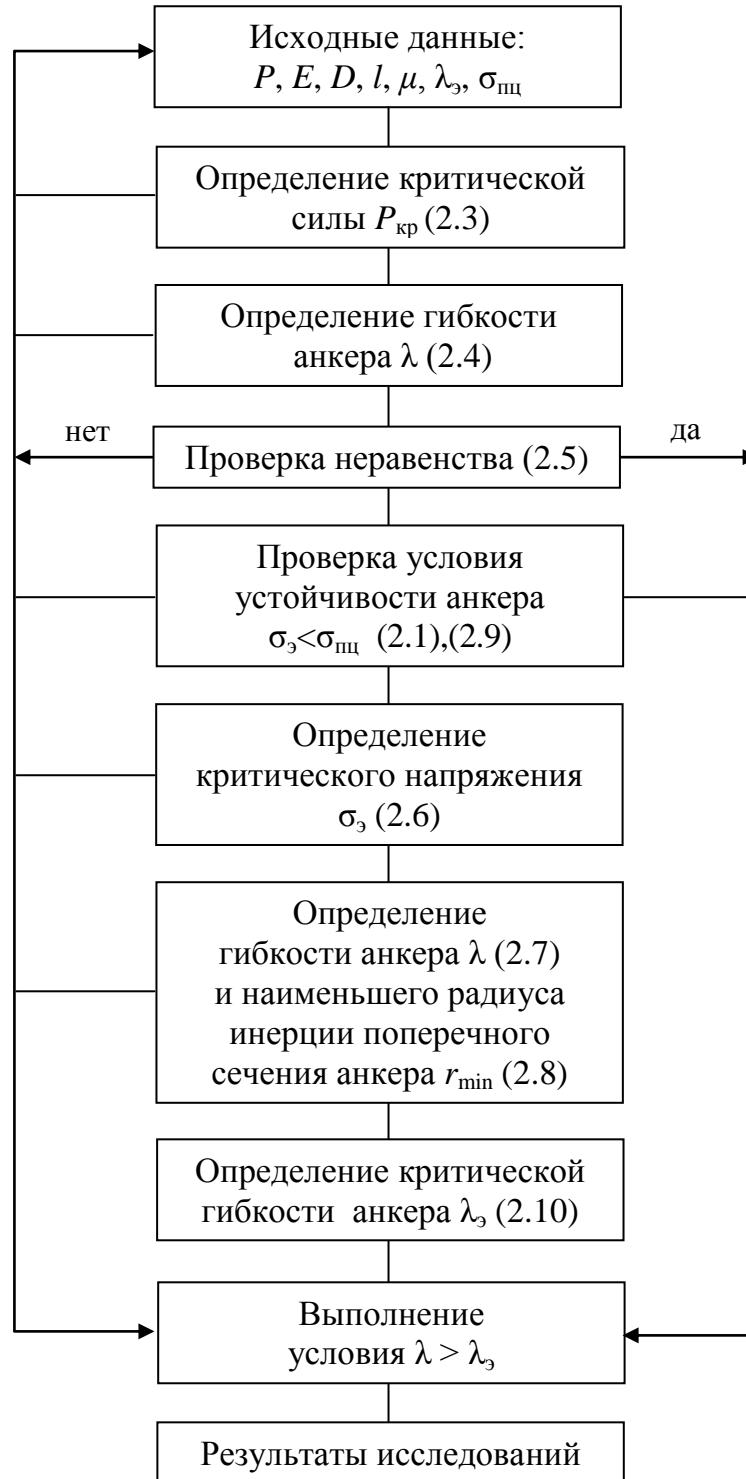
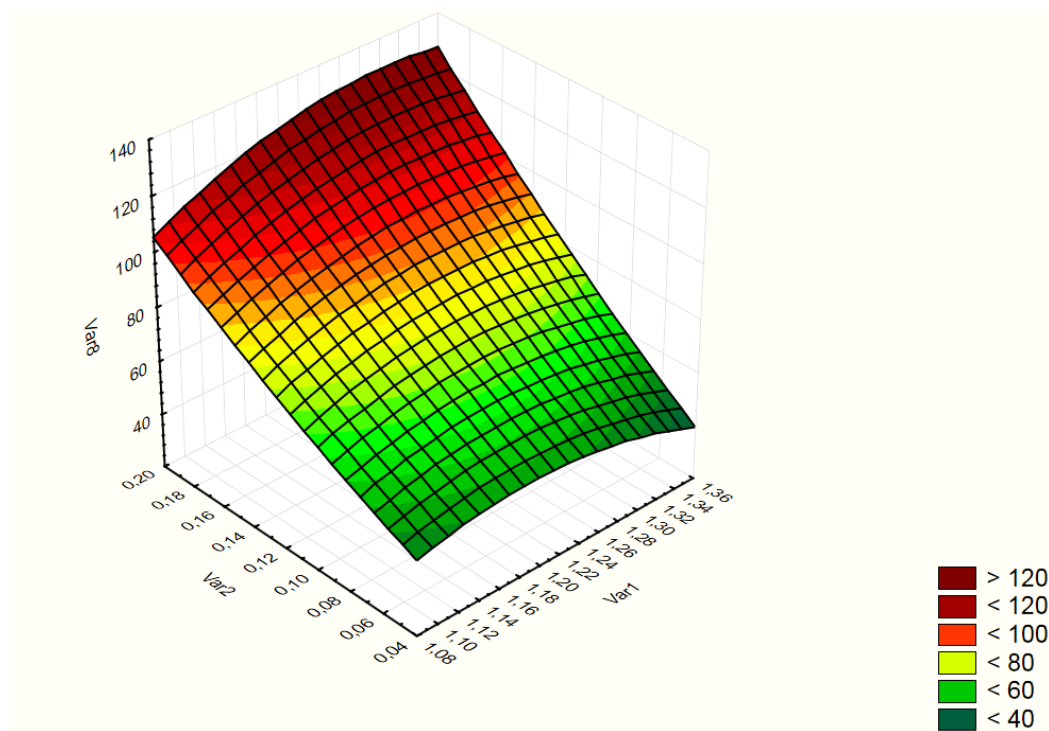


Рисунок 2.5 – Структурная блок-схема алгоритма задачи для определения устойчивости анкера при установке в породный массив



Рисунок 2.6 – Структурная блок-схема алгоритма решения задачи для определения напряжений в анкере и породном массиве под действием ударной нагрузки

На рисунке 2.7 представлена зависимость изменения эквивалентных напряжений, возникающих в анкере на начальном этапе установки от безразмерных параметров ($\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$). Для уменьшения объема представляемого иллюстративного материала поверхность представлена для наиболее неблагоприятного сочетания геометрических параметров анкера ($l_a = 2500$ мм; $d_a = 22$ мм). При остальных сочетаниях геометрических параметров анкера эквивалентные напряжения будут большими, т.е. устойчивость анкера будет обеспечена.



Условные обозначения: $\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;

$\text{Var2}\left(\frac{E_n}{E_a}\right)$ – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ;

$\text{Var8}(\sigma_s)$ – эквивалентные напряжения, МПа.

Рисунок 2.7 – Изменение эквивалентных напряжений, возникающих в анкере на начальном этапе установки от безразмерных параметров ($\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$)

Как видно на рисунке 2.7, максимальное значение эквивалентных напряжений при наиболее неблагоприятном сочетании геометрических параметров анкера находится в пределах от 57 до 115 МПа, что не превышает предел прочности ма-

териала анкера на изгиб ($\sigma_{nu} = 390$ МПа). Это доказывает, что устойчивость анкера на начальном этапе его установки будет обеспечена.

После обработки выше описанных результатов была получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить эквивалентные напряжения в системе «анкер-породный массив»:

$$\sigma_s = 1086,8 \cdot k_o + 505,7 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 468,7 \cdot k_o^2 + 676,1 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} + 560,6 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a} \right)^2 - 588,9, \text{ МПа} \quad (2.151)$$

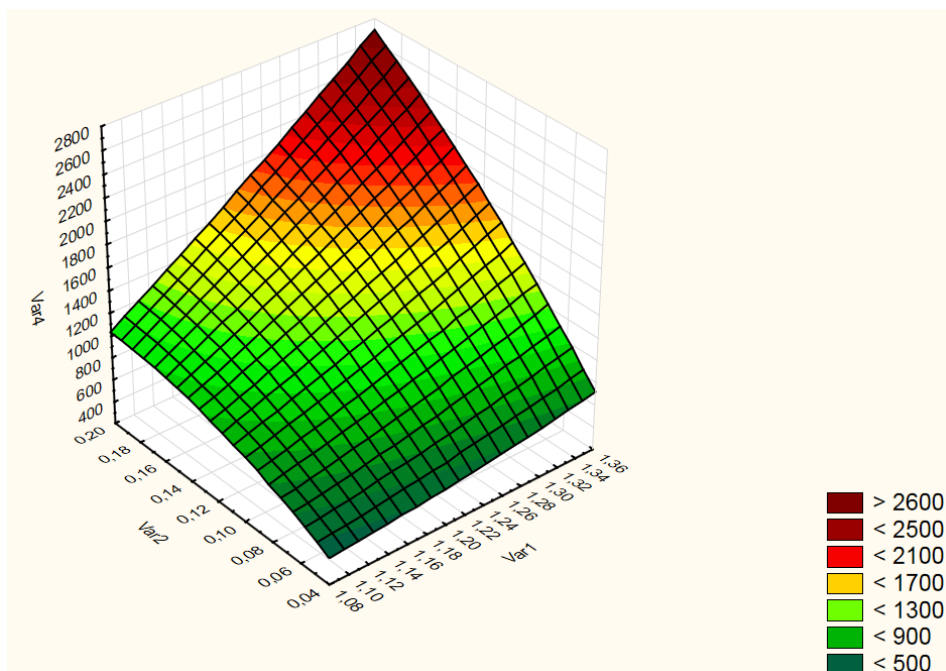
$$R^2 = 0,87.$$

На рисунке 2.8 представлены поверхности, описывающие изменение статических (P_{cm}) и динамических ($P_{дин}$) нагрузок, а также контактного динамического давления на анкер ($q_{дин}$) от безразмерных параметров ($\frac{d_a}{d_{uu}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$) при $\frac{l_a}{d_a} = 120$.

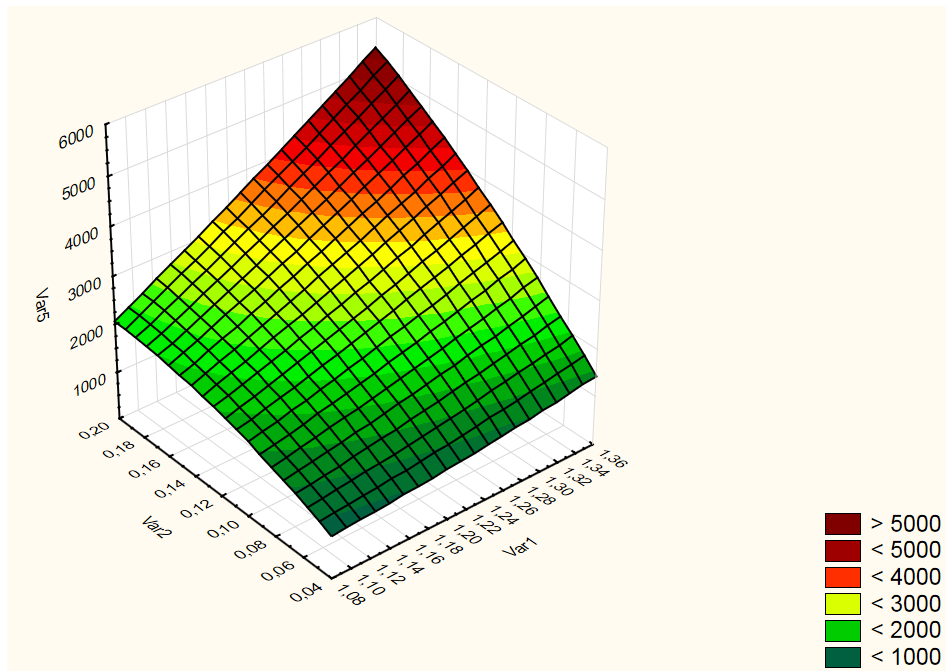
Поверхности, описывающие изменение выше названных параметров при $\frac{l_a}{d_a} = 30; 60$ и 90 представлены в приложении А.

Из рисунка 2.8 и приложения А видно, что статические и динамические нагрузки, а также контактное динамическое давление на анкер нелинейно зависят от изменения безразмерных параметров ($\frac{d_a}{d_{uu}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$) и линейно – от $\frac{l_a}{d_a}$.

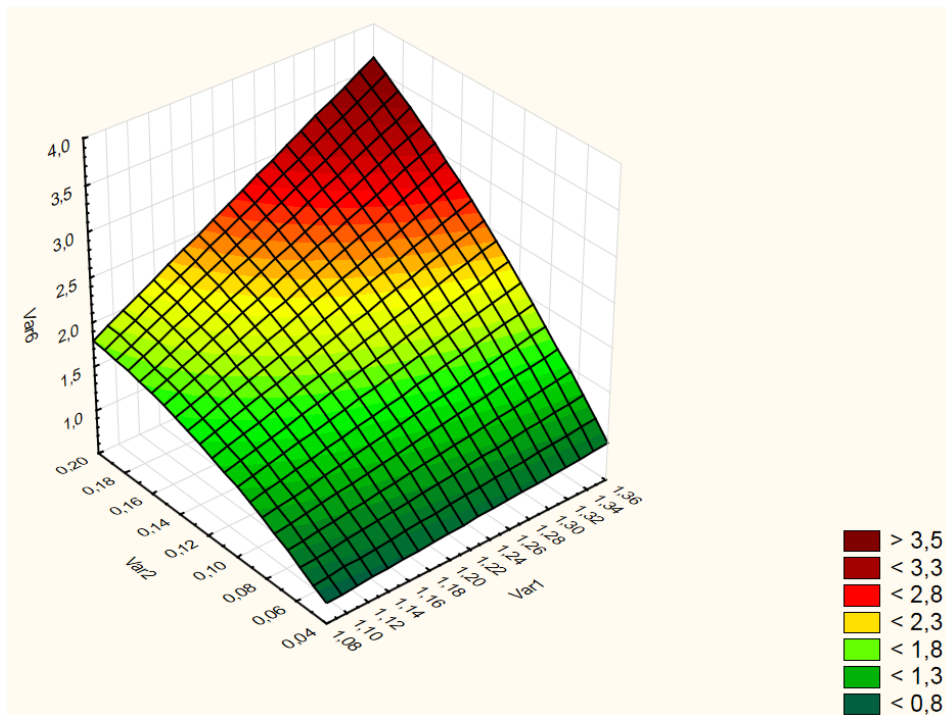
а)



б)



в)



Условные обозначения: $\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;

$\text{Var2}\left(\frac{E_n}{E_a}\right)$ – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ;

$\text{Var4}(P_{ст})$ – статическое усилие закрепления анкера в породе (в натуре), кН;

$\text{Var5}(P_{дин})$ – динамическое усилие закрепления анкера в породе (в натуре), кН;

$\text{Var6}(q_{дин})$ – контактная нагрузка, МПа.

Рисунок 2.8 – Изменение статических (а) и динамических (б) нагрузок, а также контактного динамического давления на анкер (в)

от безразмерных параметров $\left(\frac{d_a}{d_{ш}}\right)$ и $\left(\frac{E_n}{E_a}\right)$ при $\frac{l_a}{d_a} = 120$

После обработки полученных результатов были получены эмпирические зависимости, позволяющие определить изменение статических и динамических нагрузок, а также контактного динамического давления на анкер, от безразмерных влияющих факторов:

$$P_{ст} = \left[23,8 - 36,2 \cdot k_o - 206,4 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 14 \cdot k_o^2 + 258,3 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 173,6 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{l_a}{d_a}, \text{ кН} \quad (2.152)$$

$$R^2 = 0,93.$$

$$P_{дин} = \left[46,7 - 72,3 \cdot k_o - 412,8 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 27,9 \cdot k_o^2 + 516,6 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 347,3 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{l_a}{d_a}, \text{ кН} \quad (2.153)$$

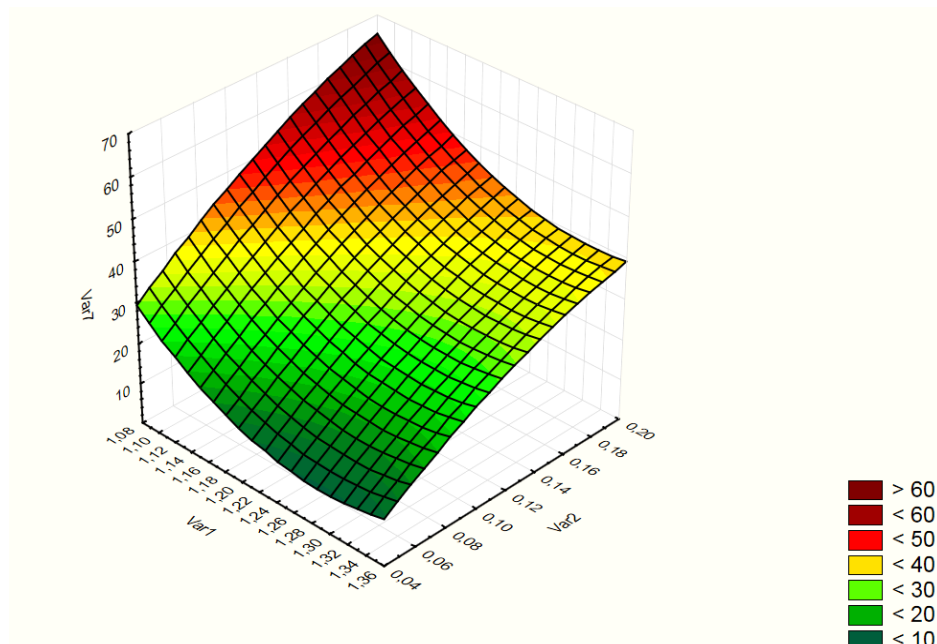
$$R^2 = 0,92.$$

$$q_{дин} = \left[0,84 - 0,59 \cdot k_o - 21 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 0,01 \cdot k_o^2 + 30,3 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 25,8 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a} \right)^2 \right] \cdot \frac{l_a}{d_a} \cdot 10^{-2}, \text{ МПа} \quad (2.154)$$

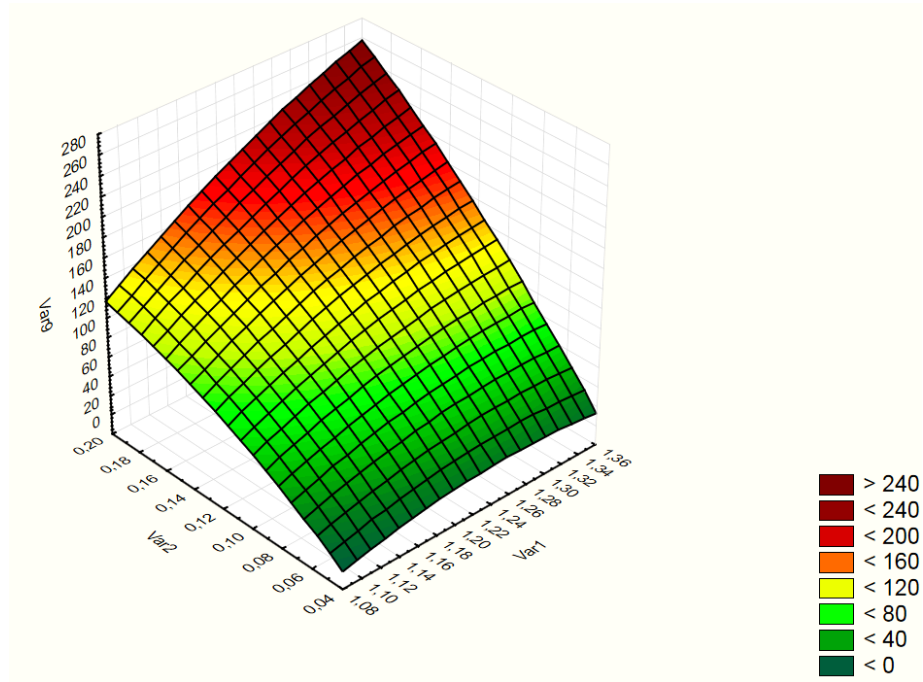
$$R^2 = 0,92.$$

На рисунке 2.9 представлены поверхности, описывающие изменение максимальных динамических напряжений, возникающих в анкере и породах ($\sigma_{дин}^{max}$); времени установки анкеров в шпурь ($T_{уcm}$) и нагрузок для преодоления сил трения при извлечении анкеров (N_s) от безразмерных параметров ($\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$) при $\frac{l_a}{d_a} = 120$.

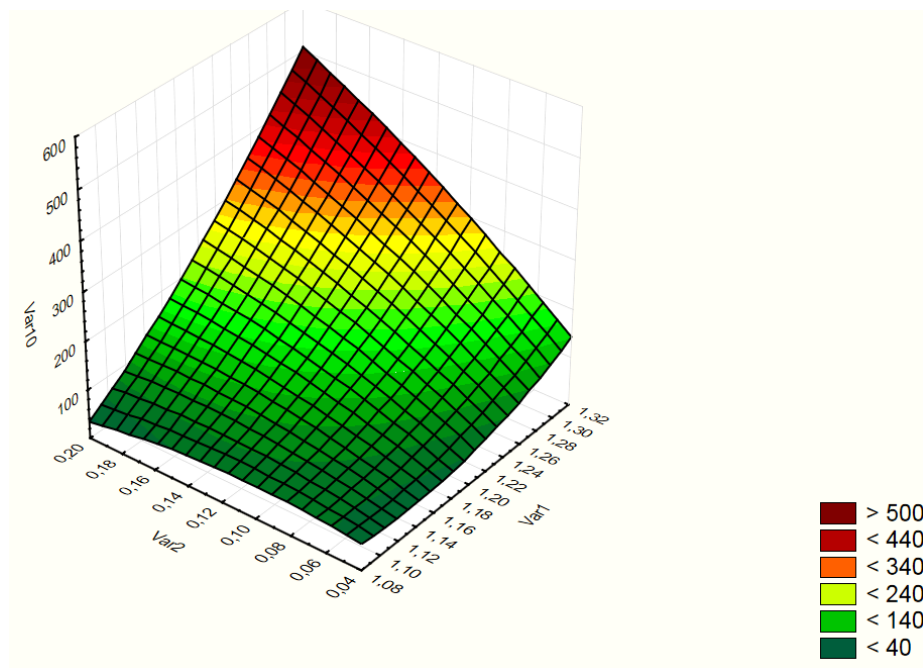
а)



б)



в)



Условные обозначения: $\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$; $\text{Var2}(\frac{E_n}{E_a})$ – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ; $\text{Var7}(\sigma_{дин}^{max})$ – максимальные динамические напряжения, возникающие в анкере и породах, МПа; $\text{Var9}(T_{уст})$ – время установки анкера в шпур, с; $\text{Var10}(N_s)$ – нагрузка, необходимая для преодоления сил трения, кН.

Рисунок 2.9 – Изменение максимальных динамических напряжений, возникающих в анкере и породах (а), времени установки анкеров в шпуры (б) и нагрузок для преодоления сил трения при извлечении анкеров (в) от безразмерных параметров

$$\left(\frac{d_a}{d_{ш}} \text{ и } \frac{E_n}{E_a}\right) \text{ при } \frac{l_a}{d_a} = 120$$

Из рис. 2.9 видно, что максимальные динамические напряжения, возникающие в анкере и породах, время установки анкеров в шпур и нагрузки для преодоления сил трения при извлечении анкеров нелинейно зависят от изменения безразмерных параметров $\left(\frac{d_a}{d_{ш}} \text{ и } \frac{E_n}{E_a}\right)$ и линейно – от $\frac{l_a}{d_a}$.

После обработки полученных результатов были получены эмпирические зависимости, позволяющие определить изменение максимальных динамических напряжений, возникающих в анкере и породах, времени установки анкеров в шпур и нагрузок для преодоления сил трения при извлечении анкеров, от безразмерных влияющих факторов:

$$\sigma_{дин}^{max} = \left[6,2 - 9,7 \cdot k_o + 4,8 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 3,8 \cdot k_o^2 - 1,6 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 4,8 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2 \right] \cdot \frac{l_a}{d_a}, \text{ МПа} \quad (2.155)$$

$$R^2 = 0,91.$$

$$T_{уст} = \left[13,6 \cdot k_o - 15,2 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 5,8 \cdot k_o^2 + 24,7 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 20,7 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2 - 8,4 \right] \cdot \frac{l_a}{d_a}, \text{ с} \quad (2.156)$$

$$R^2 = 0,92.$$

$$N_s = \left[33,3 - 55,2 \cdot k_o - 89,5 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 22,9 \cdot k_o^2 + 88,5 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 29,8 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2 \right] \cdot \frac{l_a}{d_a}, \text{ кН} \quad (2.157)$$

$$R^2 = 0,84.$$

2.5 Выводы по второму разделу

1. Получены зависимости критической нагрузки на анкер и возникающие в нем эквивалентные напряжения при закреплении породного массива в начальный момент времени, учитывающие его геометрические параметры (длину и диаметр), механические характеристики (модуль упругости, предел пропорциональности), коэффициент длины (условия закрепления), гибкость. Это позволяет выбрать па-

раметры, обеспечивающие устойчивость анкера при закреплении под действием нагрузки.

2. Доказано, что устойчивость сплошного металлического анкера, изготовленного из стали с маркой 4 и выше, с большим диаметром, чем у направляющего шпура, на начальном участке закрепления его в породном массиве под действием нагрузки с коэффициентом динамичности, равным двум, обеспечивается при длине анкера до 2,5 м и диаметре более 22 мм.

3. Разработана расчетная схема и математическая модель НДС анкера при закреплении породного массива под действием нагрузки, учитывающая его геометрические параметры и прочностные характеристики, сопротивления в продольном направлении, сил трения по боковой поверхности, волновые процессы, позволяющая определить деформации, скорость, длину и время закрепления анкера, необходимые для обеспечения его надежности с точки зрения прочности.

4. Получены зависимости для определения контактного давления, статической нагрузки, напряжений в системе «породный массив – анкер» от отношения диаметров анкера и шпура k_0 , их механических характеристик (модулей упругости и коэффициентов Пуассона) и коэффициента динамичности нагрузки, в том числе для извлечения после эксплуатации, позволяющие определить параметры ударного устройства.

5. Получены зависимости для определения времени установки и суммарных напряжений, возникающих в анкере за счет сопротивления в продольном направлении и деформаций в результате действия акустических волн от максимальной нагрузки и геометрических параметров.

РАЗДЕЛ 3

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАГРУЗОК ПРИ УСТАНОВКЕ И ИЗВЛЕЧЕНИИ АНКЕРОВ В ХОДЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА

3.1 Методика проведения исследований лабораторных условиях

Лабораторные исследования проводились с целью подтвердить техническую возможность реализации предложенного способа установки анкеров, экспериментально определить его основные параметры, обеспечивающие устойчивость анкеров в ходе установки и системы «анкер – породный массив» после ее завершения, а также проверки адекватности математических моделей, разработанных во втором разделе диссертации.

Согласно патенту [92] сущность предложенного способа установки анкеров заключается во вдавливании стержня анкера в предварительно пробуренный направляющий шпур с меньшим, чем у анкера диаметром.

Основными параметрами способа являются: диаметры анкера и направляющего шпура, сосредоточенная (распределённая) нагрузка для установки анкера в шпуре, длина анкера, нагрузка для преодоления сил трения при извлечении анкера из шпура (несущая способность анкера), время его установки, плотность установки анкеров на закрепляемой поверхности.

В связи с тем, что на значения перечисленных величин оказывает влияние большое количество различных факторов, часть из которых сложно учесть, а также со значительными трудностями проведения исследований в шахтных условиях, для установления параметров способа был принят метод физического моделирования.

В основу моделирования положена хорошо апробированная теория подобия И. Ньютона, развитая в работах Г.Н. Кузнецова, И.Д. Насонова [143, 189].

Сущность её проведения заключается в следующем. Для того, чтобы меха-

нические процессы развивались в модели как в натуре должны соблюдаться условия геометрического и механического подобия [190, 191].

Установка анкера в шпур может производиться как статической, так и динамической нагрузкой.

Обозначим индексом (1) параметры модели, индексом (2) – натуре.

При одинаковых отношениях геометрических размеров геометрическое подобие имеет вид

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{d_1}{d_2} = C_e, \quad (3.1)$$

где l_1, l_2 – длина анкера соответственно в натуре и в модели, м;

d_1, d_2 – диаметр анкера соответственно в натуре и в модели, м;

C_e – множитель подобия.

При определении устойчивости анкера условие механического подобия при статической нагрузке имеет вид

$$\frac{P_1 l_1^2}{E_1 I_1} = \frac{P_2 l_2^2}{E_2 I_2}, \quad (3.2)$$

где P_1, P_2 – нагрузка для установки анкера соответственно в натуре и в модели, кН;

E_1, E_2 – модуль упругости материалы анкера соответственно в натуре и в модели, МПа;

I_1, I_2 – модуль инерции соответственно в натуре и в модели, м⁴;

В нашем случае модули упругости материала анкера в модели (E_1) и в натуре (E_2) равны.

Тогда силу, которую необходимо приложить к образцу анкера при закреплении его в породе с использованием статической нагрузке, определяем из выражения

$$P_1 = P_2 \frac{l_2^2 I_1}{l_1^2 I_2}. \quad (3.3)$$

Моменты инерции модели (I_1) и натуре (I_2) определим из выражений:

$$I_1 = \frac{\pi d_1^4}{64}; \quad I_2 = \frac{\pi d_2^4}{64}.$$

Тогда выражение (3.3) примет вид

$$P_1 = \frac{l_2^2 d_1^4}{l_1^2 d_2^4} P_2. \quad (3.4)$$

Из второго закона механики Ньютона для двух механических систем, находящихся под воздействием динамической нагрузки

$$P_1 = m_1 a_1; \quad P_2 = m_2 a_2, \quad (3.5)$$

где m – масса анкера, кг;

a_1, a_2 – ускорения движения анкера, м/с.

С помощью масштабных преобразований приведем эти уравнения к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{1,0} P_1; & p_2 &= p_{2,0} P_2; \\ m_1 &= m_{1,0} M_1; & m_2 &= m_{2,0} M_2; \\ a_1 &= a_{1,0} A_1; & a_2 &= a_{2,0} A_2. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Подставляя выражения (3.6) в (3.5), получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_{1,0}}{m_{1,0} a_{1,0}} \right) P_1 &= M_1 A_1; \\ \left(\frac{p_{2,0}}{m_{2,0} a_{2,0}} \right) P_2 &= M_2 A_2. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Уравнения (3.7) будут тождественно одинаковыми в том случае, если коэффициенты в скобках будут равны между собой.

Тогда

$$\left(\frac{p_{2,0}}{m_{2,0} a_{2,0}} \right) = \left(\frac{p_{1,0}}{m_{1,0} a_{1,0}} \right); \quad \frac{p_{1,0}}{p_{2,0}} = \frac{m_{1,0} a_{1,0}}{m_{2,0} a_{2,0}}, \quad (3.8)$$

или

$$C_p = C_m C_a. \quad (3.9)$$

Выражая массу анкера через объем и плотность, а ускорение – через линейные размеры и время, получим

$$\frac{\rho_{1,0} \tau_{1,0}^2}{\rho_{1,0} l_{1,0}^4} = \frac{\rho_{2,0} \tau_{2,0}^2}{\rho_{2,0} l_{2,0}^4} = \frac{\rho \tau^2}{\rho l^4} = idem, \quad (3.10)$$

или

$$\frac{C_p C_\tau^2}{C_\rho C_l^4} = 1; \quad \frac{C_p}{C_\rho C_l^2 C_v^2} = 1. \quad (3.11)$$

Следовательно, для обеспечения условий динамического механического подобия должно соблюдаться условие связей (3.11) между множителями подобия.

Учитывая, что плотность модели и природы одинаковая, можно определить из выражения (3.10) время установки анкера.

В частности, используя зависимости (3.5) при статической нагрузке, получим кинематическое подобие

$$P_1 = (m_1/m_2)P_2. \quad (3.12)$$

До начала проведения экспериментов для испытуемых пород определяли прочность пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и модуль упругости $E_{п}$. Прочность на одноосное сжатие определялось методом прямых испытаний с помощью гидравлического пресса на образцах породы цилиндрической формы, изготовленных их кернов. Для определения модуля упругости испытания проводились в режиме многократного нагружения на сжатие с последующей разгрузкой. По результатам испытаний строились графики «напряжения-деформации», по которым определялись модули упругости пород.

Значения физико-механических свойств пород, из которых изготавливались модели, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения физико-механических свойств пород

№ п/п	Наименование породы	Плотность породы, кг/м ³	Модуль упругости породы, МПа	Прочность породы на одноосное сжатие, МПа
1	Глинистый сланец	2520	1,08·10 ⁴	28
2	Песчаный сланец	2460	1,9·10 ⁴	39
3	Песчаник	2420	3,65·10 ⁴	53

В связи с тем, что при выполнении эксперимента имело место перекрестное влияние исследуемых безразмерных факторов (отношений диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$; модулей упругости породы E_p и материала анкера E_a ; длины анкера l_a к его диаметру d_a), было принято решение о проведении полного факторного эксперимента, матрица проведения которого представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица полного факторного эксперимента типа 2³

Матрица ПФЭ – 2 ³										Условия опыта			
Серия	Код опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	Взаимодействия				Код уровня	Выход		
						x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$		y_1	y_2	y_3
I	d	+	-	-	-	+	+	+	-	(1)			
	p	+	-	-	-	+	+	+	-	(1)			
	m	+	-	-	-	+	+	+	-	(1)			
II	d	+	+	-	-	-	-	+	+	a			
	p	+	+	-	-	-	-	+	+	a			
	m	+	+	-	-	-	-	+	+	a			
III	d	+	-	+	-	-	+	-	+	b			
	p	+	-	+	-	-	+	-	+	b			
	m	+	-	+	-	-	+	-	+	b			
IV	d	+	+	+	-	+	-	-	-	ab			
	p	+	+	+	-	+	-	-	-	ab			
	m	+	+	+	-	+	-	-	-	ab			
V	d	+	-	-	+	+	-	-	+	c			
	p	+	-	-	+	+	-	-	+	c			
	m	+	-	-	+	+	-	-	+	c			
VI	d	+	+	-	+	-	+	-	-	ac			
	p	+	+	-	+	-	+	-	-	ac			
	m	+	+	-	+	-	+	-	-	ac			
VII	d	+	-	+	+	-	-	+	-	bc			
	p	+	-	+	+	-	-	+	-	bc			
	m	+	-	+	+	-	-	+	-	bc			
VIII	d	+	+	+	+	+	+	+	+	abc			
	p	+	+	+	+	+	+	+	+	abc			
	m	+	+	+	+	+	+	+	+	abc			

К искомым величинам (y_i) относились: статическая и динамическая нагрузки при установке анкера в шпур ($P_{ст}$ и $P_{дин}$), нагрузка на преодоление сил трения при извлечении анкера из шпура (N_s) и время установки анкера в шпур ($T_{уст}$).

С учётом теории планирования экспериментов, изложенной в работах [189] был составлен план его проведения и обработки результатов. Он позволил реализовать все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов, каждый из которых варьируется на двух уровнях. Число этих комбинаций $N = 2^k$.

Для получения регрессионных зависимостей искомым величин от влияющих факторов производилось следующее. Сначала выбирался общий вид зависимости, описывающей исследуемый процесс. Исследуемые факторы кодировались путём линейного преобразования. Регрессионная зависимость представляла собой разложение в степенной ряд, неизвестные коэффициенты которого определялись путем решения алгебраических уравнений методом наименьших квадратов [190, 191].

Кроме того, с целью сопоставления результатов экспериментальных и теоретических исследований дополнительно рассчитывались значения эквивалентных напряжений и критических нагрузок при статической нагрузке, а также суммарных напряжений при динамической установке анкера.

Обработка результатов исследований производилась путем построения одно- и многофакторных зависимостей:

1) изменения динамических и статических нагрузок при установке, а также статических нагрузок при извлечении от безразмерных параметров (отношение диаметров анкера и шпура – k_0 ; отношение механических характеристик породы и материала анкера – $E_{п}/E_a$; отношение геометрических параметров анкера – l_a/d_a);

2) изменения контактной нагрузки, распределённой по боковой поверхности шпура (q) и времени установки анкера в шпур от безразмерных параметров (отношение диаметров анкера и шпура – k_0 ; отношение механических характеристик породы и материала анкера – $E_{п}/E_a$; отношение геометрических параметров анкера – l_a/d_a).

Исследования проводились в три этапа. На первом этапе исследовалась закреплённая анкера в породных образцах статической нагрузкой с помощью гидравлического пресса. При этом определялась величина статической нагрузки для закрепления анкера в горную породу на заданную глубину.

На втором этапе изучалось закрепление анкера в породных образцах с помощью динамической нагрузки. При проведении экспериментов определялись глубина установки анкеров в образцы, а также необходимое для этого время.

На третьем этапе определялась нагрузка, необходимая для преодоления силы трения при извлечении ранее установленных в породу анкеров, а также ее изменение по мере извлечения анкера из породы.

3.1.1 Методика определения статической нагрузки для закрепления анкера

Испытания по определению статической нагрузки для закрепления анкера проводились в лаборатории физико-технического института им. А.А. Галкина на сертифицированном оборудовании, прошедшем плановую поверку.

Перед началом испытаний были отобраны реальные образцы пород (аргиллит, алевролит и песчаник). Для определения их физико-механических свойств определяли:

- прочность пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ методом прямых испытаний на образцах породы цилиндрической формы [192];
- модуль упругости $E_{п}$ в режиме многократного нагружения на сжатие с последующей разгрузкой [192].

По результатам испытаний строились графики «напряжения-деформации», по которым определялись модули упругости пород.

При подготовке к испытаниям отобранные для испытания образцы породы обрабатывались таким образом, чтобы верхняя и нижняя грани были параллельны. Далее с учётом взаимного влияния соседних шпуров производилась их разметка на верхней поверхности образцов. Затем с использованием шаблона в раз-

меченных местах бурились отверстия диаметром 10 мм на глубину 180 мм. После бурения шпуров осуществлялась их продувка компрессором.

Анкера для испытаний изготавливались из стали марки Ст45. Длина анкеров составляла 150 мм. В верхней части анкеров был предусмотрен узел для их последующего извлечения, а для удобства измерения глубины установки на теле анкера выполнялись проточки через каждые 10 мм. Для моделирования различных значений k_0 , анкера изготавливались диаметром от 11 до 13 мм. Общий вид анкеров представлен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Общий вид анкеров

Для определения статической нагрузки при установке анкера в модель снимались показания с манометра пресса, а глубина закрепления анкера фиксировалась по индикатору часового типа пресса и дублировалась по электронному штангенциркулю. Общий вид пресса представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Общий вид пресса

При проведении экспериментов осуществлялась фото- и видеосъёмка.

Для исключения возможных ошибок каждый эксперимент повторялся три раза. Усреднённые данные об изменении нагрузки по мере установки анкеров в образцы породы заносились в таблицу.

Полученные результаты обрабатывались путём построения графических зависимостей изменения статической нагрузки от следующих безразмерных параметров:

- отношения диаметров анкера и шпура – k_0 и механических характеристик породы и материала анкера – $E_{\text{п}}/E_{\text{а}}$;
- отношения механических характеристик породы и материала анкера – $E_{\text{п}}/E_{\text{а}}$ и геометрических параметров анкера – $l_{\text{а}}/d_{\text{а}}$.

3.1.2 Методика определения динамической нагрузки и времени закрепления анкера в шпуре

Испытания по определению динамической нагрузки для закрепления анкера и времени его установки проводились в лаборатории физического моделирования кафедры РМПИ ГОУВПО «ДОННТУ» на сертифицированном оборудовании, прошедшем плановую поверку.

Для проведения испытаний были отобраны реальные образцы пород (аргиллит, алевролит и песчаник). Для определения их физико-механических свойств определяли прочность пород на одноосное сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, а также модуль их упругости $E_{\text{п}}$ по методике, изложенной в п. 3.1.1.

Подготовка образцов породы к испытаниям, разметка шпуров и их бурение, конструкция анкеров были такими же, как и при установке анкеров в образцы пород с помощью статической нагрузки (см. п. 3.1.1).

Закрепление анкеров в образцы осуществлялось перфораторами HammerdrillVP75 (рис. 3.3 а) с энергией удара $E_{\text{уд}}=6$ Дж и частотой ударов $n_{\text{уд}}=3000$ уд/мин и DeWALT-D25601 (рис. 3.3 б) с энергией удара $E_{\text{уд}}=8$ Дж и частотой ударов $n_{\text{уд}}=2840$ уд/мин.

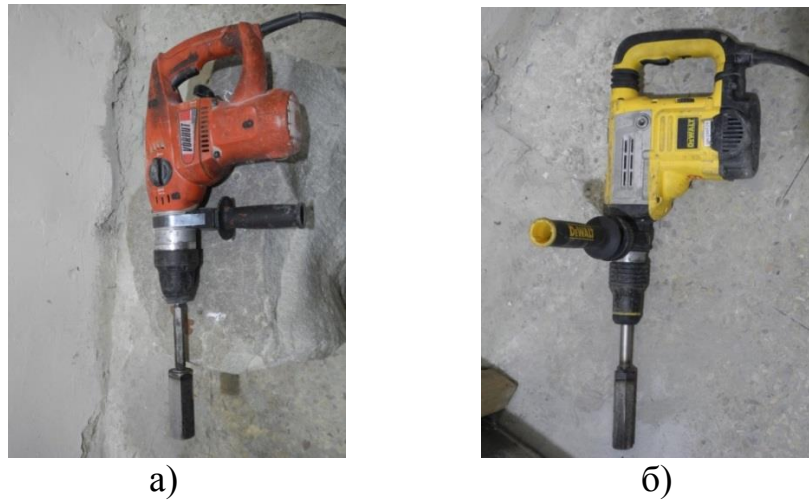


Рисунок 3.3 – Внешний вид перфораторов: HammerdrillVP75 (а)
и DeWALT-D25601 (б)

При установке анкера фиксировались следующие параметры:

- время установки по электронному секундомеру;
- глубина закрепления анкера – по электронному штангенциркулю.

Расположение оборудования при закреплении анкера в образец песчаника динамической нагрузкой приведен на рисунке 3.4.

При проведении экспериментов осуществлялась фото- и видеосъемка.



Рисунок 3.4 – Расположение оборудования при закреплении анкера динамической нагрузкой

Для исключения возможных ошибок каждый эксперимент повторялся три раза. Усреднённые данные об изменении времени установки анкеров в образы породы по мере их заглубления в шпур, а также данные о величине закрепления анкеров в породу заносились в таблицу.

Полученные результаты обрабатывались путём построения графических зависимостей изменения от безразмерных параметров:

– отношения диаметров анкера и шпура – k_0 и механических характеристик породы и материала анкера – $E_{\text{п}}/E_{\text{а}}$;

– отношения механических характеристик породы и материала анкера – $E_{\text{п}}/E_{\text{а}}$ и геометрических параметров анкера – $l_{\text{а}}/d_{\text{а}}$.

3.1.3 Методика определения нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы

Испытания по определению нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы, проводились в лаборатории физического моделирования кафедры РМПИ ГОУ ВПО «ДОННТУ» на сертифицированном оборудовании, прошедшем плановую поверку.

Анкера, ранее установленные в породу с помощью статической и динамической нагрузки, испытывались на их извлечение с целью определения усилия закрепления в шпуре.

Для этого использовался гидравлический пресс-насос типа ГПНВ-5 (см. рисунок 3.5).

Используемый при испытаниях прибор прошёл поверку.

Прибор ГПНВ-5 работает следующим образом. При движении поршня насоса масло по маслопроводу поступит в нижнюю часть рабочего цилиндра. Рабочий поршень движется вверх и сжимает возвратную пружину. Одновременно масло поступает в манометр, который показывает давление в системе. При движении поршня насоса вверх давление в системе уменьшается и и возвратная пружина перемещает рабочий поршень в исходное положение.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Внешний вид ГПНВ-5 (а) и расположение оборудования при проведении испытаний (б)

Проведение опытных на извлечение анкера с использованием ГПНВ-5 проводили в следующем порядке:

- соединяли захват для анкерного устройства с концевой частью анкера;
- взаимно центрировали анкер и ГПНВ-5, закрепляя его на поверхности породного образца путем вывинчивания регулировочных опор;

При этом ручка винтового насоса находилась в крайнем верхнем положении. Взаимное центрирование прибора и анкера производилось визуально с регулировкой опор так, чтобы продольная ось анкера совпадала с осью штока рабочего поршня, а перпендикулярной – с осью одной из выдвижных опор.

- плавно, со скоростью 2-3 кН/с, прикладывали нагрузку вращением ручки ручного винтового насоса;

– фиксировали максимальное показание силоизмерителя (манометра) для определения величины усилия закрепления анкера при фиксированной длине его заделки в образце;

- по мере извлечения анкера контролировали изменение показаний манометра и величины извлечения с помощью штангенциркуля.

Величину усилия закрепления анкера определяли по градуированной характеристике прибора с округлением до 50 Н.

При проведении экспериментов осуществлялась фото- и видеосъёмка.

Полученные результаты обрабатывались путём построения одно- и многофакторных зависимостей изменения нагрузок на преодоление сил трения при извлечении анкеров из шпуров (N_s , кН) от безразмерных параметров:

– отношения диаметров анкера и шпура – k_0 и механических характеристик породы и материала анкера – $E_{п}/E_a$;

– отношения механических характеристик породы и материала анкера – $E_{п}/E_a$ и геометрических параметров анкера – l_a/d_a .

3.2 Результаты лабораторных исследований по определению нагрузок при установке и извлечении анкеров

3.2.1 Результаты исследований по определению статических нагрузок для закрепления анкеров

По методике, изложенной в п. 3.1.1, были проведены испытания на моделях из глинистого, песчаного сланцев и песчаника по установке анкеров с использованием статической нагрузки. Было испытано 27 моделей.

Усреднённые результаты по каждой серии экспериментов для различных типов пород и условий эксперимента представлены в таблице 3.3, а подробные результаты по каждому эксперименту – в приложении А.

Общий вид модели из глинистого сланца (№1) песчаного сланца (№4) и песчаника (№7) на момент начала (а, в, д) и окончания (б, г, е) испытаний приведен на рисунке 3.6.

Для удобства анализа результатов эксперимента были построены графики зависимостей изменения статической нагрузки от глубины вдавливания при различных типах породы, представленные на рисунках 3.7-3.9.

Таблица 3.3 – Результаты экспериментальных исследований по определению статической нагрузки (в натуре) при закреплении анкеров в образцах горных пород

№ п/п	Тип горной породы	Длина l_a , мм; диаметр анкера d_a , мм; длина шпура $l_{ш}$, мм; диаметр шпура $d_{ш}$, мм, k_0	Глубина вдавливания в породу, $l_{вд}$, мм	Статическая нагрузка $P_{ст}$, кН
1	Сланец глинистый	$l_a=150$ мм, $d_a=11$ мм, $l_{ш}=180$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,1$	50	31,7
			100	64,7
			150	87,1
2	Сланец глинистый	$l_a=150$ мм, $d_a=12$ мм, $l_{ш}=180$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,2$	50	88,7
			100	173,8
			135	223,7
3	Сланец глинистый	$l_a=150$ мм, $d_a=13$ мм, $l_{ш}=180$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,3$	50	136,1
			100	238,1
			120	305,6
4	Сланец песчаный	$l_a=150$ мм, $d_a=11$ мм, $l_{ш}=160$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,1$	50	47,8
			100	92,3
			135	116,6
5	Сланец песчаный	$l_a=150$ мм, $d_a=11,5$ мм, $l_{ш}=160$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,15$	50	83,5
			100	153,2
			130	187,2
6	Сланец песчаный	$l_a=150$ мм, $d_a=12$ мм, $l_{ш}=160$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,2$	50	125,6
			100	235,5
			125	260,8
7	Песчаник	$l_a=150$ мм, $d_a=11$ мм, $l_{ш}=140$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,1$	50	66,5
			100	127,0
			120	136,4
8	Песчаник	$l_a=150$ мм, $d_a=11,3$ мм, $l_{ш}=140$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,13$	50	105,3
			100	203,1
			115	207,2
9	Песчаник	$l_a=150$ мм, $d_a=11,7$ мм, $l_{ш}=140$ мм, $d_{ш}=10$ мм, $k_0=1,17$	50	151,3
			100	299,9
			110	311,3

Как видно из представленных графиков, при увеличении значения глубины вдавливания ($l_{вд}$) анкера в породу, для всех типов пород статическая нагрузка изменяется нелинейно.

Рассмотрим это подробнее на примере результатов испытания образцов глинистого сланца (рис. 3.7) при $k_0=1,3$. Наиболее ярко нелинейный характер зависимостей провалится на начальном этапе вдавливания (от 0 до 0,01 м), на котором значение статической нагрузки изменяется с 0 до 60 кН. На наш взгляд, это может быть связано с неоднородностью физико-механических свойств испытуемой модели по глубине и некоторой несоосностью анкера и шпура.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.6 – Общий вид модели из глинистого сланца (№1), песчаного сланца (№4) и песчаника (№7) на момент начала (а, в, д) и окончания (б, г, е) испытаний

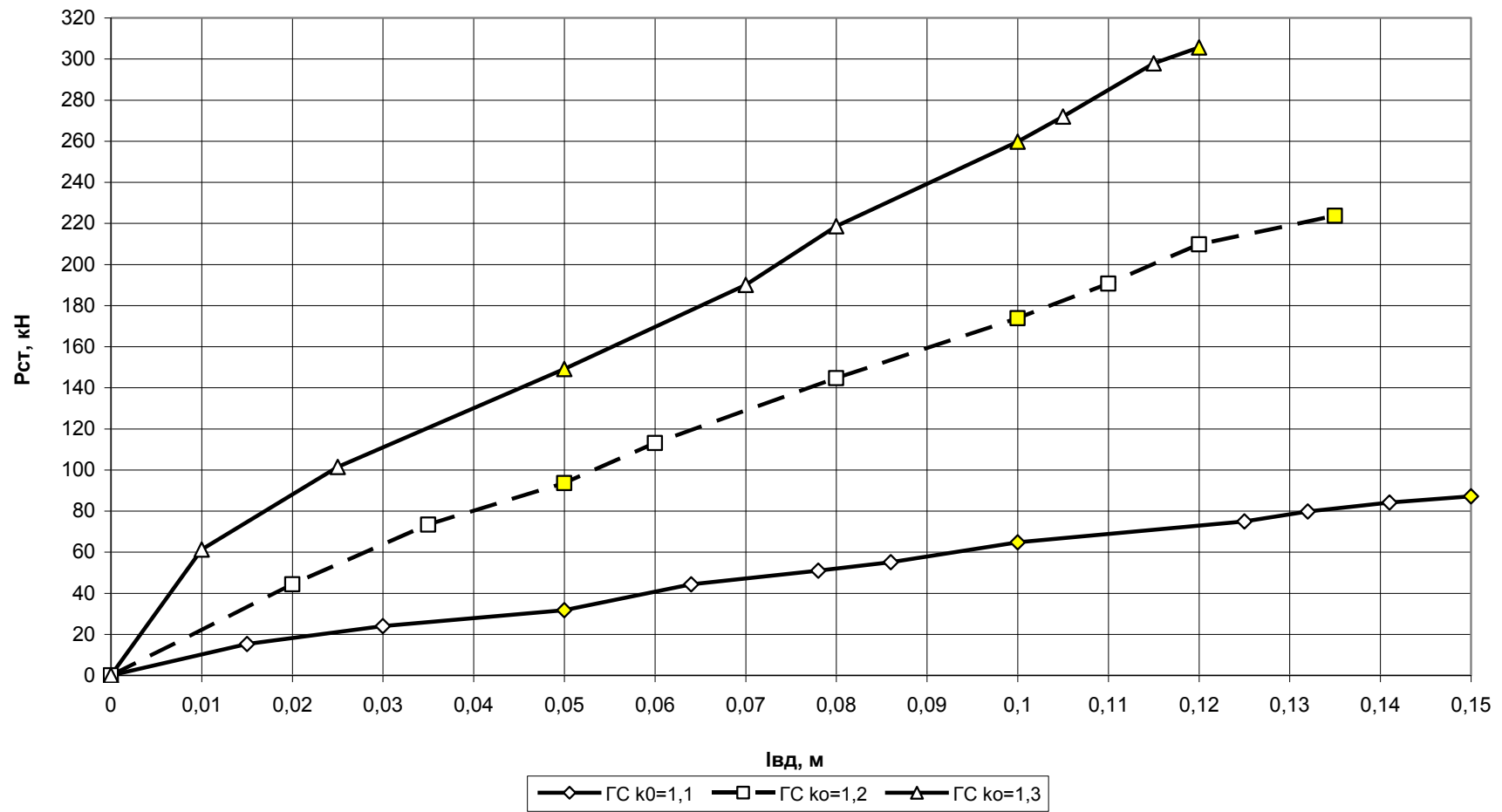


Рисунок 3.7 – Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$, кН) по мере увеличения глубины установки ($l_{вд}$), м анкера в глинистый сланец для различных k_0

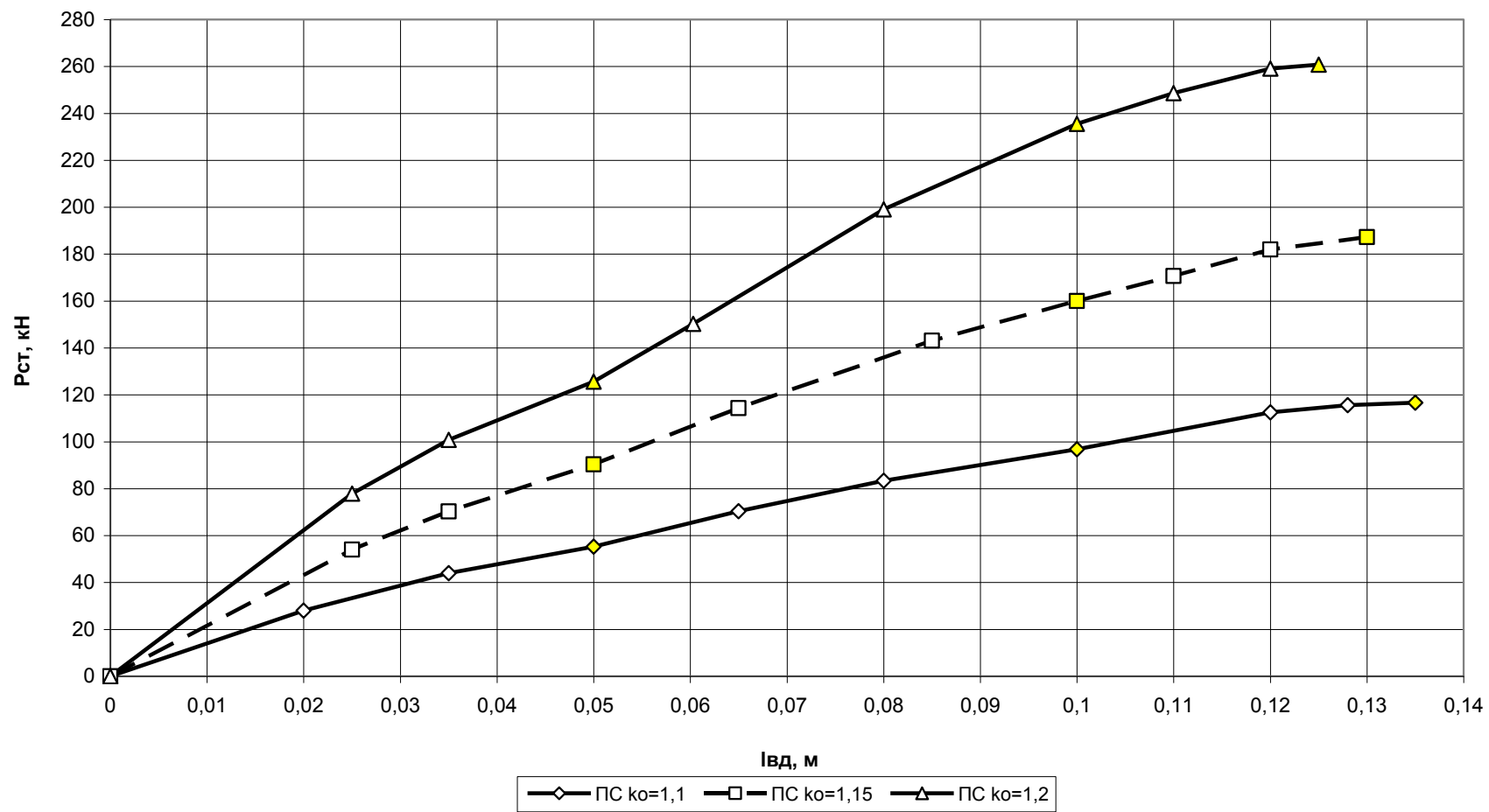


Рисунок 3.8 – Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$, кН) по мере увеличения глубины установки ($l_{вд}$), м анкера в песчаный сланец для различных k_0

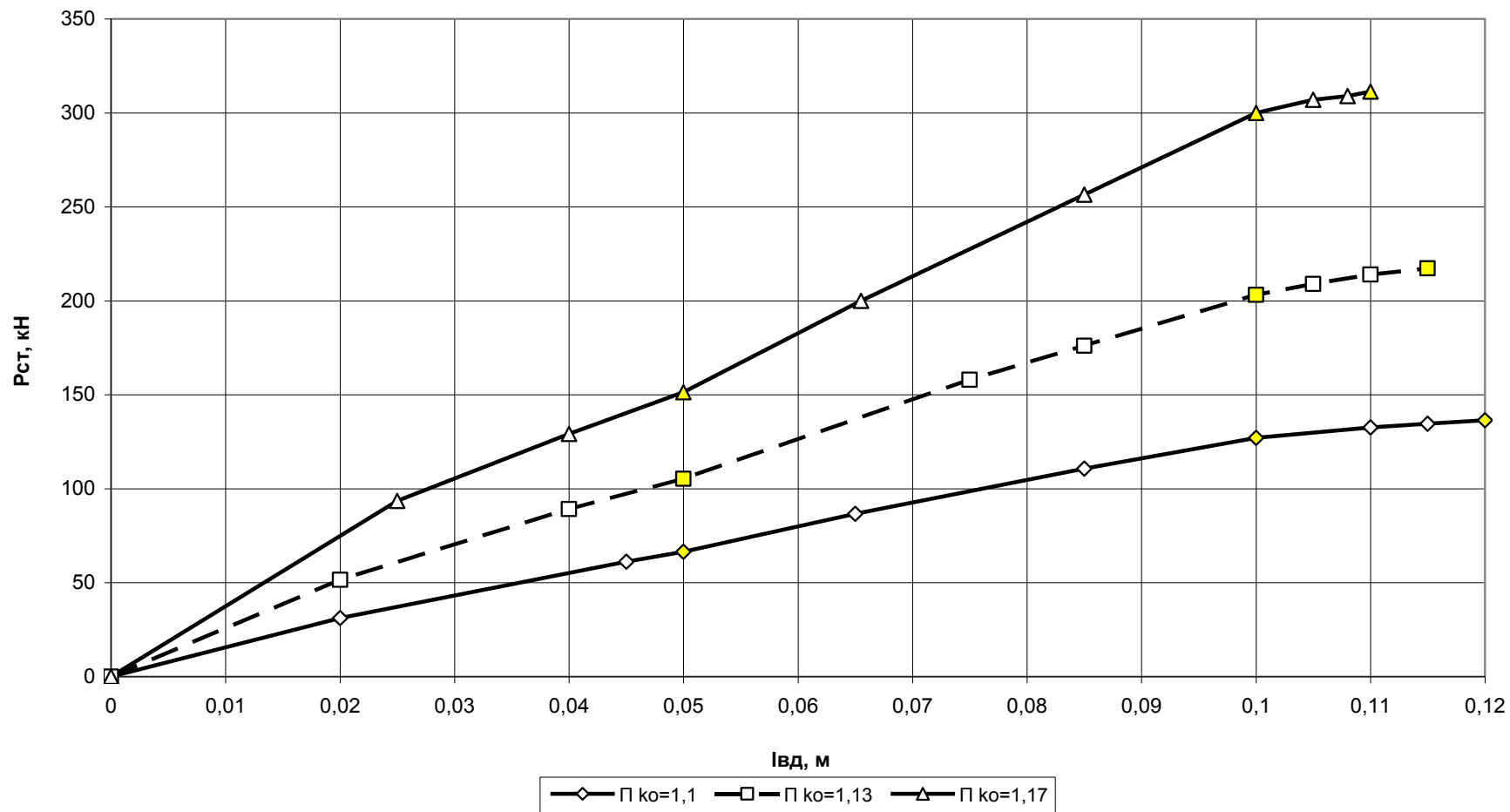


Рисунок 3.9 – Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$, кН) по мере увеличения глубины установки ($l_{вд}$), м анкера в песчаник для различных k_0

При дальнейшем увеличении глубины вдавливания ($l_{вд}$) влияние этого фактора снижается, при этом характер зависимости приближается к линейной, что подтверждается практически постоянным значением приращением величины статической нагрузки ($\Delta P_{ст}^i$) на единицу глубины вдавливания. Максимальное значение статической нагрузки при установке анкера на глубину $l_{вд}=0,12$ м составило $P_{ст}=305,6$ кН.

Аналогичный характер зависимостей наблюдается для песчаного сланца и песчаника (рисунки 3.8 и 3.9).

При анализе зависимостей для одного типа породы нелинейность зависимостей наиболее чётко проявляется с увеличением отношения диаметров и анкера.

Анализ зависимостей статической нагрузки ($P_{ст}$) от соотношения диаметров шпура и анкера (k_0) показал, что для любого рассматриваемого типа пород по мере увеличения (k_0) происходит нелинейное увеличение $P_{ст}$. Так для глинистого сланца (рис. 3.7) при $k_0= 1,1; 1,2; 1,3$, значение $P_{ст}$ при $l_{вд}=0,12$ м составило, соответственно, 72, 210 и 306 кН.

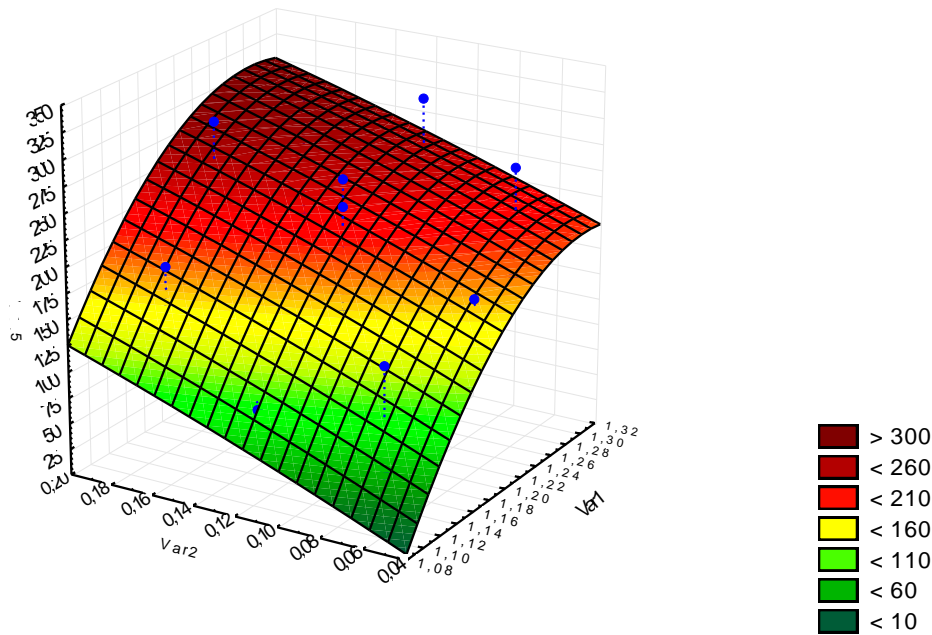
Для песчаного сланца (рис. 3.8) при $k_0= 1,1; 1,15; 1,2$, статической при $l_{вд}=0,1$ м значение $P_{ст}$ составило, соответственно, 97, 160 и 236 кН. Для песчаника (рис. 3.9) при $k_0= 1,1; 1,13; 1,17$ при $l_{вд}=0,1$ м значение $P_{ст}$ составило, соответственно, 127, 203 и 300 кН.

Для удобства анализа полученные результаты обрабатывались с помощью пакета прикладных программ «Statistika». Результаты обработки для параметров натуре представлены в виде поверхностей на рисунках 3.10 и 3.11, а для параметров модели – в приложении Б (рисунки Б.1 и Б.2). При этом, для удобства влияющие факторы были приняты в безразмерных относительных единицах.

Таким образом, рекомендуемые значения k_0 для различных типов пород следующие:

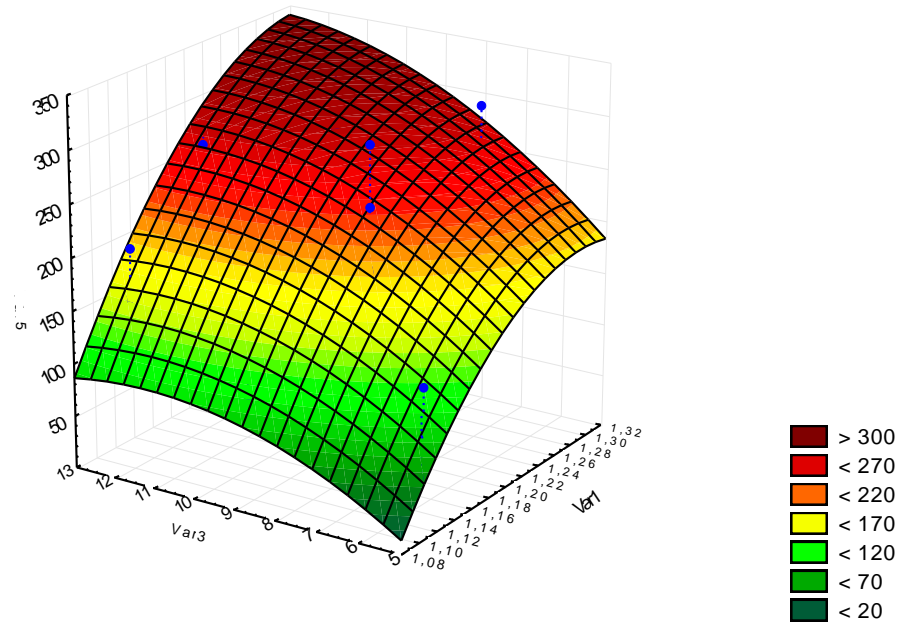
– для глинистого сланца ($E_n/E_a = 0,054$) $k_0 = 1,18 \div 1,25$. При этом, $P_{ст}^H$ изменяется от 60 до 100 кН;

– для песчаного сланца ($E_n/E_a = 0,095$) $k_0 = 1,1 \div 1,2$. При этом, $P_{ст}^H$ изменяется от 90 до 125 кН;



$\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;
 $\text{Var2}\left(\frac{E_n}{E_a}\right)$ – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ;
 $\text{Var5}(P_{ст}^H)$ – статическое усилие закрепления анкера в породе для природы, кН.

Рис. 3.10 – Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$) (в натуре) от отношений $\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$



$\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;
 $\text{Var3}\left(\frac{l_a}{d_a}\right)$ – отношение длины анкера l_a к диаметру анкера d_a ;
 $\text{Var5}(P_{ст}^H)$ – статическое усилие закрепления анкера в породе для природы, кН.

Рис. 3.11 – Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$) (в натуре) от отношений $\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{l_a}{d_a}$

– для песчаника ($E_n/E_a = 0,178$) $k_0 = 1,09 \div 1,12$. При этом, $P_{ст}^H$ изменяется от 130 до 175 кН.

Для определения значений статической нагрузки при установке анкеров ($P_{ст}$) в заданных горно-геологических условиях наиболее удобным способом является их расчет по регрессионным зависимостям.

С этой целью была составлена матрица проведения полного факторного эксперимента (таблицы 3.4 и 3.5) по методике, описанной в п. 3.1.

Таблица 3.4 – Натуральные значения факторов

Характеристика плана	$x_1=k_0$	$x_2=E_n \cdot 10^{10}$, Н/м ²	$x_3=l_a$, м
Нулевой уровень	1,20	2,35	1,0
Интервал варьирования	0,08	1,03	0,4
Верхний звёздный уровень	1,3	3,60	1,5
Нижний звёздный уровень	1,10	1,10	0,5
Верхний уровень	1,28	3,38	1,4
Нижний уровень	1,12	1,32	0,6

где $x_1=k_0$ – отношение диаметров шпура и анкера, $k_0=d_a/d_{ш}$;
 $x_2=E_n$ – модуль упругости породы, МПа;
 $x_3=l_a$ – длина анкера, м

Таблица 3.5 – Результаты исследований по установке анкеров статической нагрузкой

Натуральные значения			Кодированные значения			Нагрузка $P_{ст}$, кН
$x_1=k_0$	$x_2=E_n$	$x_3=l_a$	x_1	x_2	x_3	
1,12	1,32	0,6	-1	-1	-1	44,82
1,28	1,32	0,6	+1	-1	-1	154,38
1,12	3,38	0,6	-1	+1	-1	129,81
1,28	3,38	0,6	+1	+1	-1	169,98
1,12	1,32	1,4	-1	-1	+1	147,74
1,28	1,32	1,4	+1	-1	+1	257,96
1,12	3,38	1,4	-1	+1	+1	195,21
1,28	3,38	1,4	+1	+1	+1	360,22
1,10	2,35	1,0	-1,215	0	0	92,96
1,30	2,35	1,0	1,215	0	0	297,14
1,20	1,1	1,0	0	-1,215	0	174,96
1,20	3,6	1,0	0	1,215	0	293,15
1,20	2,35	0,5	0	0	-1,215	134,12
1,20	2,35	1,5	0	0	1,215	262,61
1,20	2,35	1,0	0	0	0	235,72

В результате обработки данных, представленных в таблице 3.5, были получены регрессионные зависимости (3.13) и (3.14), позволяющие рассчитать величину статической нагрузки ($P_{\text{ст}}^{\text{H}}$) в зависимости от влияющих факторов: k_0 , $\frac{E_n}{E_a}$ и $\frac{l_a}{d_a}$.

Зависимость $P_{\text{ст}}^{\text{H}} = f\left(k_0; \frac{E_n}{E_a}\right)$ для параметров природы:

$$P_{\text{ст}}^{\text{H}} = 10453,7 \cdot k_0 + 1366,4 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 4015,6 \cdot k_0^2 - 443,2 \cdot k_0 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 578,7 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2 - 6635,2, \text{ кН} \quad (3.13)$$

$$R^2 = 0,88.$$

Зависимость $P_{\text{ст}}^{\text{H}} = f\left(k_0; \frac{l_a}{d_a}\right)$ для параметров природы:

$$P_{\text{ст}}^{\text{H}} = 9781,4 \cdot k_0 - 1,7 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 3872,6 \cdot k_0^2 + 43 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 2,04 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a}\right)^2 - 6211,7, \text{ кН} \quad (3.14)$$

$$R^2 = 0,88.$$

Область применения зависимостей (3.13) и (3.14) ограничена пределами изменения факторов, указанных в таблице 3.4.

Матрица проведения полного факторного эксперимента, а также полученные на ее основе регрессионные зависимости для параметров модели, представлены в приложении Б (таблица Б.1; зависимости (Б.1) и (Б.2)).

Результаты экспериментальных исследований по определению статической нагрузки (в модели) при закреплении анкеров в образцах горных пород приведены в приложении Б (таблица Б.2).

3.2.2 Результаты исследований по определению динамической нагрузки и времени закрепления анкера в шпуре

Для проведения исследований по определению динамической нагрузки и времени закрепления анкера установки анкера необходимо было обосновать тип и параметры необходимого оборудования. Для этого было решено использовать результаты исследований по определению статической нагрузки для закрепления анкеров (см. п. 3.2.1), а также теоретические расчёты, выполненные в разделе 2. Они обосновывают возможность определения необходимой величины динамической нагрузки для установки анкера по известным значениям статической нагрузки с учётом коэффициента динамичности, равного 2.

С учётом, установленных в п. 3.2.1 (таблица 3.3) значениях статических нагрузок и рассчитанных по ним величин динамических нагрузок (коэффициент динамичности – 2) было отобрано типовое оборудование для условий исследований, сводные характеристики которого приведены в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6 – Обобщенные данные параметров пневматических отбойных молотков

Наименование параметров	Норма
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа, не менее	0,4–0,55
Энергия единичного удара, Дж, не менее	43
Частота ударов, с, не менее	16
Удельный расход свободного воздуха, л/с, не более	26
Мощность, Вт, не менее	815
Масса молотка без инструмента, кг, не более	10
Длина молотка, воспринимаемая руками оператора, Н	98
Длина молотка без инструмента, мм	570
Внутренний диаметр рукава, мм	16
Усилие нажатия, Н	68,6–97,6
Усилие нажатия пускового устройства, Н	8
Диаметр рукоятки, мм	34
Длина, мм	70

Таблица 3.7 – Данные характеристик различных типов пневматических отбойных молотков

Показатели	Единица измерения	Тип отбойного молотка						
		МО-8п	МО-9п	МО-10п	МОО-8	МОО-10	МО-12	ОМСП-5
Масса	кг	8,5	9	10	9	10,8	12,5	9
Длина без пики	мм	480	520	570	475	528	655	
Рабочее давление сжатого воздуха	кгс/см ² (МПа)	5 (0,5)	5 (0,5)	5 (0,5)	5 (0,5)	5 (0,5)	5 (0,5)	
Энергия единичного удара	кгс·м (Дж)	3,2 (32)	3,5 (35)	4,4 (44)	3,4 (34)	4,5 (45)	6,3 (63)	2,6 (26)
Число ударов в минуту	–	2000	1800	1400	1600	1250	1060	1600
Мощность	(Вт)	(1030)	(1030)	(965)	–	–	(1090)	
Расход воздуха	м ³ /мин	1,4	1,3	1,3	1,1	1,15	1,25	1,10
Ход ударника	мм	105	125	143		–	185	
Способ пуска		Автоматический			Неавтоматический		Автоматический	
Способ воздухораспределения		Клапанный			Золотниковый			
Пылеподавление		Нет	Нет	Нет	Орошение		Нет	Нет
Примечание. Диаметр ударника у всех молотков 38 мм.								

При проведении эксперимента использовались электрические перфораторы типов HammerdrillVP75 и DeWALT-D25601 (п. 3.1.2) с параметрами, соответствующими расчётным значениям.

По методике, изложенной в п. 3.1.2 были проведены испытания на моделях из глинистого, песчаного сланцев и песчаника по установке анкеров с использованием динамической нагрузки. Было испытано 27 моделей.

Определялось время установки анкера ($T_{уст}$, с) в зависимости от глубины установки ($l_{уст}$, мм) и других параметров. Усреднённые результаты по каждой серии экспериментов для различных типов пород и условий эксперимента представлены в таблице 3.8, а подробные результаты по каждому эксперименту – в приложении В.

Общий вид модели из глинистого сланца на момент начала (а) и окончания (б) испытаний (эксперимент 1), для песчаного сланца (в) и (г) (эксперимент 4) а

также аналогично для песчаника (д) и (е) (эксперимент 8) представлены на рисунке 3.12.

Таблица 3.8 – Результаты экспериментальных исследований по определению времени установки при закреплении анкеров в образцах горных пород с использованием динамической нагрузки

№ п/п	Тип горной породы	Длина l_a , мм; диаметр анкера d_a , мм; длина шпура $l_{ш}$, мм; диаметр шпура $d_{ш}$, мм, k_0	Глубина установки в породу $l_{уст}$, мм	Время установки $T_{уст}$, с
1	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	50	3
			100	9
			150	13
2	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	50	6
			100	21
			150	27
3	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=13\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,3$	50	10
			100	26
			150	37
4	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	50	11
			100	29
			150	40
5	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,5\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,15$	50	14
			100	34
			150	45
6	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	50	19
			100	44
			150	53
7	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	50	21
			100	97
			150	120
8	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,3\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,13$	50	33
			100	101
			150	144
9	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,7\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,17$	50	43
			100	118
			150	167

Для удобства анализа полученные результаты обрабатывались с помощью пакета прикладных программ «Statistika». Результаты обработки для параметров природы представлены в виде поверхностей на рисунке 3.13.

При этом, для удобства влияющие факторы были приняты в безразмерных относительных единицах.



а)



б)



в)



г)



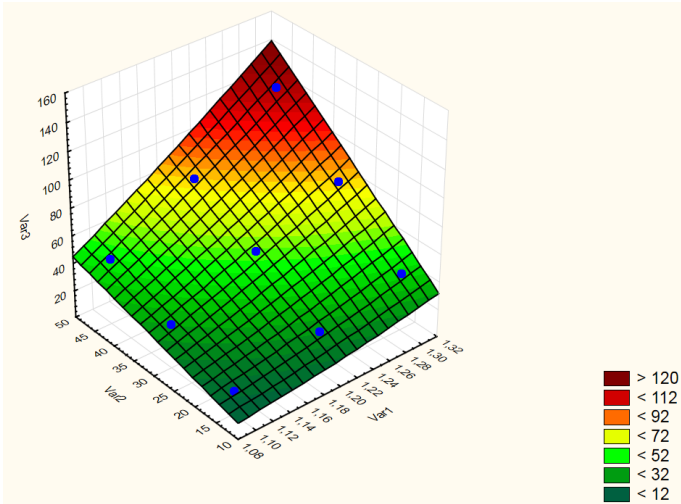
д)



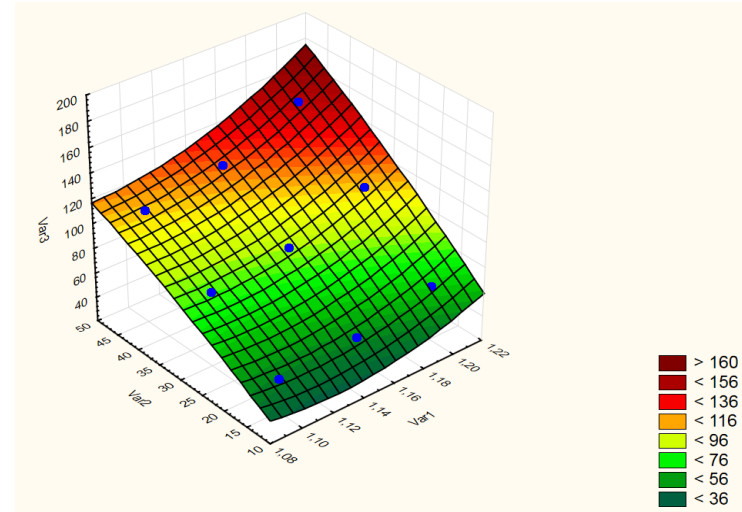
е)

Рисунок 3.12 – Общий вид модели из глинистого сланца (№1), песчаного сланца (№4) и песчаника (№8) на момент начала (а, в, д) и окончания (б, г, е) испытаний

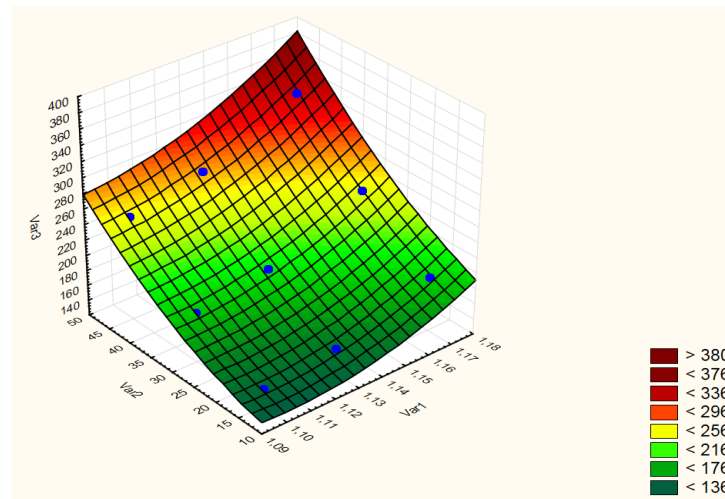
а)



б)



в)



Var1(k_o) – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$; Var2(l_a/d_a) – отношение длины анкера l_a к диаметру анкера d_a ;
 Var3($T_{уст}$) – время установки анкера в шпур, с

Рисунок 3.13 – Изменение времени установки анкера ($T_{уст}$) от отношений $\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{l_a}{d_a}$ для глинистого сланца (а), песчаного сланца (б) и песчаника (в)

Требования регламентирующих документов по эффективной технологии установки анкерной крепи [30] указывают, что время установки анкера не должно превышать 5 мин. С учетом того, что на бурение направляющего шпура затрачивается от 1/4 до 1/3 от этого времени, то время установки анкера не должно превышать 180-200 сек. Тогда область эффективного применения предлагаемого способа установки для каждого из типов пород (рис. 3.13) можно выделить мысленно, проведя горизонтальную плоскость через вертикальную ось через отметку 200 с.

Как видно из данных, представленных на рисунке 3.13, наименьшая ошибка аппроксимации $\pm 5\%$ ($R^2=0,95$) выражений (3.15-3.17) имеет место в следующих областях поверхностей (обозначены зелёным цветом):

- для глинистого сланца (см. рисунок 3.13 а) $k_o = 1,15-1,22$, при этом $T_{уст}$ изменяется от 30 до 50 с;

- для песчаного сланца (см. рисунок 3.13 б) $k_o = 1,11-1,17$, при этом $T_{уст}$ изменяется от 40 до 65 с;

- для песчаника (см. рисунок 3.13 в) $k_o = 1,1-1,14$, при этом $T_{уст}$ изменяется от 150 до 170 с.

Таким образом, рекомендуемые значения k_o для различных типов пород следующие:

- для глинистого сланца ($E_n/E_a = 0,054$) $k_o = 1,18-1,25$. При этом, $T_{уст}$ изменяется от 35 до 55 с;

- для песчаного сланца ($E_n/E_a = 0,095$) $k_o = 1,1-1,2$. При этом, $T_{уст}$ изменяется от 52 до 67 с;

- для песчаника ($E_n/E_a = 0,178$) $k_o = 1,09-1,12$. При этом, $T_{уст}$ изменяется от 140 до 160 с.

Для определения значений $T_{уст}$ анкера в шпур с помощью динамической нагрузки в заданных горно-геологических условиях наиболее удобным способом является их расчет по регрессионным зависимостям.

При анализе поверхностей, представленных на рисунке 3.13, были получены регрессионные зависимости (3.15-3.17), позволяющие рассчитать

величину $T_{уст}$ для различных типов пород в зависимости от влияющих факторов: k_0 , и l_a/d_a :

Для глинистого сланца:

$$T_{уст} = 208 - 351,7 \cdot k_0 - 7,4 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 150 \cdot k_0^2 + 7,7 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 0,0001 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a} \right)^2, \text{ с} \quad (3.15)$$

$$R^2 = 0,9.$$

Для песчаного сланца:

$$T_{уст} = 3348,3 - 5896,7 \cdot k_0 - 4,6 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 2600 \cdot k_0^2 + 6,6 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 0,01 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a} \right)^2, \text{ с} \quad (3.16)$$

$$R^2 = 0,9.$$

Для песчаника:

$$T_{уст} = 11921,8 - 21290,5 \cdot k_0 - 13,6 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 9603,2 \cdot k_0^2 + 12,9 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 0,05 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a} \right)^2, \text{ с} \quad (3.17)$$

$$R^2 = 0,9.$$

Область применения зависимостей (3.15-3.17) ограничена пределами изменения факторов, указанных в таблице 3.4.

Таким образом, при установке анкеров в шпурь с помощью динамической нагрузки обеспечивается соблюдение требований [90] по продолжительности основных технологических процессов.

3.2.3 Результаты исследований по определению нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы

Исследования проводились на моделях из глинистого сланца, песчаного сланца и песчаника по методике, изложенной в п. 3.1.3.

Всего было отработано 54 модели. Усреднённые результаты по каждой серии экспериментов для различных типов пород и условий эксперимента представлены в таблице 3.9, а подробные результаты по каждому эксперименту при

установке анкеров с использованием статической нагрузки приведены в приложении Г (таблица Г.1), а при установке анкеров с использованием динамической нагрузки приложение Г (таблица Г.2).

Таблица 3.9 – Результаты экспериментальных исследований по определению нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров

№ эксперимента	Тип горной породы	Длина l_a , мм; диаметр анкера d_a , мм; длина шпура $l_{ш}$, мм; диаметр шпура $d_{ш}$, мм, k_0	Глубина установки в породу $l_{уст}$, мм	Усилие извлечения, N_s , кН
Модели, в которых анкера устанавливались с помощью статической нагрузки				
1	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	150	58,7
2	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	135	74,8
3	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=13\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,3$	120	154,1
4	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	135	71,8
5	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,5\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,15$	130	89,8
6	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	125	146,9
7	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	120	71,2
8	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,3\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,13$	115	106,4
9	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,7\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,17$	110	163,6
Модели, в которых анкера устанавливались с помощью динамической нагрузки				
10	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	150	63,8
11	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	150	88,0
12	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=13\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,3$	150	161,4
13	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	150	73,4
14	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,5\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,15$	150	94,3
15	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	150	153,5
16	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	150	76,5
17	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,3\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,13$	150	116,0
18	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,7\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,17$	150	170,9

Общий вид модели из глинистого сланца (№3), песчаного сланца (№14) и песчаника (№17) на момент начала (а, в, д) и окончания (б, г, е) испытаний приведен на рисунке 3.14.

Для удобства анализа результатов были построены графики изменения нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) для различных типов пород (рисунки 3.15, 3.16 и приложение Г).

Из графиков, представленных на рисунках 3.15 и 3.16, виден нелинейный характер изменения N_s по мере извлечения анкера из шпура. Максимальные значения N_s при $k_0=1,1$; 1,13 и 1,17 составили, соответственно, 72,1; 106,4; 163,6 кН (модели № 7-9) и 76,5; 116; 170,9 кН (модели № 16-18). На начальном этапе извлечения (участок 0-0,05 м) N_s уменьшается незначительно (в зависимости от k_0 , от 5 до 7 %). На наш взгляд это связано с тем, что в донной части шпура его диаметр максимально соответствует диаметру коронки.

На участке 0,05-0,1 м происходит резкое снижение N_s , которое для различных k_0 составляет 0,3 до 0,5 от максимального его значения (большее значение соответствует породам с большим модулем упругости). Такой характер изменения N_s можно объяснить расхождением в плотности прилегания тела анкера к стенкам шпура по мере приближения анкера к забою шпура.

На завершающей стадии извлечения (участок 0,1 – полное извлечение) наблюдается уменьшение N_s до нуля. Следует отметить, что уменьшение N_s на единицу извлеченной длины анкера на этом участке выше, чем на предыдущем. На наш взгляд, это объясняется отклонением положения стенок шпура от проектного при забурировании, несовершенством техники бурения и неоднородностью физико-механических свойств пород.

Аналогичные результаты были получены при анализе графиков, представленных в приложении Г.

Проведенные исследования позволили установить, что значение нагрузок для преодоления сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров составили от 50 до 70 % от нагрузок для установки анкеров (п. 3.2.1 и 3.2.2).



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.14 – Общий вид модели из глинистого сланца (№3), песчаного сланца (№14) и песчаника (№17) на момент начала (а, в, д) и окончания (б, г, е) испытаний

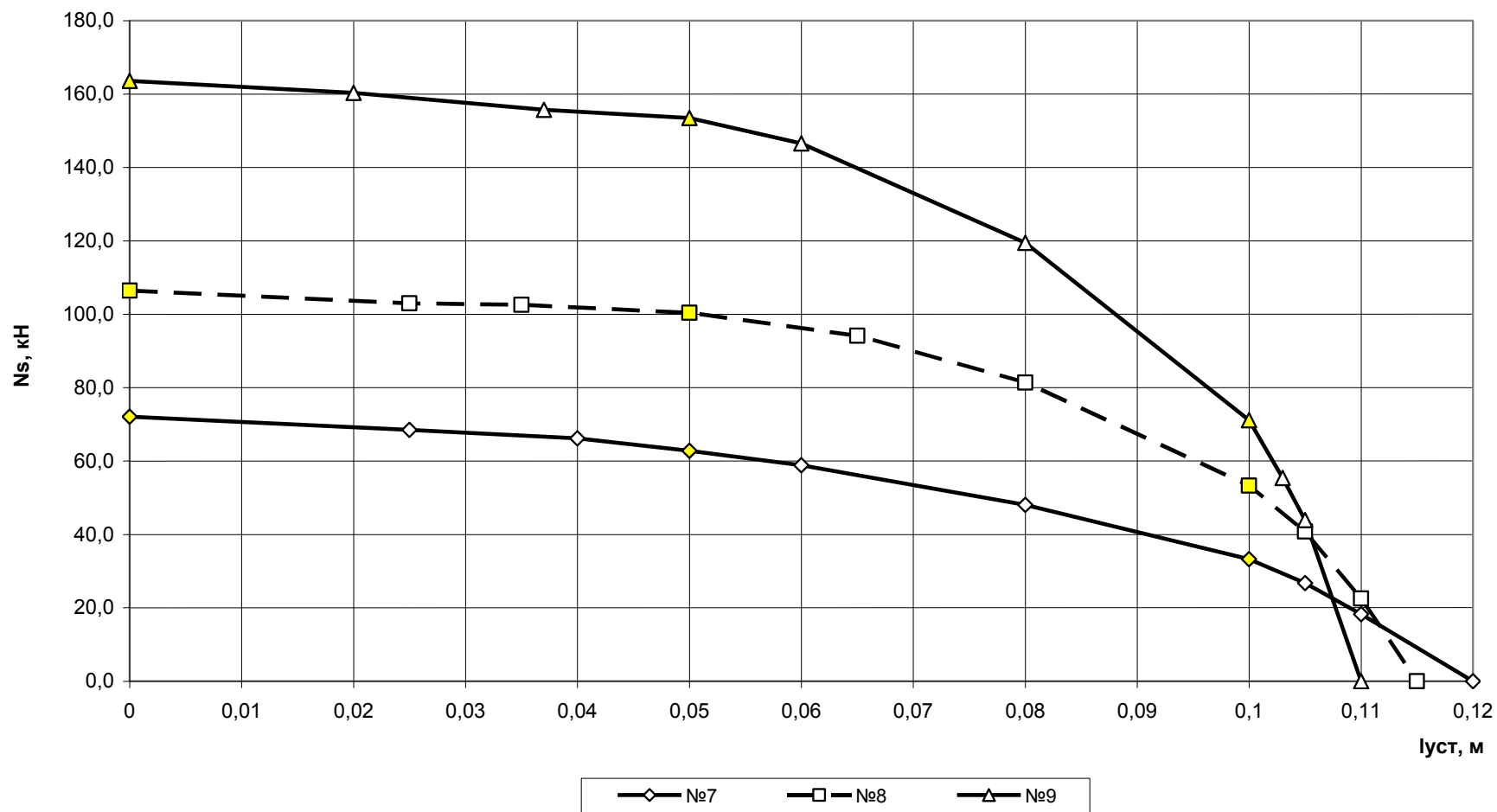


Рисунок 3.15 – Изменение нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) (№7, 8 и 9) в моделях из песчаника, м

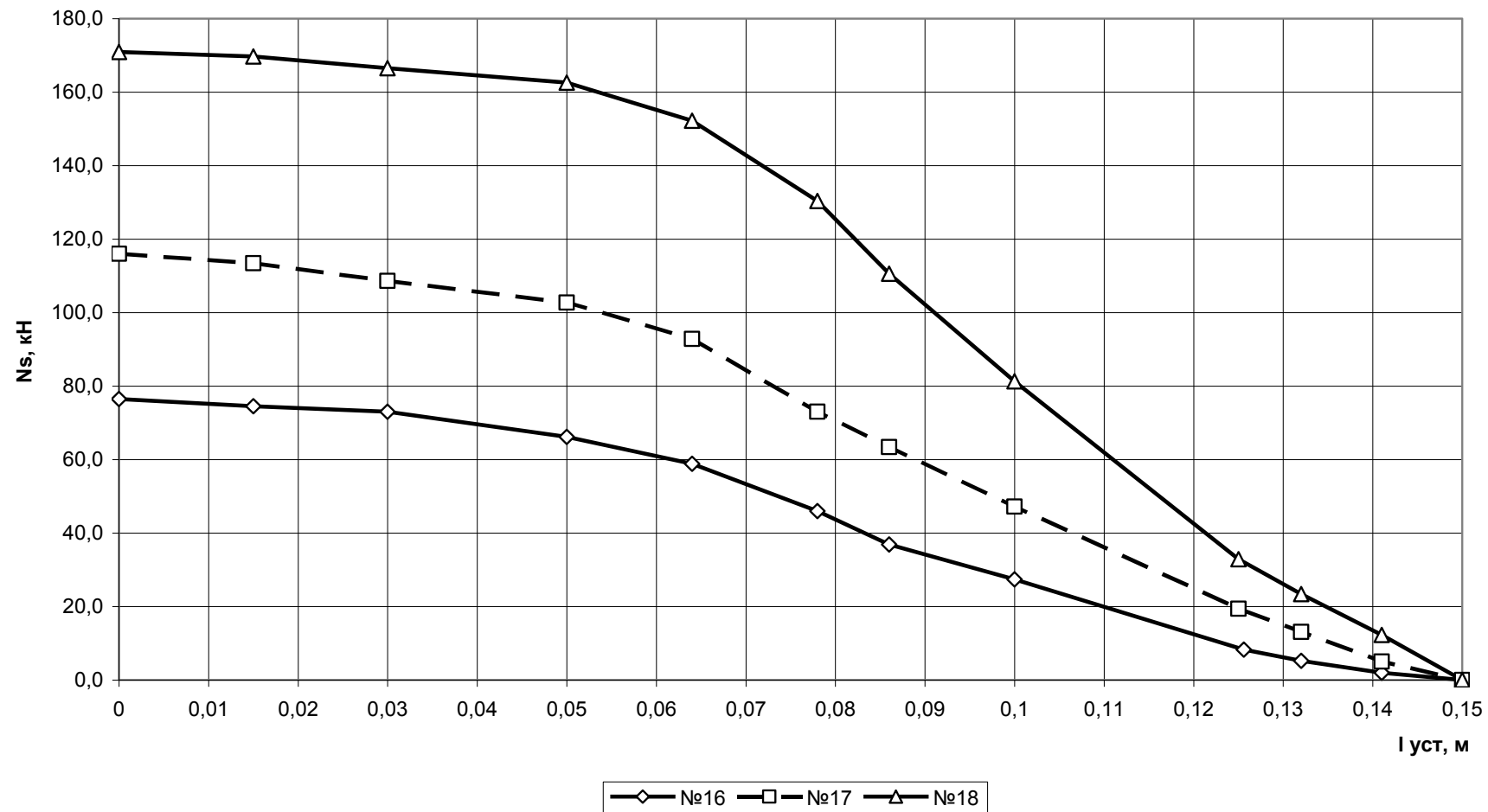


Рисунок 3.16 – Изменение нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) (№16, 17 и 18) в моделях из песчаника, м

Для удобства анализа полученные результаты обрабатывались с помощью пакета прикладных программ «Statistika». Результаты обработки для параметров природы представлены в виде поверхностей на рисунке 3.17. При этом, для удобства влияющие факторы были приняты в безразмерных относительных единицах.

Изменение силы, необходимой для преодоления силы трения (N_s)

Как видно из данных, представленных на рисунке 3.17, наименьшая ошибка аппроксимации $\pm 5\%$ ($R^2=0,95$) имеет место в областях поверхностей, обозначенных зелёным цветом:

- для глинистого сланца (см. рисунок 3.17 а) $k_o= 1,15-1,2$, при этом N_s изменяется от 50 до 70 кН;
- для песчаного сланца (см. рисунок 3.17 б) $k_o= 1,1-1,18$, при этом N_s изменяется от 40 до 65 кН;
- для песчаника (см. рисунок 3.17 в) $k_o= 1,09-1,13$, при этом N_s изменяется от 25 до 50 кН.

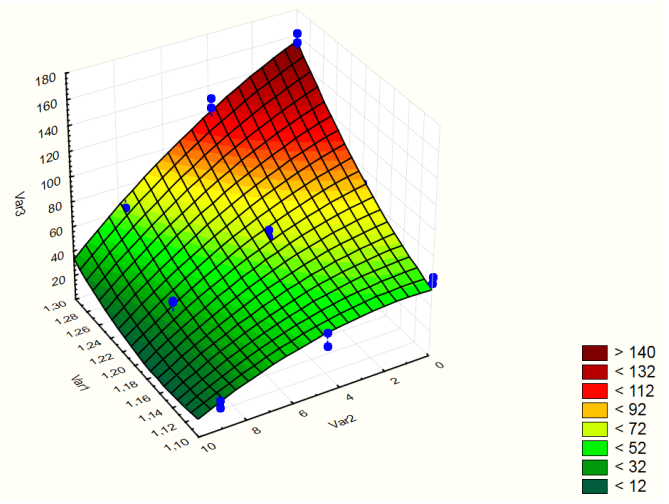
Таким образом, рекомендуемые значения k_o для различных типов пород следующие:

- для глинистого сланца ($\frac{E_n}{E_a}=0,054$) $k_o= 1,18-1,25$. При этом, несущая способность анкера (N_s) будет находиться в пределах от 50 до 70 кН;
- для песчаного сланца ($\frac{E_n}{E_a}=0,095$) $k_o= 1,1-1,2$. При этом, несущая способность анкера (N_s) будет находиться в пределах от 45 до 60 кН;
- для песчаника ($\frac{E_n}{E_a}=0,178$) $k_o= 1,09-1,12$. При этом, несущая способность анкера (N_s) будет находиться в пределах от 25 до 48 кН.

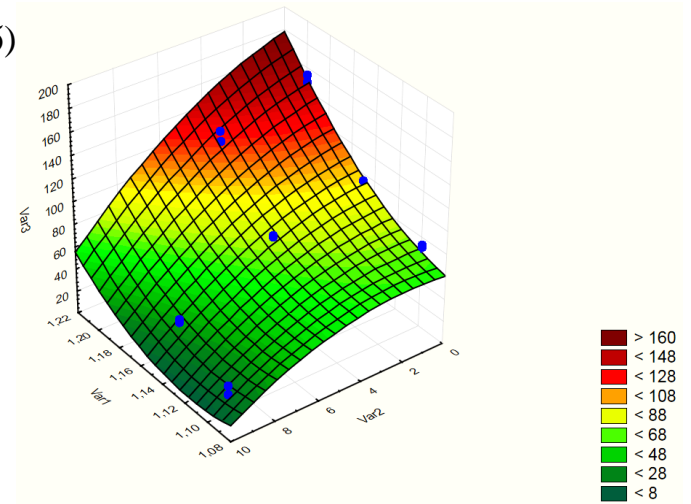
Для определения значений N_s в заданных горно-геологических условиях наиболее удобным способом является их расчет по регрессионным зависимостям.

При анализе поверхностей, представленных на рисунке 3.17, были получены регрессионные зависимости (3.18-3.20), позволяющие рассчитать величину N_s для различных типов пород в зависимости от влияющих факторов: k_o , и l_a/d_a :

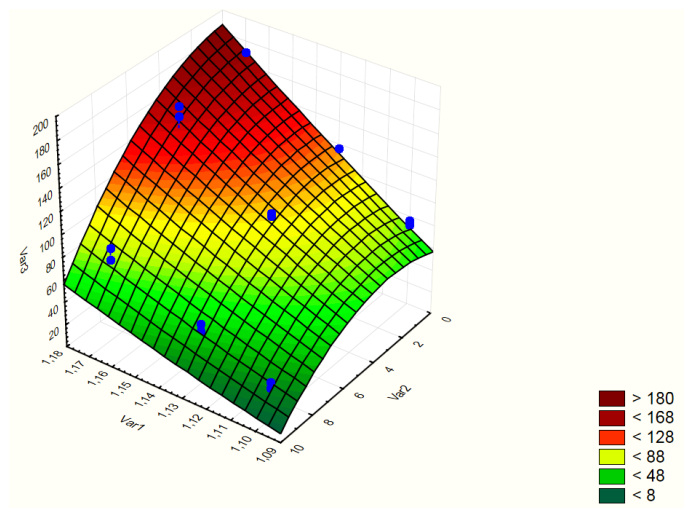
а)



б)



в)



Var1(k_o) – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$; Var2(l_a/d_a) – отношение длины анкера l_a к диаметру анкера d_a ;
 Var3(N_s) – время установки анкера в шпур,

Рисунок 3.17 – Изменение силы, необходимой для преодоления силы трения (N_s) от отношений k_o и l_a/d_a для глинистого сланца (а), песчаного сланца (б) и песчаника (в)

Для глинистого сланца:

$$N_s = 1207,2 - 2365,9 \cdot k_0 + 46,3 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 1197,5 \cdot k_0^2 - 41,3 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 0,5 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a} \right)^2, \text{ кН} \quad (3.18)$$

$$R^2 = 0,88.$$

Для песчаного сланца:

$$N_s = 5045,2 - 9444,9 \cdot k_0 + 61,2 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 4471,9 \cdot k_0^2 - 54,5 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 0,71 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a} \right)^2, \text{ кН} \quad (3.19)$$

$$R^2 = 0,88.$$

Для песчаника:

$$N_s = 105,3 - 1428,3 \cdot k_0 + 106,5 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 1269 \cdot k_0^2 - 91,5 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 1,16 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a} \right)^2, \text{ кН} \quad (3.20)$$

$$R^2 = 0,88.$$

Область применения зависимостей (3.18-3.20) ограничена пределами изменения факторов, указанных в таблице 3.4.

Проведенные исследования позволили установить рациональную область применения способа установки анкеров в направляющий шпур под действием динамической нагрузки.

Установлено, что при k_0 , находящихся в пределах от 1,18 до 1,25 (для глинистого сланца), от 1,1 до 1,2 (для песчаного сланца) и от 1,1 до 1,13 (для песчаника) значение нагрузок для преодоления сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров составляет от 50 до 70 % от величин нагрузок для установки анкеров в направляющий шпур.

3.3 Выводы по разделу

1. Выполненные лабораторные исследования подтвердили адекватность разработанных математических моделей, описывающих устойчивость анкера, устанавливаемого в направляющий шпур меньшего диаметра под действием статической или динамической нагрузки и системы «анкер – породный массив».

2. Результаты проведенных исследований подтвердили техническую возможность применения нового способа их закрепления в горных породах, при котором анкер большего диаметра, устанавливается в направляющий шпур с меньшим диаметром.

3. Теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность установки цельнометаллического анкера с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур, пробуренный в породах с прочностью на одноосное сжатие от 20 до 50 МПа и модулем упругости до $3,56 \cdot 10^5$ МПа, на глубину до 1,5 м, при коэффициенте натяга 1,1-1,2, что обеспечивает устойчивость системы «анкер – породный массив».

4. Впервые по результатам лабораторных экспериментов установлены зависимости, описывающие изменения величины статических нагрузок в модели и натуре для различных типов пород, необходимых для установки анкера от коэффициента натяга (k_0), отношения модулей упругости породы и материала анкера и отношения длины анкера к его диаметру.

5. Впервые по результатам лабораторных экспериментов установлены зависимости, описывающие изменение времени установки анкера в направляющий шпур при различных типах пород с учетом коэффициента натяга (k_0), отношения модулей упругости породы и материала анкера и отношения длины анкера к его диаметру.

6. Впервые по результатам лабораторных экспериментов установлены зависимости изменения нагрузок необходимых на преодоление сил трения при извлечении анкера из массива, представленного различными типами пород, учитывающие коэффициент натяга (k_0), отношения модулей упругости породы и материала анкера и отношения длины анкера к его диаметру.

7. Проведенные исследования позволили установить, что значение нагрузок для преодоления сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров составили до 70 % от величин нагрузок для установки анкеров в направляющий шпур.

РАЗДЕЛ 4

ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА ПРИ УСТАНОВКЕ И ИЗВЛЕЧЕНИИ АНКЕРОВ

4.1 Методика проведения исследований

Исследования по определению параметров способа при установке и извлечению анкеров проводились в наиболее характерных для горно-геологических условиях Донецко-Макеевского района Донбасса.

Для проведения испытаний был выбран второй северный откаточный ходок второй северной лавы подземного полигона техникума им. Е.Т. Абакумова (г. Донецк). Схема выработок полигона приведена на рисунке 4.1.

Выработка расположена на глубине 20 м в коренных породах (см. рисунок 4.2), закреплена трёхзвенной податливой арочной крепью типа АП-3 из СВП-22, расстояние между рамами крепи – 1,0 м. Размеры выработки в свету: ширина – 2,8 м, высота – 2,3 м. На рисунке 4.3 показано расположение выработки относительно вмещающих пород, а также их физико-механические характеристики. Вмещающие породы обводнены.

Для сокращения количества экспериментов использовалась методика его рационального планирования, подробно описанная в подразделе 3.1 и работах [190, 193]. При этом минимально необходимое количество экспериментов должно быть не менее 9.

Для проведения исследований использовались металлические гладкостенные сплошные анкера круглого поперечного сечения длиной 0,5; 1,0 и 1,5 м, диаметром 0,033; 0,034 и 0,036 м из стали марки Ст-45.

Шпуров длиной 0,8; 1,2 и 1,8 м бурили электрическим перфоратором типа DWT-HAMMER ВН-1500 (рис. 4.4 а) и буром диаметром 0,03 м (отношение диаметров анкера и шпура $k_0=1,1; 1,15$ и $1,2$).

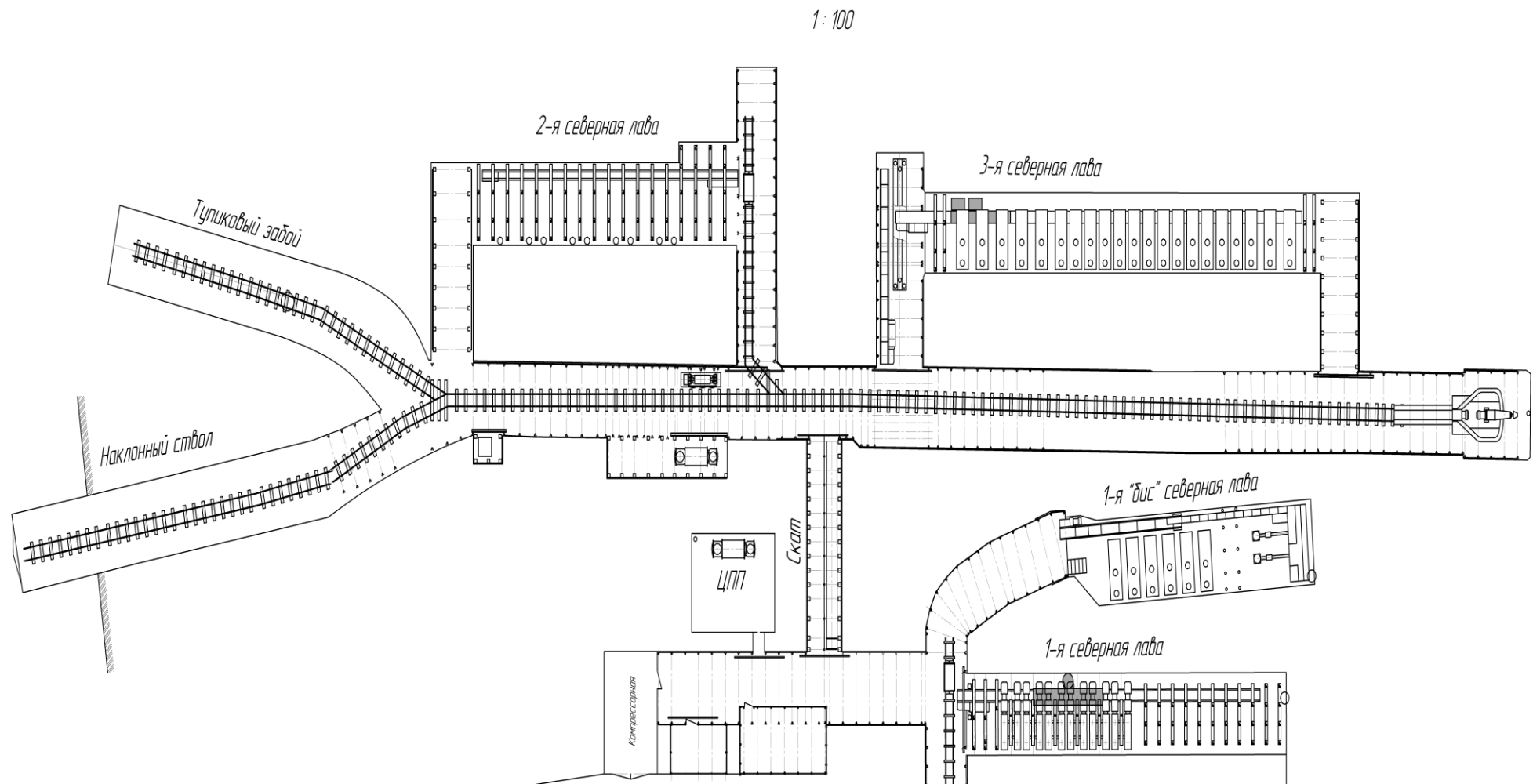


Рисунок 4.1 – Схема учебного полигона техникума им. Е.Т. Абакумова



Рисунок 4.2 – Второй северный откаточный ходок второй северной лавы

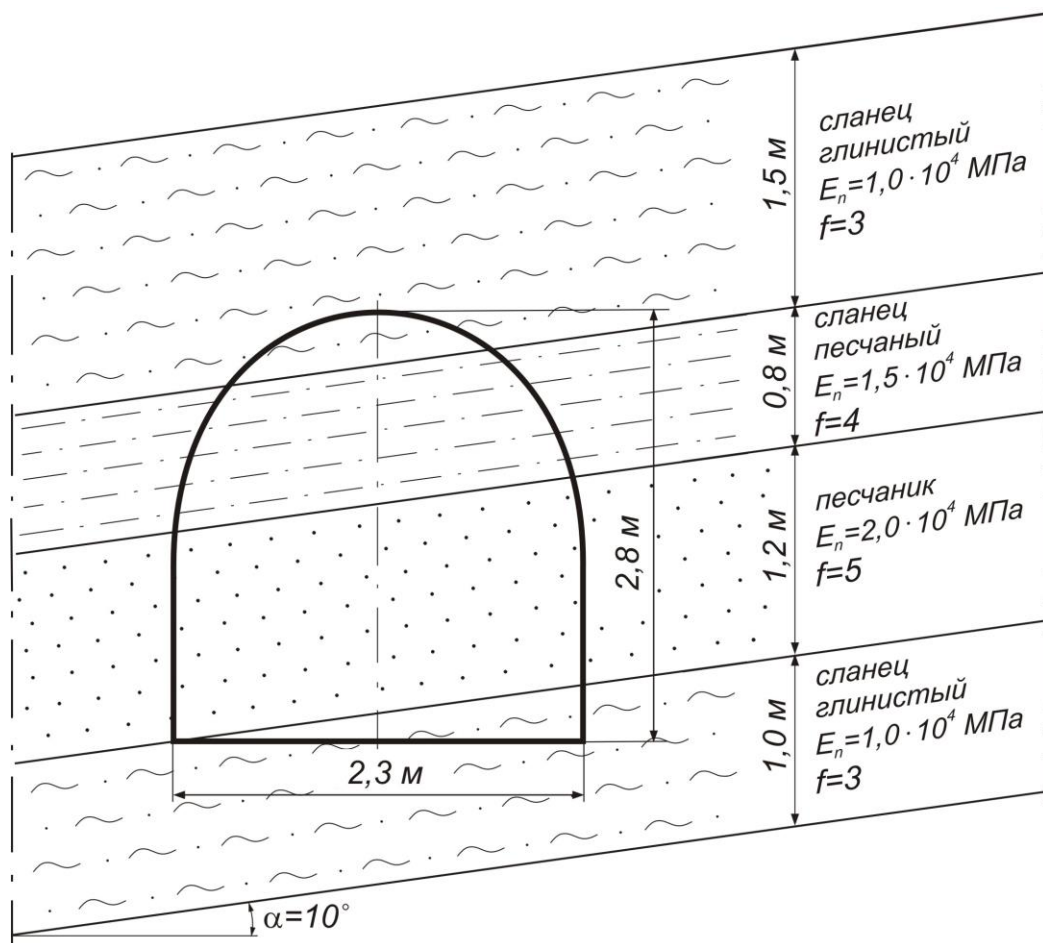


Рисунок 4.3 – Схема расположения выработки относительно вмещающих пород



а)



б)

Рисунок 4.4 – Внешний вид перфоратора DWT-HAMMER BH-1500 (а)
и отбойного молотка SturmRH-2519 (б)

Закрепление анкеров в породе осуществляли динамической нагрузкой с использованием электрического отбойного молотка типа SturmRH-2519 (рис. 4.4 б).

Перед началом бурения шпуров с помощью шаблона осуществлялась их разметка. С целью снижения отклонений стенок шпуров от проектного положения и обеспечения постоянного диаметра по длине шпура бурение осуществлялось в два этапа. Сначала бурение осуществлялось с помощью штанги с коронкой диаметром 0,02 м. Далее шпур расширился до диаметра 0,03 м. Для обеспечения соосности продольной оси шпура и анкера при установке, устье шпура на глубину 0,07-0,10 м расширялось до диаметра устанавливаемого анкера.

Схема расположения шпуров в верхнем слое песчаного сланца и песчаника приведены на рисунке 4.5.

После окончания бурения в ручную с помощью витой штанги из шпура удалялась породная мелочь.

После установки серии анкеров производили подготовку оборудования к их извлечению.

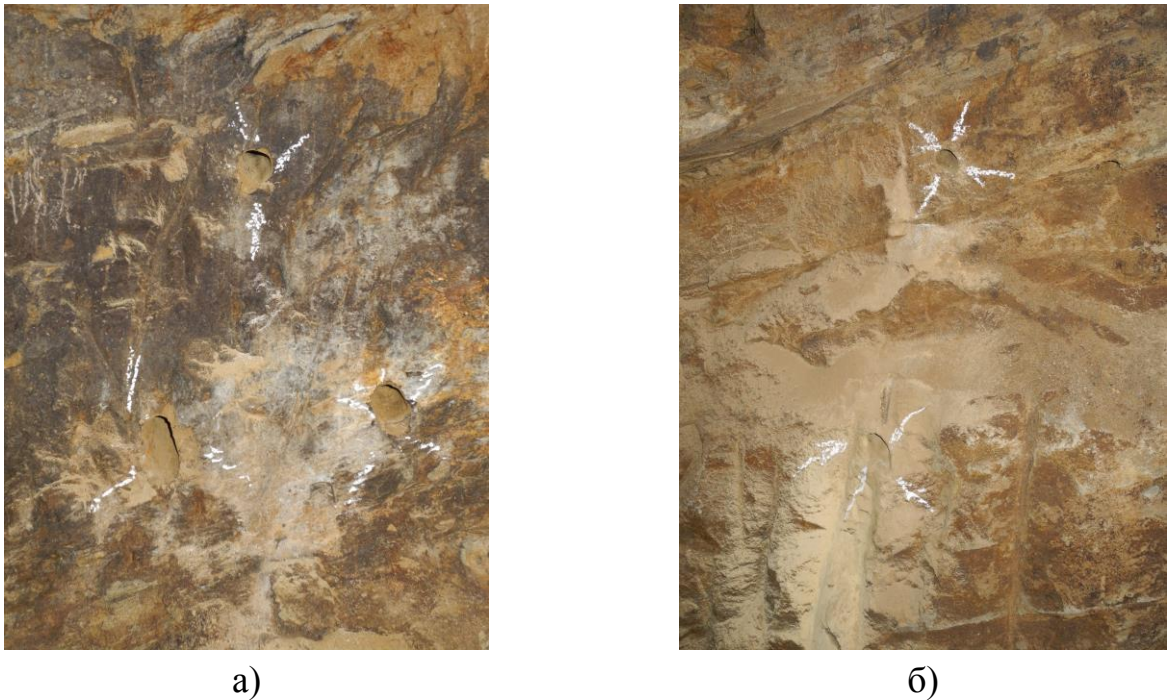


Рисунок 4.5 – Схема расположения шпуров в слое песчаного сланца (а) и песчаника (б)

Для повышения достоверности результатов исследований по извлечению анкеров использовалось несколько технологий.

Технология №1

Для создания усилия с целью извлечения анкера из забоя использовали ручную лебёдку (таль). Усилие закрепления переделялось механическим динамометром типа ТД-8 с ценой деления 0,1 т (см. рисунок 4.6 а)

Схема соединения оборудования для проведения испытаний приведена на рисунке 4.6 б.

Для непрерывной фиксации результатов эксперимента при его проведении велась фото и видеосъёмка.

При подготовке к проведению исследований для создания распорной несущей конструкции, за которую одной стороной крепилась таль, на расстоянии 3м от забоя в почве выработки заглубляли шпалу. На ней крепился элемент цепи скребкового конвейера, который зацеплялся крюк тали. Шпала жестко фиксировалась в углублении распорной стойкой. Другой конец тали соединяют с динамометром. Через специальный крюк динамометр соединяется с анкером.



(a)



(б)

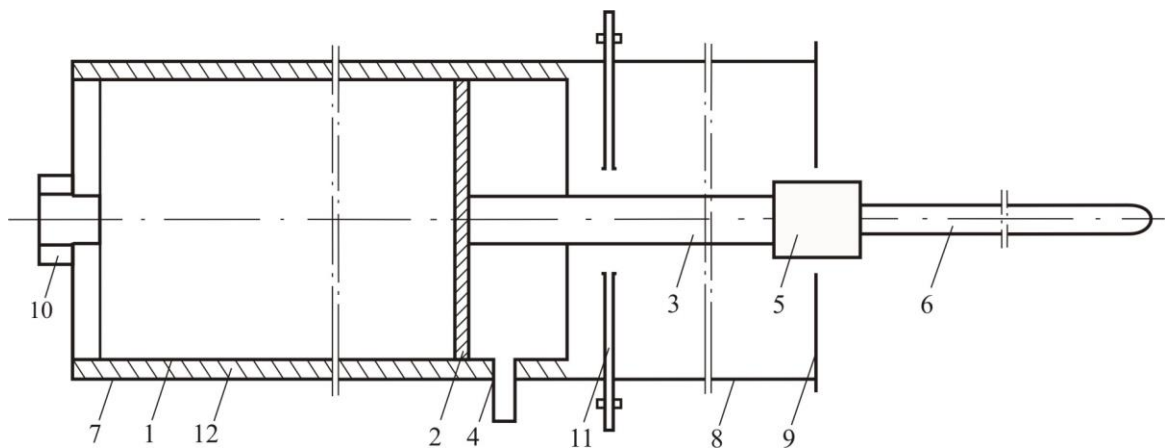
Рисунок 4.6 – Внешний вид измерительной части установки по извлечению анкера (а), ее общий вид в сборе (б)

В целях безопасности ведения работ упорную стойку и динамометр фиксировали предохранительным тросом, закрепленным за раму крепи. Рабочий, управляющий талью, был ограждён от упорной стойки предохранительным щитом.

Первоначально создавалось натяжение в системе, которое постепенно увеличивалось вращением рукоятки тали.

Технология №2

При использовании этой схемы для создания усилия, извлекающего анкер из шпура, использовалось специально разработанное и изготовленное устройство (рис. 4.7 (а) – схема устройства и его общий вид – (б)) на основе тянущего гидроцилиндра.



1 – тянущий гидроцилиндр; 2 – поршень; 3 – шток; 4 – штуцер; 5 – переходник под анкер; 6 – анкер; 7 – корпус устройства; 8 – трубчатая насадка; 9 – упорная плита; 10 – фиксирующий болт; 11 – фланцы; 12 – уплотнитель.

(а)



(б)

Рисунок 4.7 – Устройство по извлечению анкеров: (а) – схема, (б) – общий вид

Для создания давления использовался мускульный маслонасос Holmatro типа FTW1800BE (2) (см. рисунок 4.8) (номинальное давление 720 кгс/см²). Давление в системе контролировали манометром типа ОБМГ 81-160 (3) (номинальное давление 1000 кгс/см²), цена деления 20 кгс/см², класс точности 1,5. Все перечисленные устройства соединены в установку.



- 1 – устройство по извлечению анкеров; 2 – маслонасос Holmatro FTW1800BE;
 3 – манометр ОБМГ 81-160; 4 – шланг высокого давления;
 5 – регулирующая трубчатая насадка; 6 – резиновые прокладки;
 7 – предохранительный ремень.

Рисунок 4.8 – Установка по извлечению анкеров

При подготовке к извлечению, на породе, вокруг выступающей из нее хвостовой части анкера, подготавливалась площадка для упорной плиты (9) устройства (см. рисунок 4.7 а). Затем, с хвостовика анкера свинчивали защитную насадку и с помощью специально изготовленного переходника (5) (см. рисунок 4.7 а) на него закрепляется извлекающее устройство. С целью исключения несоосности

продольных осей анкера и извлекающего устройства, что может привести к концентрации нагрузок на соединительных элементах установки и их разрушению, в месте соединения установки и анкера устанавливались специальные прокладки (6) (рис. 4.8), а корпус установки пространственно фиксировался к раме предохранительным ремнем (7) (рис. 4.8).

После этого, к маслonaсосу (2) последовательно присоединяли манометр (3) и высоконапорный шланг (4), который соединялся со штуцером тянущего гидроцилиндра (4) (рис. 4.7 а). Создавалось первоначальное натяжение в системе подачи масла от маслonaсоса.

При извлечении анкера фиксировалось давление масла в системе с помощью манометра, а перемещение анкера – рулеткой. Непрерывно велась фото- и видеосъемка. Извлечение анкера велось циклами, так как максимальный ход поршня домкрата тянущего гидроцилиндра составлял 120 мм. После каждого цикла давление масла сбрасывалось, а устройство автоматически отсоединялось от анкера. Затем на упорную плиту (9) (см. рисунок 4.7 а) устанавливалась удлиняющая регулирующая трубчатая насадка, после чего установка заново собиралась и цикл повторялся. На рисунке 4.9 приведено расположение установки на первом (а) и втором (б) этапах извлечения анкера из песчаного сланца. А на рисунке 4.10 показаны результаты замера величины извлечения анкера после первого (а) и второго (б) этапов извлечения анкера из песчаного сланца.

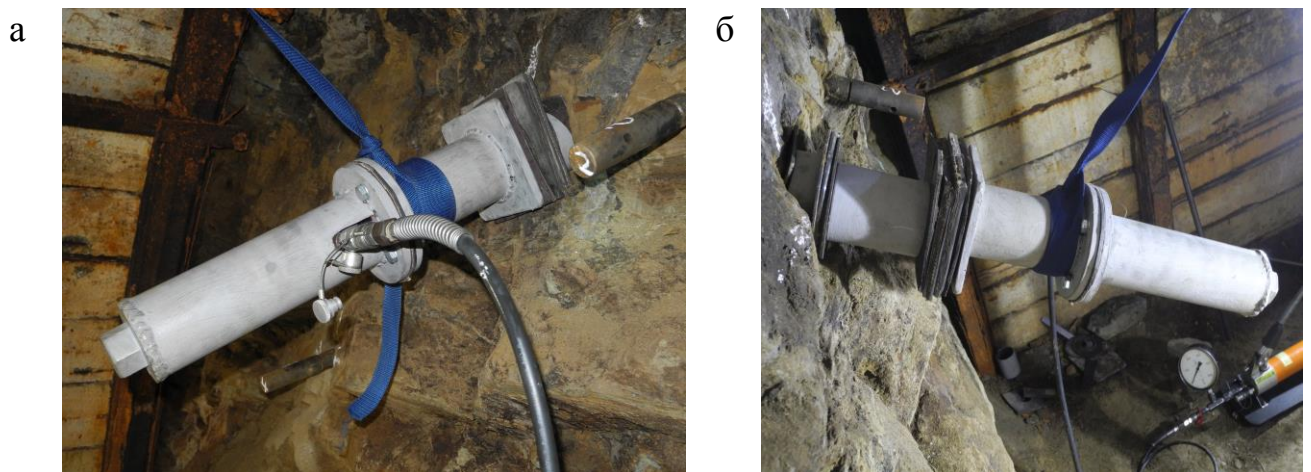


Рисунок 4.9 – Расположение установки в забое на первом (а) и втором (б) этапах извлечения анкера из песчаного сланца.

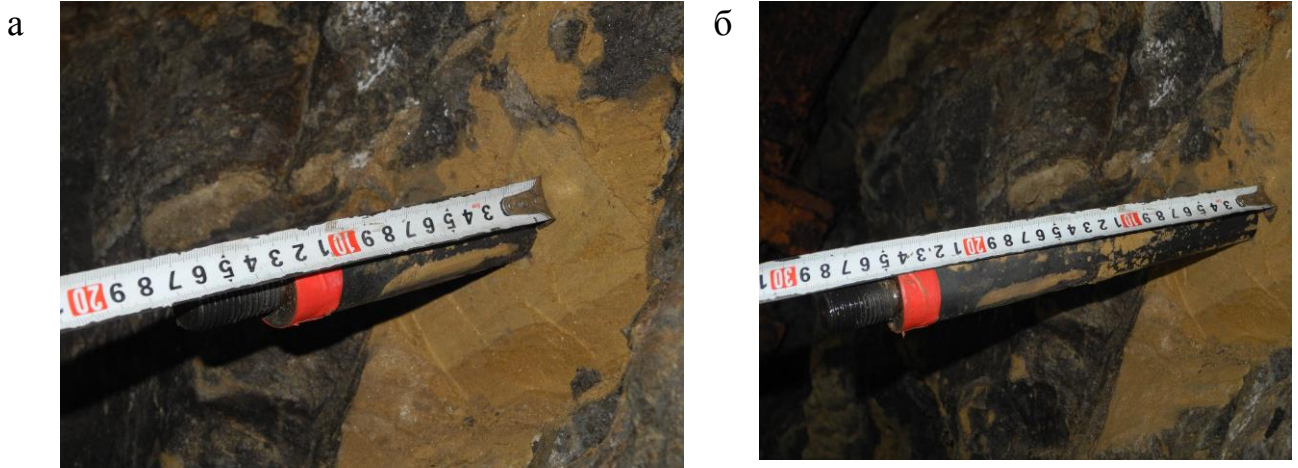


Рисунок 4.10 – Результаты замера величины извлечения анкера из песчаного сланца на первом (а) и втором (б) этапах

Технология 3

Для извлечения анкера из пород почвы использовался гидравлический пресс-насоса ГПНВ-5, технология работы с которым подробно описана в п. 3.1.3. Для извлечения анкера, вокруг хвостовика в породе выравнивалась площадка для установки опор прибора. С хвостовика анкера свинчивалась защитная насадка, а далее с помощью специального переходника он соединялся с обоймой ГПНВ-5. Затем, регулировочными опорами устройство устанавливали в горизонтальное положение, создавая предварительное натяжение в системе. Извлечение анкера производилось вращением ручки винтового насоса. По исчерпанию хода поршня гидронасоса винтовой шток гидроцилиндра выкручивался в первоначальное положение. Затем регулировочными опорами создается повторное натяжение. После исчерпания хода регулировочных винтов производили ремонт установки с использованием дополнительных жёстких подкладок.

На рисунке 4.11 приведено расположение установки на начальном (а) и промежуточном (б) этапах извлечения анкера.

Контроль величины перемещения анкера относительно поверхности упорной площадки осуществляется визуально и с помощью фототехники рулеткой или штангенциркулем. Давления в системе с помощью манометра.

Завершение извлечение анкера завершалось после фиксации минимальной по манометру величины давления в системе ГПНВ-5.

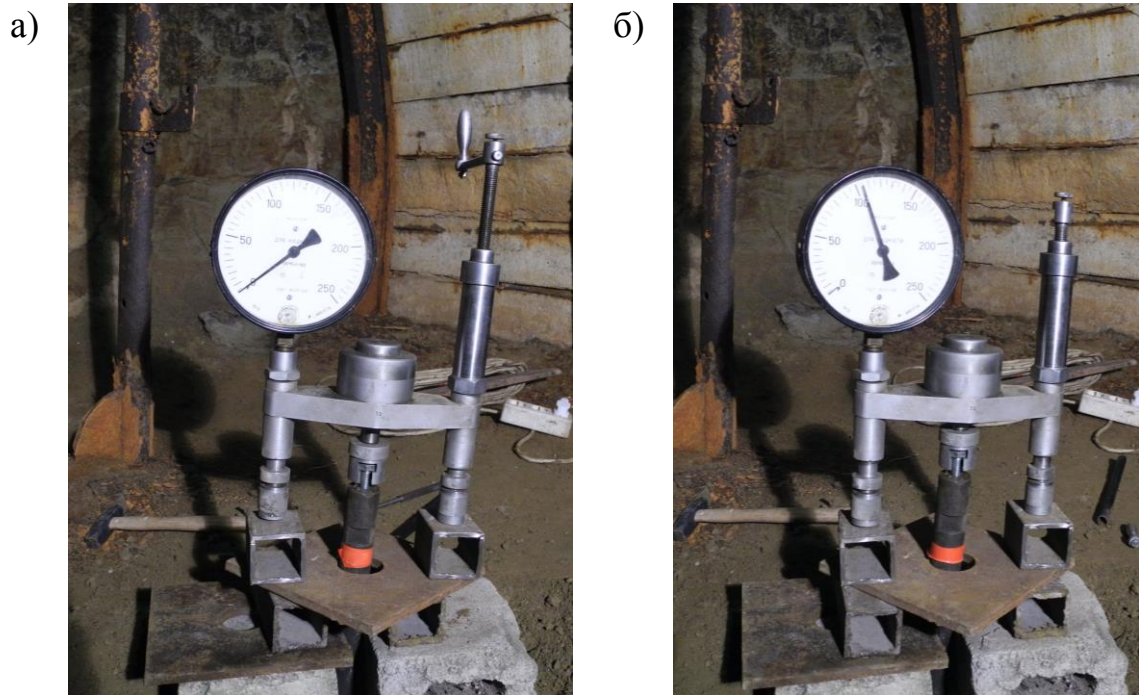


Рисунок 4.11 – Извлечение анкера из почвы с помощью гидравлического пресс-насоса ГПНВ-5 на начальном (а) и промежуточном (б) этапах

4.2 Результаты шахтных исследований по определению параметров способа при установке и извлечении анкеров

Результаты шахтных исследований по определению времени установки при закреплении анкеров, а также нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров и приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты шахтных исследований по определению времени установки и нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров

№ эксперимента	Тип горной породы	Диаметр анкера d_a , мм; диаметр шпура $d_{ш}$, мм; k_0	Глубина установки в породу $l_{уст}$, м	Время установки $T_{уст}$, с	Усилие извлечения, N_s , кН
1	Сланец глинистый	$d_a=33$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,1$	0,5	13	53,8
2	Сланец глинистый	$d_a=34,5$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,15$	1,0	38	72,3
3	Сланец глинистый	$d_a=36$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,2$	1,5	67	98,4
4	Сланец песчаный	$d_a=33$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,1$	0,5	40	70,5

№ эксперимента	Тип горной породы	Диаметр анкера d_a , мм; диаметр шпура $d_{ш}$, мм; k_0	Глубина установки в породу $l_{уст}$, м	Время установки $T_{уст}$, с	Усилие извлечения, N_s , кН
5	Сланец песчаный	$d_a=34,5$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,15$	1,0	78	74,8
6	Сланец песчаный	$d_a=36$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,2$	1,5	107	133,5
7	Песчаник	$d_a=33$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,1$	0,5	120	79,8
8	Песчаник	$d_a=34,5$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,15$	1,0	159	100,5
9	Песчаник	$d_a=36$ мм, $d_{ш}=30$ мм, $k_0=1,2$	1,5	222	157,5

Для удобства анализа полученные результаты изменения времени установки анкера ($T_{уст}$, с) и нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров (N_s , кН) обрабатывались с помощью пакета прикладных программ «Statistika». Результаты обработки представлены в виде поверхностей на рисунках 4.12-4.15. При этом, для удобства влияющие факторы были приняты в безразмерных относительных единицах.

Как видно из данных, представленных на рисунках 4.12 и 4.13, наименьшая ошибка аппроксимации $\pm 10\%$ ($R^2=0,9$) выражений (4.1) и (4.2) имеет место в следующих областях поверхностей (обозначены зелёным цветом):

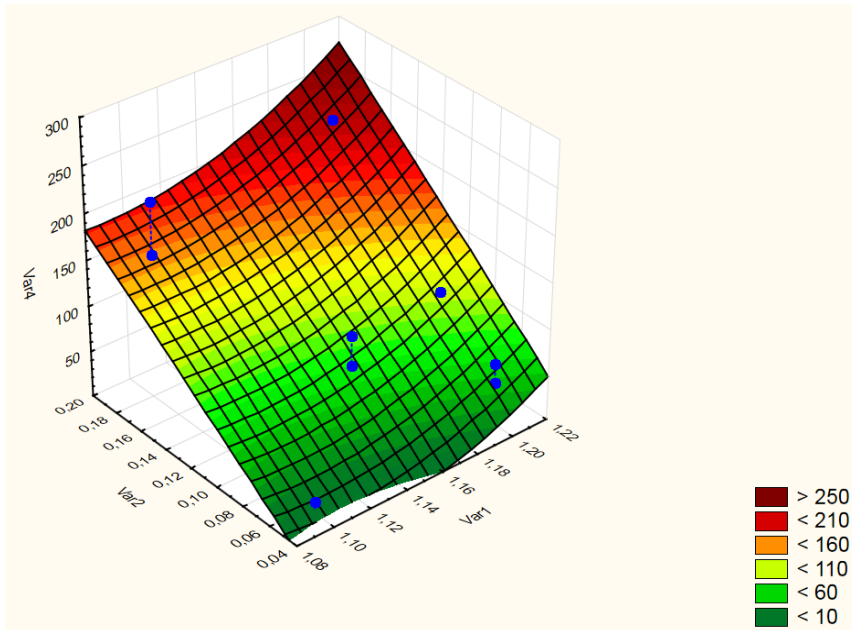
- для глинистого сланца: $k_o = 1,15-1,22$, при этом $T_{уст}$ изменяется от 30 до 50 с;
- для песчаного сланца: $k_o = 1,11-1,17$, при этом $T_{уст}$ изменяется от 40 до 65 с;
- для песчаника: $k_o = 1,1-1,14$, при этом $T_{уст}$ изменяется от 150 до 170 с.

Таким образом, рекомендуемые значения k_o для различных типов пород следующие:

– для глинистого сланца ($\frac{E_n}{E_a}=0,054$) $k_o = 1,18-1,25$. При этом, $T_{уст}$ изменяется от 35 до 55 с;

– для песчаного сланца ($\frac{E_n}{E_a}=0,095$) $k_o = 1,1-1,2$. При этом, $T_{уст}$ изменяется от 52 до 67с;

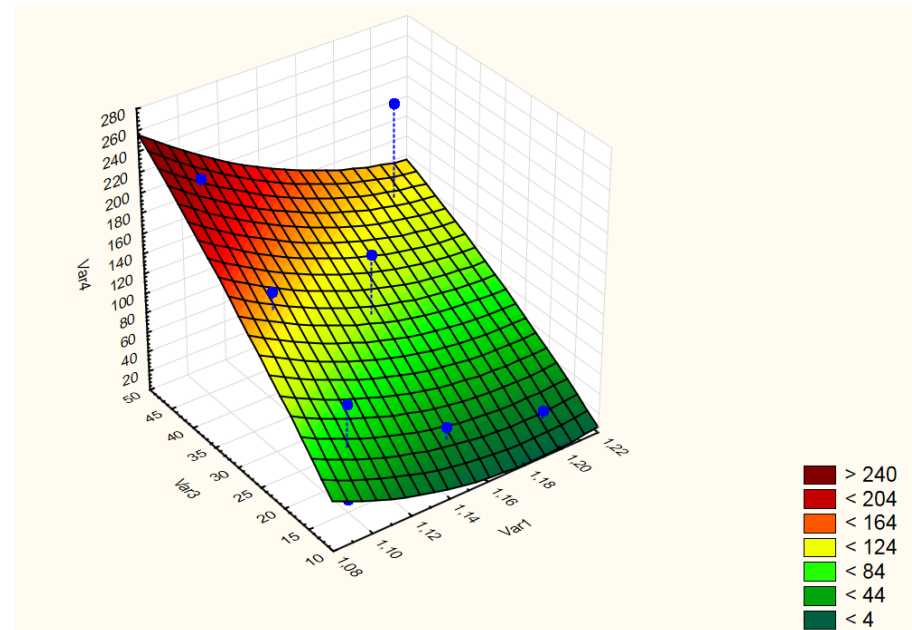
– для песчаника ($\frac{E_n}{E_a}=0,178$) $k_o = 1,09-1,12$. При этом, $T_{уст}$ изменяется от 140 до 160с.



Var1(k_o) – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;
 Var2($\frac{E_n}{E_a}$) – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ;
 Var4($T_{уст}$) – время установки анкера, с.

Рисунок 4.12 – Изменение времени установки анкера

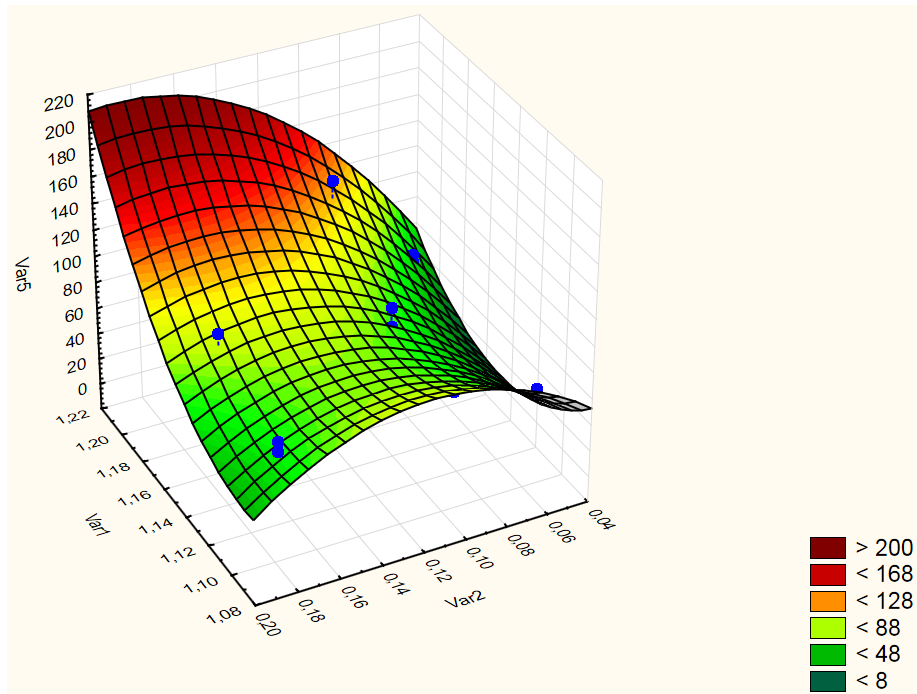
($T_{уст}$, с) от отношений k_o и $\frac{E_n}{E_a}$



Var1(k_o) – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;
 Var3($\frac{l_a}{d_a}$) – отношение длины анкера l_a к диаметру анкера d_a ;
 Var4($T_{уст}$) – время установки анкера, с.

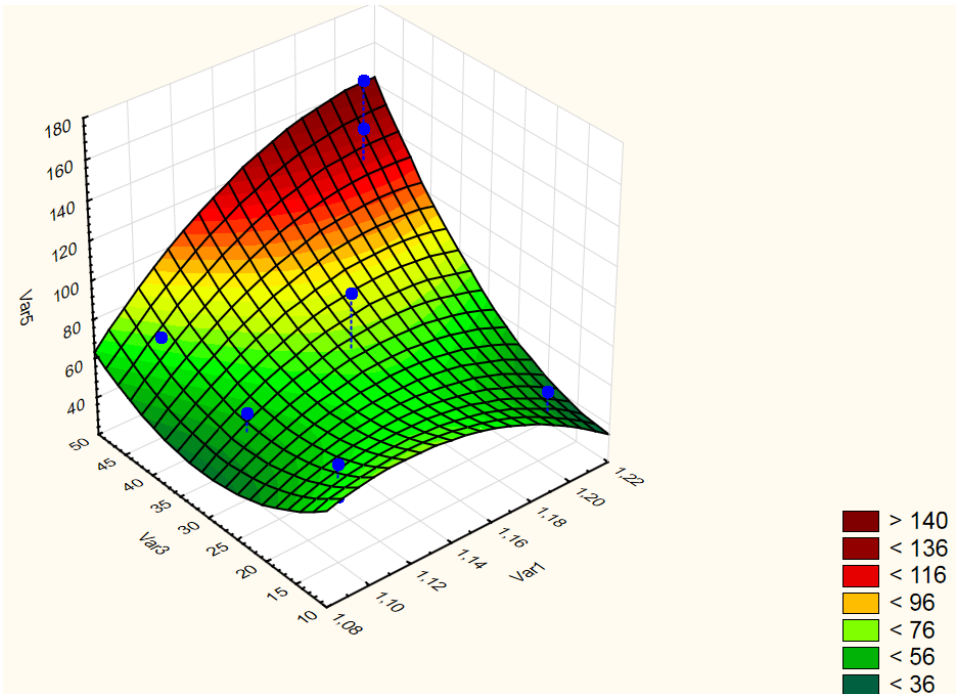
Рисунок 4.13 – Изменение времени установки анкера

($T_{уст}$, с) от отношений k_o и $\frac{l_a}{d_a}$



$\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;
 $\text{Var2}\left(\frac{E_n}{E_a}\right)$ – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ;
 $\text{Var4}(N_s)$ – сила, необходимая для преодоления силы трения, кН.

Рисунок 4.14 – Изменение силы, необходимой для преодоления силы трения (N_s) от отношений k_o и $\frac{E_n}{E_a}$



$\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;
 $\text{Var3}\left(\frac{l_a}{d_a}\right)$ – отношение длины анкера l_a к диаметру анкера d_a ;
 $\text{Var4}(N_s)$ – сила, необходимая для преодоления силы трения, кН.

Рисунок 4.15 – Изменение силы, необходимой для преодоления силы трения (N_s) от отношений k_o и $\frac{l_a}{d_a}$

Для определения значений T_{ycm} анкера в шпур с помощью динамической нагрузки в заданных горно-геологических условиях наиболее удобным способом является их расчет по регрессионным зависимостям.

При анализе поверхностей, представленных на рисунках 4.12 и 4.13, были получены регрессионные зависимости (4.1) и (4.2), позволяющие рассчитать величину T_{ycm} для различных типов пород в зависимости от влияющих факторов:

$$k_o, \frac{E_n}{E_a} \text{ и } \frac{l_a}{d_a}.$$

$$T_{ycm} = 984,5 \cdot k_o + 6231 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 113,7 \cdot (k_o)^2 - 4369,4 \cdot k_o \cdot \frac{E_n}{E_a} - 686,8 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2 - 1020, \text{ с} \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0,9.$$

$$T_{ycm} = 3385,1 - 6279,6 \cdot k_o + 50 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 2848,2 \cdot (k_o)^2 - 36,4 \cdot k_o \cdot \frac{l_a}{d_a} - 0,08 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a}\right)^2, \text{ с} \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0,9.$$

Область применения зависимостей (4.1) и (4.2) ограничена пределами изменения факторов, указанных в таблице 3.4 п. 3.2.1.

Таким образом, при установке анкеров в шпуры с помощью динамической нагрузки обеспечивается соблюдение требований [90] по продолжительности основных технологических процессов.

Как видно из данных, представленных на рисунках 4.14 и 4.15, наименьшая ошибка аппроксимации $\pm 12\%$ ($R^2=0,88$) выражений (4.3) и (4.4) имеет место в следующих областях поверхностей (обозначены зелёным цветом):

– для глинистого сланца: $k_o= 1,15-1,2$, при этом N_s изменяется от 25 до 50 кН;

– для песчаного сланца: $k_o= 1,11-1,18$, при этом N_s изменяется от 40 до 65 кН;

– для песчаника: $k_o= 1,09-1,13$, при этом N_s изменяется от 50 до 70 кН.

Таким образом, рекомендуемые значения k_o для различных типов пород следующие:

– для глинистого сланца ($\frac{E_n}{E_a}=0,054$) $k_0=1,18-1,25$. При этом, несущая способность анкера (N_s) будет находиться в пределах от 25 до 45 кН;

– для песчаного сланца ($\frac{E_n}{E_a}=0,095$) $k_0=1,1-1,2$. При этом, несущая способность анкера (N_s) будет находиться в пределах от 45 до 60 кН;

– для песчаника ($\frac{E_n}{E_a}=0,178$) $k_0=1,09-1,12$. При этом, несущая способность анкера (N_s) будет находиться в пределах от 50 до 70 кН.

Для определения значений N_s в заданных горно-геологических условиях наиболее удобным способом является их расчет по регрессионным зависимостям.

При анализе поверхностей, представленных на рисунках 4.14 и 4.15, были получены регрессионные зависимости (4.3) и (4.3), позволяющие рассчитать величину N_s для различных типов пород в зависимости от влияющих факторов:

k_0 , $\frac{E_n}{E_a}$ и $\frac{l_a}{d_a}$.

$$N_s = 4737,5 - 7803,6 \cdot k_0 - 9287,3 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 3193,4 \cdot (k_0)^2 + 9157,2 \cdot k_0 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 2977,3 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2, \text{ кН} \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0,88.$$

$$N_s = 2576,2 \cdot k_0 - 18,3 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 1267,3 \cdot (k_0)^2 + 14,2 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} + 0,05 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a}\right)^2 - 1208,7, \text{ кН} \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0,88.$$

Область применения зависимостей (4.3) и (4.4) ограничена пределами изменения факторов, указанных в таблице 3.4.

Проведенные исследования позволили установить рациональную область

применения способа установки анкеров в направляющий шпур под действием динамической нагрузки.

Установлено, что при k_0 находящихся в пределах 1,18-1,25 (для глинистого сланца), 1,1-1,2 (для песчаного сланца) и 1,1-1,13 (для песчаника) значение нагрузок для преодоления сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров составляет от 50 до 70% от величин нагрузок для установки анкеров в направляющий шпур.

4.3 Выводы по главе

1. Выполненные шахтные исследования подтвердили адекватность разработанных математических моделей, описывающих устойчивость анкера, устанавливаемого в направляющий шпур меньшего диаметра под действием динамической нагрузки.

2. Результаты проведенных исследований в натуральных условиях подтвердили возможность применения предложенного нового способа закрепления анкеров в горных породах.

3. **Впервые** по результатам шахтных экспериментов установлены зависимости, описывающие изменение времени установки анкера в направляющий шпур при различных типах пород с учетом коэффициента натяга (k_0), отношения модулей упругости породы и материала анкера и отношения длины анкера к его диаметру.

4. **Впервые** по результатам шахтных экспериментов установлены зависимости изменения нагрузок необходимых на преодоление сил трения при извлечении анкера из массива, представленного различными типами пород, учитывающие коэффициент натяга (k_0), отношения модулей упругости породы и материала анкера и отношения длины анкера к его диаметру.

5. Проведенные исследования позволили скорректировать область применения предложенного способа установки анкеров в горные породы по значениям величин нагрузок для преодоления сил трения и времени установки анкера в направляющий шпур.

6. **Доказано**, что несущая способность цельного металлического анкера с диаметром более 22 мм, устанавливаемого в породный массив с помощью динамической нагрузки с энергией удара 45 Дж и частотой ударов 1300 ударов/мин на глубину не менее 0,5 м при прочности пород на одноосное сжатие не менее 28 МПа и коэффициенте натяга не менее 1,1 составляет более 50 кН, а время установки – до 200 с.

РАЗДЕЛ 5

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА
И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ**

5.1 Сопоставление результатов теоретических, лабораторных и шахтных исследований

С целью проверки сходимости результатов теоретических, лабораторных и шахтных исследований, результаты которых описаны в разделах 2-4 были выполнены следующие сопоставительные расчеты. Для условий выполненных лабораторных и шахтных экспериментов были по теоретически установленным зависимостям рассчитаны эквивалентные напряжения, максимальные напряжения, статические и динамические нагрузки для установки анкеров в шпур, контактные динамические нагрузки, максимальные динамические напряжения, время установки анкеров в шпур, нагрузки для преодоления сил трения при извлечении анкеров (формулы 2.123-2.157). Результаты выполненных расчетов сведены в таблицах 5.1-5.8.

Таблица 5.1 – Результаты сравнения напряжений, возникающих в начальный момент закрепления анкера динамической нагрузкой

№ п/п	Наименование породы	$E_{п}/E_{а}$	k_{o}	l_{a}/d_{a}	Напряжения, МПа		Примечание
					σ_{max} , МПа	$\sigma_{э}$, МПа	
1	Сланец глинистый	0,054	1,1	15	3,63	6,17	Максимальное расчётное значение ($l_{a} = 2500$ мм; $d_{a} = 22$ мм) $\sigma_{max}=58$ МПа $<\sigma_{птт}=390$ МПа (максимальные напряжения анкера на изгиб). При этих же условиях $\sigma_{э}=94,8$ МПа
			1,2	30	4,38	7,23	
			1,3	45	5,39	8,78	
2	Сланец песчаный	0,095	1,1	15	5,27	8,70	
			1,15	30	8,31	13,3	
			1,2	45	10,16	16,2	
3	Песчаник	0,178	1,1	15	7,3	11,9	
			1,13	30	12,9	20,1	
			1,17	45	17,5	28,0	

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.7 и в таблице 5.1 максимальные напряжения (σ_{\max}), определённые по теоретической зависимости (формула 2.8) для условий лабораторных исследований, проведенных на моделях глинистого, песчанистого сланцев и песчаника, ($k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$) изменяются в пределах от 3,63 до 17,5 МПа. При этом, для условий $l_a = 2500$ мм; $d_a = 22$ мм σ_{\max} составляет 58 МПа.

Эквивалентные напряжения для условий ($k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$) изменяются в пределах от 6,17 до 28,0 МПа, а для условий $l_a = 2500$ мм; $d_a = 22$ мм σ_s составляет 94 МПа. Кроме того теоретически в главе 2 доказано, что устойчивость сплошного металлического анкера, изготовленного из стали марки 4 и выше, с диаметром большим, чем у направляющего шпура, на начальном участке закрепления его в породном массиве под действием нагрузки с коэффициентом динамичности, равным двум, обеспечивается при длине анкера до 2,5 м и диаметре 22 мм.

Таблица 5.2 – Сравнение статических нагрузок для закрепления анкеров (в натуре) по результатам теоретических и лабораторных исследований

№ п/п	Наименование породы	$E_{п}/E_a$	k_o	l_a/d_a	$P_{ст}$, кН		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Лабораторные эксперименты	
1	Сланец глинистый	0,054	1,1	15	69,0	87,1	-26,2
			1,2	30	160,2	223,7	-28,4
			1,3	45	307,4	305,6	+0,6
2	Сланец песчаный	0,095	1,1	15	100,2	116,6	-16,4
			1,15	30	236,7	187,2	+20,9
			1,2	45	337,7	260,8	+29,5
3	Песчаник	0,178	1,1	15	138,8	136,4	+1,73
			1,13	30	264,6	207,2	+27,7
			1,17	45	404,1	311,3	+29,8

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.8 а и в таблице 5.2 статические нагрузки, определённые по теоретической зависимости (формула 2.152) для условий лабораторных экспериментов на моделях глинистого, песчанистого

сланцев и песчаника при $k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$ изменяются в пределах от 69 до 404 МПа, при этом максимальное расхождение результатов теоретических и лабораторных исследований не превышает 29,8 %.

По мнению автора это связано с тем, что при решении теоретической задачи учитывались основные влияющие факторы, что привело к высокой степени идеализации результатов. Но вместе с тем расхождение результатов в пределах 30% говорить о высокой степени адекватности разработанных математических моделей, описывающих процесс установки анкера в направляющий шпур под действием статической нагрузки.

Таблица 5.3 – Сравнительные данные по результатам теоретических и лабораторных исследований на закрепление анкеров с применением динамической нагрузки (в натуре)

№ п/п	Наименование породы	E_n/E_a	k_o	l_a/d_a	$P_{дин}$, кН		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Лабораторные эксперименты	
1	Сланец глинистый	0,054	1,1	15	138	174,2	-26,2
			1,2	30	320,4	225,6	-29,6
			1,3	45	614,8	611,2	+0,6
2	Сланец песчаный	0,095	1,1	15	200,4	233,2	-16,4
			1,15	30	473,4	374,4	+20,9
			1,2	45	675,4	521,6	+22,8
3	Песчаник	0,178	1,1	15	277,6	272,8	+1,7
			1,13	30	529,2	414,4	+21,7
			1,17	45	808,2	622,6	+23,0

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.8 б и в таблице 5.3 динамические нагрузки, определённые по теоретической зависимости (формула 2.153) для условий лабораторных экспериментов на моделях глинистого, песчаного сланцев и песчаника при $k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$ изменяются в пределах от 174 до 622 МПа, при этом максимальное расхождение результатов теоретических и лабораторных исследований не превышает 29,6 %.

Динамические нагрузки, определённые при проведении лабораторных исследований, позволяют выбрать говорить о хорошей достоверности полученных результатов и дают возможность обосновано выбрать оборудование для установки анкера.

Таблица 5.4 – Сравнительные данные результатов теоретических и лабораторных исследований по определению времени установки анкеров (в натуре) с применением динамической нагрузки

№ п/п	Наименование породы	$E_{п}/E_{а}$	k_o	l_a/d_a	$T_{уст}, с$		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Лабораторные	
1	Сланец глинистый	0,054	1,1	15	17	14	+21,4
				30	26	22	+18,2
				45	35	29	+20,7
2	Сланец песчаный	0,095	1,15	15	51	40	+27,5
				30	88	78	+12,8
				45	122	107	+14,0
3	Песчаник	0,178	1,1	15	143	120	+19,2
				30	184	159	+15,7
				45	255	222	+14,9

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.9 б и в таблице 5.4, время установки анкера, рассчитанное по зависимости (2.156) при $k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$ для глинистого, песчанистого сланцев и песчаника изменяется от 14 до 222 с. При этом, максимальное расхождение результатов теоретических и лабораторных исследований не превышает 27,5 %.

Результаты лабораторных исследований по определению времени установки анкеров показали, что по предложенной технологии оно не превышает 200 с. Это удовлетворяет требованиям документов, регламентирующих параметры технологии анкерного крепления (время установки анкера не должно превышать 5 мин).

Таблица 5.5 – Сравнительные данные результатов теоретических и шахтных исследований по определению времени установки анкеров с применением динамической нагрузки

№ п/п	Наименование породы	$E_{п}/E_{а}$	k_o	l_a/d_a	$T_{уст}, с$		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Шахтные исследования	
1	Сланец глинистый	0,054	1,2	15	29	24	+20,8
				30	56	46	+21,7
				45	79	67	+17,9
2	Сланец песчаный	0,095	1,15	15	51	45	+13,3
				30	88	71	+23,9
				45	122	104	+17,3
3	Песчаник	0,178	1,1	15	143	112	+27,6
				30	184	159	+15,7
				45	255	215	+18,6

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.9 б и в таблице 5.5, время установки анкера, рассчитанное по зависимости (2.156) при $k_o=1,1-1,2$ и $l_a/d_a=15-45$ для глинистого, песчанистого сланцев и песчаника изменяется от 29 до 255 с. Фактическое же время установки составляет от 24 до 215 с. Максимальное расхождение результатов теоретических и лабораторных исследований не превышает 27,5 %. Это связано, по мнению автора, с расхождением фактических значений модуля упругости для пород от использованных при расчёте (не учтена анизотропия, слоистость и влажность реальных горных пород), а также с изменением фактического значения диаметра шпура по его длине в сравнении с теоретическим.

Таблица 5.6 – Сравнительные данные результатов теоретических и лабораторных исследований нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров (в натуре)

№ п/п	Наименование породы	E_n/E_a	k_o	l_a/d_a	N_s , кН		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Лабораторные эксперименты	
1	Сланец глинистый	0,054	1,1	15	58,7	53,8	+8,4
			1,2	30	74,8	85,9	-14,8
			1,3	45	154,1	149,2	+3,2
2	Сланец песчаный	0,095	1,1	15	71,8	70,5	+1,8
			1,15	30	89,8	74,8	+16,7
			1,2	45	146,9	133,5	+9,1
3	Песчаник	0,178	1,1	15	72,1	79,8	-10,7
			1,13	30	106,4	100,47	+5,6
			1,17	45	163,6	157,5	+3,7

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.9 в и в таблице 5.6 нагрузки, необходимые для преодоления сил трения при извлечении анкеров, определённые по теоретической зависимости (формула 2.157) для условий лабораторных экспериментов на моделях глинистого, песчанистого сланцев и песчаника при $k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$ изменяются в пределах от 53,8 до 157,5 кН, при этом максимальные расхождение результатов теоретических и лабораторных ис-

следований не превышает 16,7 %. К примеру максимальное значение несущей способности анкера длиной 1,5 м при $k_o=1,17$, установленного в песчанике составило 157,5 кН/анкер.

Уточнённые значения нагрузок, позволяют обосновать область применения предложенной технологии установки по несущей способности крепи.

Таблица 5.7 – Сравнительные данные результатов теоретических и шахтных исследований нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкеров

№ п/п	Наименование породы	$E_{п}/E_a$	k_o	l_a/d_a	N_s , кН		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Шахтные исследования	
1	Сланец глинистый	0,054	1,2	15	59,4	59,0	+0,5
				30	60,2	53,4	+12,4
				45	65,2	53,4	+22
2	Сланец песчаный	0,095	1,15	15	64,6	58,9	+9,6
				30	78,9	69,4	+13,7
				45	92,4	83,7	+10,4
3	Песчаник	0,178	1,1	15	67,2	59,8	+12,3
				30	68,8	63,4	+8,5
				45	77,9	71,0	+9,7

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.9 в и в таблице 5.7 нагрузки, необходимые для преодоления сил трения при извлечении анкеров в условиях исследований глинистого, песчанистого сланцев и песчаника при $k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$ изменяются в пределах от 53,4 до 83,7 кН, при этом максимальные расхождение результатов теоретических и лабораторных исследований не превышает 22 %. Например, максимальное значение несущей способности анкера длиной 1,5 м при $k_o=1,15$, установленного в песчаном сланце составило 83,7 кН/анкер.

Для более точного получения результатов необходимо проводить исследования по определению механических характеристик горных пород в забойных условиях, а также совершенствовать технологию установки анкеров.

Таблица 5.8 – Сравнительные данные результатов теоретических ($\sigma_{дин}^{max}$) – предельные напряжения в массиве, МПа и расчетных данных, полученных по результатам лабораторных исследований

№ п/п	Наименование породы	E_p/E_a	k_o	l_a/d_a	$\sigma_{дин}^{max}$, МПа		Расхождение результатов, %
					Теоретические	Расчетные данные, полученные по результатам лабораторных исследований	
1	Сланец глинистый	0,054	1,2	15	2,2	2,4	-9
				30	4,4	5,1	-16
				45	6,6	7,3	-11
2	Сланец песчаный	0,095	1,15	15	4,2	4,6	-10
				30	8,3	8,7	-5
				45	12,5	13,2	-6
3	Песчаник	0,178	1,1	15	7,3	8,0	-10
				30	14,6	15,3	-5
				45	21,9	23,0	-5

Как видно из данных, представленных на рисунке 2.9 а и в таблице 5.8, предельные динамические напряжения, возникающие в массиве при установке анкеров в массив (расчетные данные, полученные при проведении лабораторных исследований) для экспериментальных условий ($k_o=1,1-1,3$ и $l_a/d_a=15-45$) изменяются в пределах от 2,4 до 23 МПа, что ниже предела прочности на одноосное сжатие пород.

При этом максимальное расхождение результатов теоретических и расчетных данных, полученных по результатам лабораторных исследований, не превышает 16 %, что подтверждает адекватность разработанной теоретической модели, описывающей изменение НДС в системе «анкер – породный массив».

5.2 Разработка технологии реализации способа

Перед началом работ проверяют и приводят в безопасное состояние рабочее место. К рабочему месту подносятся необходимые инструменты и оборудование, анкера. Рабочее место должно быть оснащено следующим инструментом и приспособлениями: штанга для обorkи отслоившихся кусков угля и породы, лопаты, обушок, шаблон, отвесы, рулетка, буровые штанги, резцы, буродержатель, ключ для проворачивания штанги в шпуре, полук, лестница.

После этого растягивают и подсоединяют электрические кабели и шланги к оборудованию. Производят проверку сверла и отбойного молотка, а также проверяют работу оборудования вхолостую.

Выполняется разметка шпуров под анкера с помощью отвеса, рулетки и шаблона. Шаблоном задают направление бурения шпуров.

Работы по бурению шпуров производятся двумя рабочими.

Сначала готовят лунку и производят забуривание на глубину от 50 до 70 мм при помощи забурника и буродержателя кратковременными включениями сверла. Бурение шпуров, расположенных на высоте более 1,5 м, производится с предварительно установленного полка. При бурении шпуров необходимо периодически производить удаление из шпура буровой мелочи.

Для удобства установки анкеров в массив 50-70 мм от устья шпура разбуривают пробуренный шпур коронкой, диаметр которой равен диаметру анкера. Глубина шпуров контролируется с помощью шаблона и рулетки.

Бурение шпуров производится в установленной паспортом на ведение работ последовательности.

Визуально контролируется состояние рабочего электрооборудования, бурового инструмента и правильность установки полка.

Установка анкера в направляющий шпур производится не менее, чем двумя рабочими. В начале устанавливают на отбойный молоток ударную насадку. На хвостовик анкера, с целью защиты резьбы при забивании, навинчивают специальную насадку. Затем, в разбуренное устье шпура вручную устанавливается анкер. При этом, должно соблюдаться соосное расположение анкера и отбойного молотка. Установка производится до полного закрепления анкера в породе.

Установка анкеров, расположенных на высоте более 1,5 м, производится с предварительно установленного полка. В процессе установки визуально контролируется правильность установки анкера, состояние отбойного молотка и электрооборудования, а также правильность расположения рабочего на полке при установке анкера на высоте более 1,5 м.

После окончания работ отсоединяют кабели и шланги от оборудования. Лишние инструменты уносят из забоя.

5.3 Разработка методики расчёта параметров

Методика расчета параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера разработана на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных автором в разделах 2-4. Блок-схема алгоритма расчета представлена на рисунке 5.1.

Сущность способа установки анкеров заключается в бурении в породном массиве шпура с диаметром меньшим, чем у анкера, в который с помощью отбойного молотка устанавливается анкер.

Способ рекомендуется для применения при креплении выработок рамно-анкерными креплениями для закрепления боков и почвы выработок, проводимых в породах I и II категории устойчивости с прочностью на одноосное сжатие от 20 до 50 МПа при водопритоках до 3 м³/ч.

Параметрами способа являются: диаметры анкера и направляющего шпура, длина анкера, несущая способность анкера, плотность установки анкеров на закрепляемой поверхности.

1) Исходными данными для расчета являются:

- физико-механические свойства вмещающих выработку пород;
- горнотехнические условия проведения выработки.

Значения модулей упругости и прочности вмещающих пород определяются на образцах, отбираемых в забойной части выработки, по стандартным методикам. Расчетные значения параметров, определяются с учетом значений коэффициентов ослабления, рекомендуемых нормативными документами.

Определение параметров способа осуществляется на основании горно-геологических и горно-технологических условий проведения выработки, с учетом требований действующих нормативных документов. Порядок расчета следующий:

2) Рассчитывается средневзвешенная прочность пород, вмещающих выработку согласно [89, 170].

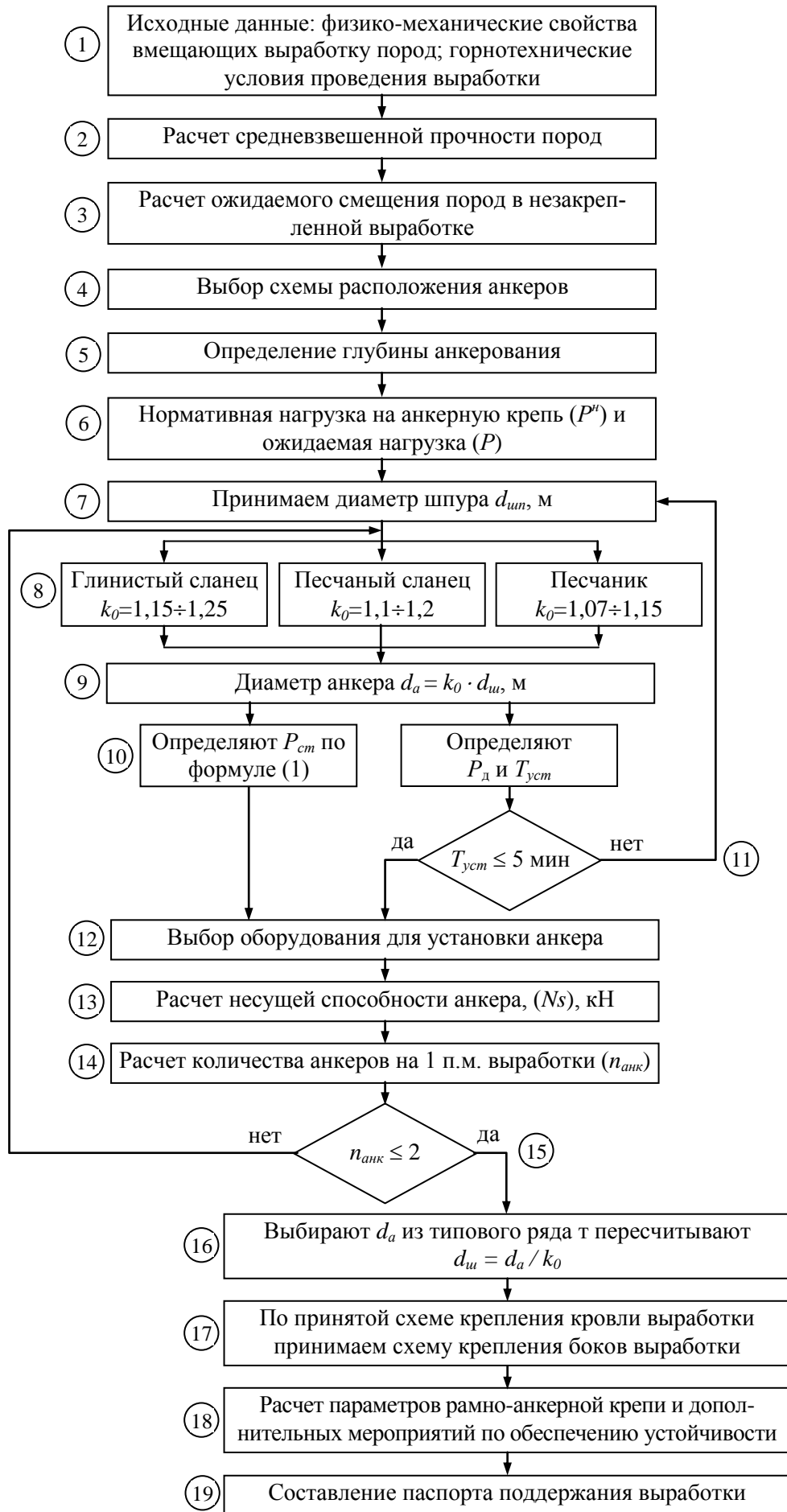


Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритма расчета

3) Рассчитываются ожидаемые смещения пород в незакрепленной выработке согласно [89, 170].

4) На основании горно-геологических и горно-технологических условий проведения выработки предварительно выполняется выбор схемы расположения анкеров на закрепляемой поверхности [170].

5) На основании горно-геологических условий проведения выработки, предварительно выполняется выбор глубины анкерования (длина анкера – l_a), которая должна быть не более 1,5 м.

6) С использованием монограммы [170, рис.5], на основании определенных U_6 и $U_{пр}$ принимается нормативная нагрузка на анкерную крепь (p^H), и в соответствии с [170] определяется ожидаемая нагрузка на нее (P) [170].

7) Предварительно принимается диаметр шпура для установки анкера $d_{ш}$.

8) По известным значениям модуля упругости породы $E_{п}$ и модуля упругости материала анкера E_a ориентировочно принимается значение коэффициента $k_0 = d_a/d_{ш}$ (отношение диаметров анкера и шпура).

Рекомендуется принимать:

– для глинистых сланцев $k_0=1,15-1,25$;

– для песчаных сланцев – $k_0=1,1-1,2$;

– для песчаников – $k_0=1,07-1,15$.

9) Предварительно определяется значение диаметра анкера: $d_a = k_0 \cdot d_{ш}$.

10) Рассчитываются значения динамической (P_d) и статической ($P_{ст}$) нагрузок, необходимых для установки анкера, а также необходимое для этого время ($t_{уст}$):

$$P_{ст}^H = 10453,7 \cdot k_0 + 1366,4 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 4015,6 \cdot k_0^2 - 443,2 \cdot k_0 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 578,7 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a} \right)^2 - 6635,2, \text{ кН} \quad (5.1)$$

$$P_d^H = 2 \cdot P_{ст}^H \quad (5.2)$$

$$T_{уст} = 1442,2 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 705,4 \cdot k_0 + 2,4 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 946,2, \text{ с} \quad (5.3)$$

11, 12) По значению величины P_d выбирается оборудование для установки анкера. В случае, если расчетное время $t_{уст} > 5$ мин, то уменьшается значение $d_{ш}$ и повторяются расчеты (п.п. 8-10).

13) Рассчитывается несущая способность анкера (N_s) по формуле

$$N_s = 920,6 - 706,9 \cdot k_0 - 501 \cdot \frac{E_n}{E_a} + 0,36 \cdot \frac{l_a}{d_a}, \text{ кН} \quad (5.4)$$

14) Рассчитывается ориентировочное количество анкеров на 1 п.м. выработки ($n_{анк}$):

$$n_{анк} = P \cdot \frac{B}{N_s} \text{ с}, \quad (5.5)$$

где $n_{анк}$ – ориентировочное количество анкеров на 1 п.м. выработки; P – ожидаемая загрузка на крепь (см. п.5), кПа; B – ширина (высота) выработки.

Принимаемое количество анкеров должно быть целым (округляется с запасом в большую сторону), причем количество анкеров на квадратный метр закрепляемой поверхности не должно превышать 2.

15) В случае недостаточного значения N_s изменяется значение k_0 в рекомендуемых пределах и повторяется расчет.

16) С учетом типового ряда d_a , выпускаемого промышленностью [90], окончательно принимается диаметр шпура $d_{ш}$.

17) Схема установки анкеров в боку выработки окончательно принимается с учетом принятых параметров крепления кровли выработки и технологии ведения горных работ (Приложение Д)

18) Выполняется расчет параметров рамно-анкерной крепи и параметров дополнительных мероприятий по обеспечению устойчивости выработки.

19) На основании выполненных расчетов и типовых паспортов составляется паспорт поддержания выработки, который утверждается в установленном [91, 194] порядке.

Изложенная выше «Методика расчета параметров...» была согласована проректором по учебной работе ГОУВПО «ДОННТУ», заместителем начальника Госгортехнадзора ДНР и утверждена генеральным директором ГП «ДУЭК» (приложение Е).

5.4 Внедрение основных результатов работы

Основные выводы и рекомендации диссертационной работы внедрены в следующих документах:

– в утвержденной «Методике определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера» (приложение Е), которая принята к внедрению на шахтах ГУП ДНР «ДУЭК» (приложение Ж);

– в утвержденных генеральным директором ГУП «ДУЭК» «Рекомендациях по поддержанию подготовительных выработок шахт ГП «ДУЭК», проводимых в соответствии с программой развития горных работ на 2021 год, разработанных на основании методики расчета параметров анкерных породо-армирующих систем» (приложение К);

– в учебном процессе, при подготовке специалистов 21.05.04 «Горное дело», специализация «Подземная разработка пластовых месторождений» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Прикладная механика», «Крепление горных выработок», «Способы охраны горных выработок», «Ремонт и погашение горных выработок», а также при выполнении выпускных квалификационных работ (приложение Л).

5.5 Расчёт ожидаемого экономического эффекта от внедрения предлагаемого способа установки анкеров

При расчете ожидаемого экономического эффекта от внедрения предлагаемого способа установки анкеров сравниваются затраты на установку сталеполлимерного и предлагаемого безклеевого анкера. Затраты рассчитаны для одного ан-

кера, устанавливаемого в типичных для условий шахт ДНР горно-геологических и горнотехнических условиях. При сравнении учитывались забойные затраты (заработная плата, материалы, амортизация оборудования) по каждому из способов установки при одинаковой глубине анкерования и несущей способности крепи (с учётом требуемой для её обеспечения плотности анкерования).

Исходные данные для расчёта и результаты сравнения способов установки анкеров по элементам затрат для условий песчаного сланца представлены в таблицах 5.9-5.13.

Таблица 5.9 – Исходные данные для сравнения технологий установки анкеров

№ п/п	Наименование параметра	Ед. изм.	Вид анкера	
			сталеполимерный	безклеевой
1	Длина анкера	м	1,5	1,5
2	Диаметр анкера	мм	22	22
3	Тип вмещающих пород		ПС	ПС
4	Прочность пород на сжатие	МПа	32	
4	Диаметр шпура	мм	26	20
4	Масса анкера	кг	4,95	4,95
5	Несущая способность	кН/анкер	120	141,4
6	Воспринимаемая нагрузка	кПа	120	141,4

Таблица 5.10 – Расчёт заработной платы на установку анкера по сравниваемым технологиям

№ п/п	Наименование работ	Ед. изм.	Объём работ	Расценка, руб./ед	Общие затраты, руб.
Установка сталеполимерного анкера					
1	Бурение шпуров	шп.м	1,5	26,9	40,35
2	Установка анкера	шт.	1,0	108,0	108,00
Итого затрат					148,35
Установка безклеевого анкера					
1	Бурение шпуров	шп.м	1,7	23,5	39,98
2	Установка анкера	шт.	1,0	84,0	84,00
Итого затрат					123,95
Разница					24,4, руб

Таблица 5.11 – Расчёт стоимости материалов для установки анкеров по выбранной технологии

№ п/п	Наименование материалов	Ед. изм.	Кол-во, ед.	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
Установка сталеполимерного анкера					
1	Анкер диаметром 22 мм, длиной в сборе 1,5 м (с контурным замком)	шт.	1	157,48	157,48
2	Ампула 25/500	шт.	2	92,14	184,28
Итого затрат					341,76
Установка безклеевого анкера					
1	Анкер диаметром 22 мм, длиной в сборе 1,5 м (с контурным замком)	шт.	1	157,48	157,48
Итого затрат					157,48
Разница					184,28

Таблица 5.12 – Расчёт амортизационных отчислений на дополнительное оборудование, используемое при установке анкеров по сравниваемым технологиям

№ п/п	Наименование оборудования	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Технический ресурс установки анкеров, шп./м	Фактический использованный ресурс установки анкеров, шп./м	Амортизация, %
Установка сталиполимерного анкера					
1	Буровая пневматическая установка MQT-120	270	60000	10000	14,4
Затраты на амортизацию оборудования, руб./анкер					6,75
Установка безклеевого анкера					
1	Буровая пневматическая установка MQT-120	270	60000	10000	14,4
2	Отбойный молоток	30	1000	300	15,0
Затраты на амортизацию оборудования, руб./анкер					10,75
Разница, руб.					3,4

Таблица 5.13 – Сводные затраты на производство

№ п/п	Статьи затрат	Ед. изм.	Вид анкера		Разница
			Сталеполимерный	Безклеевой	
1	Затраты на материалы,	руб./анкер	341,76	157,48	-184,18
2	Затраты на оплату труда		148,35	123,95	-24,4
3	Амортизация оборудования		6,75	10,15	+3,4
Всего затрат			496,86	291,58	-205,28

Таким образом, ожидаемый экономический эффект при установке только одного анкера длиной 1,5 м по предлагаемой технологии составит 205,28 руб. (по сравнению с технологией установки сталеполимерного анкера).

5.6 Выводы по главе

1. Сопоставление результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований показало, что расхождение их не превышает 30 %.

2. Разработана технология реализации предложенного способа установки анкеров, обеспечивающая устойчивость как самого анкера в начальной стадии его установки, так и системы «анкер – породный массив».

3. Разработана, и согласована с Госгортехнадзором ДНР и утверждена ГУП ДНР «ДУЭК» «Методика определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера».

4. Основные выводы и рекомендации диссертационной работы внедрены при разработке «Методике определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера», «Рекомендациях по поддержанию подготовительных выработок шахт ГП «ДУЭК», проводимых в соответствии с программой развития горных работ на 2021 год, разработанных на основании методики расчета параметров анкерных породо-армирующих систем», а также в учебном процессе, при подготовке специалистов 21.05.04 «Горное дело», специализация «Подземная разработка пластовых месторождений» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Прикладная механика», «Крепление горных выработок», «Способы охраны горных выработок», «Ремонт и погашение горных выработок», а также при выполнении выпускных квалификационных работ .

5. Расчётный ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенного способа установки анкеров составляет для анкера диаметром 22 мм и длиной 1,5 м – 205 руб. 28 коп. по сравнению с технологией установки сталеполимерных анкеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача установления особенностей и закономерностей взаимодействия горных пород и анкеров, закрепляемых с помощью динамической нагрузки в направляющих шпурах меньшего диаметра, позволяющих обосновать технологию и параметры реализации безклеевого способа анкерования, обеспечивающие повышение безопасности работ и снижение затрат на крепление.

Основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации работы заключаются в следующем:

1. Наиболее широко применяются в условиях шахт Донецкого угольного бассейна сталеполимерные анкера, до 40 % стоимости установки которых приходится на ампулы с полимерной смолой. Снизить затраты на крепление выработок возможно за счет разработки нового безклеевого способа установки анкера динамической нагрузкой в направляющий шпур меньшего диаметра.

2. Впервые экспериментально установлены зависимости, описывающие изменение статических нагрузок в модели и натуре, необходимых для установки анкера, времени установки анкера и нагрузок для преодоления сил трения при извлечении анкера для различных типов пород, с учетом коэффициента натяга (k_0), отношения модулей упругости породы и материала анкера и отношения длины анкера к его диаметру.

3. Установлено, что значение нагрузок для преодоления сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров составляют до 70 % от величин нагрузок для установки анкеров в направляющий шпур.

4. Впервые экспериментально установлены зависимости, описывающие изменение времени установки анкера в направляющий шпур и нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при извлечении анкера, для различных типов пород, значений коэффициента натяга (k_0), отношений модулей упругости породы и материала анкера, а также отношений длины анкера к его диаметру.

5. Проведенные исследования позволили установить область применения предложенного способа установки анкеров.

6. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что максимальное их расхождение не превышает 30 %.

7. Разработана технология реализации предложенного способа установки анкеров, обеспечивающая устойчивость как самого анкера на начальном этапе его установки, а также устойчивость системы «породный массив – анкер» в процессе дальнейшей установки.

8. Разработана, и согласована с Госгортехнадзором ДНР и утверждена ГУП ДНР «ДУЭК» «Методика определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера».

9. Основные выводы и рекомендации диссертационной работы внедрены при разработке «Рекомендаций по поддержанию подготовительных выработок шахт ГУП ДНР «ДУЭК», проводимых в соответствии с программой развития горных работ на 2021 год», а также в учебном процессе при подготовке специалистов 21.05.04 «Горное дело».

10. Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенного способа по сравнению с технологией установки сталеполимерных анкеров составляет 205 руб. 28 коп. при диаметре анкера 22 мм и его длине 1,5 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринько, Н.К. Повышение технического уровня угольной промышленности / Н.К. Гринько, Н.А. Архипов. – М.: Недра, 1991. – 222 с.
2. Доброгорский, Н.А. Уголь вчера, сегодня, завтра / Н.А. Доброгорский, В.И. Бычков. – Днепропетровск: Січ, 1994. – 93 с.
3. Голицын, М.В. Все об угле / М.В. Голицын, А.М. Голицын. – М.: Наука, 1989. – 192 с.
4. Архипов, Н.А. Добыча угля и рациональное природопользование / Архипов Н.А., Ельчанинов Е.А., Горбачев Д.Т. – М.: Недра, 1987. – 285 с.
5. Красник, В.Г. Программы перспективного развития угольной промышленности Украины / В.Г. Красник // Уголь Украины. – 2006. – № 12. – С. 6-8.
6. Концепція розвитку вугільної промисловості // Уголь Украины. – 2005. – № 9. – С. 3-4.
7. Радченко, В.В. Состояние подготовительных выработок на шахтах Украины и создание новой проходческой техники / В.В. Радченко, А.Т. Лаптев // Уголь Украины – 1999. – №5. – С.3-8.
8. Амоша, А.И. Комплексное освоение угольных месторождений Донецкой области / А.И. Амоша, В.И. Логвиненко, В.Г. Гринев. – Донецк: ИЭИ НАН Украины, 2007. – 216с.
9. Логвиненко, В.И. Проблемы развития добычи угля на шахтах Донецкой области [Электронный ресурс] / В.И. Логвиненко, В.Г. Гринев. – URL: http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/4282/st_27_3.pdf?sequence=1.
10. Савицкий, И.К. Формирование жизненного цикла угольной промышленности Донбасса [Электронный ресурс] / И.К. Савицкий. – URL: http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/9811/st_46_07.pdf.
11. Черевотский, Д.Ю. Промышленная политика для угольной промышленности [Электронный ресурс] / Д.Ю. Черевотский. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennaya-politika-dlya-ugolnoy-promyshlennosti>.

12. Кошелев, К.В. Поддержание сопряжений горных выработок / К.В. Кошелев, Н.В. Игнатович, В.И. Полтавец – К.: Техника, 1991. – 176 с.
13. Новиков, А.О. О состоянии горных выработок на шахтах ГП «ДУЭК» и путях его улучшения / А.О. Новиков, И.Н. Шестоपालов, В.Г. Лепешкин // Физика и техника высоких давлений. – 2020. – Т.30, №4. – С. 107-116.
14. Анкерное крепление горных выработок за рубежом: Анализ опыта создания, становления и современного состояния / П.В. Егоров, А.В. Ремезов, С.Е. Решетов [и др]; Под общ. ред. П.В. Егорова; Акад. горн. наук Кемеров.отделения.– Кемерово: Кузбассиздат, 2001. – 211с.
15. Юхимов, Я.И. Анкерные крепи и средства контроля за состоянием кровли (зарубежная информация) / Я.И. Юхимов, В.Г. Гальперин // Уголь Украины, 1983. – №10. – С.44-46.
16. Скотт, Д. Новая анкерная крепь [Текст] / Д. Скотт // Глюкауф, 1980. – №3. – С. 6-10.
17. Якоби, О. Практика управления горным давлением ; пер. с нем. / О. Якоби – М. : Недра, 1987. – 566 с.
18. Семевский, В.Н. Штанговая крепь / В.Н. Семевский. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 234 с.
19. Panek, L.A. Design for bolting stratified roof. Trans Soc Min Eng / L.A. Panek – 1964, June: 113-9.
20. Panek L.A. Roof/Rock Bolting / L.A. Panek, J.A. McCormick ; edited by A.V. Cummings and I.a. Given // SME Mining Engineering Handbooks / AIME, New York. – 1973. – pp. 13-130-13-131.
21. Panek L. Principles of Reinforcing Bedded Mine Roof with Bolts / L. Panek. – U.S. Bureau of Mines RI5156, 1956. – p.25.
22. Тимофеев, О.В. Методика расчета параметров штанговой крепи при упруго-пластическом деформировании массива пород / О.В. Тимофеев // Устойчивость и крепление горных выработок : межвузовский сборник. – Л., 1976. – №3.– С. 30-34.
23. Тимофеев, О.В. Эффективность упрочнения натяжными штангами призм отдельно-блочной и слоистой структуры / О.В. Тимофеев,

Н.С. Конокотов // Известия высших учебных заведений : Горный журнал. – 1974. – №6. – С. 45-48.

24. Баклашов, И.В. Конструкции и расчет крепей и обделок / И.В. Баклашов, О.В. Тимофеев – М. : Недра, 1980.

25. Борисов, А.А. Новые методы расчета штанговой крепи / А.А. Борисов – М. : Госгортехиздат, 1962. – 125 с.

26. Борисов, Л.А. Механика горных пород и массивов / Л.А. Борисов. – М. : Недра, 1980. – 351 с.

27. Борисов, А.А. Управление горным давлением / А.А. Борисов. – М. : Недра, 1983. – 168 с.

28. Широков, А.П. Анкерная крепь: справочник / А.П. Широков. – М. : Недра, 1990. – 295 с.

29. Мельников, Н.И. Анкерная крепь / Н.И. Мельников – М.: Недра, 1980. – 252 с.

30. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов – Днепропетровск. : Вильпо, 2002. – 372 с.

31. Широков, А.П. Теория и практика применения анкерной крепи / А.П. Широков – М. : Недра, 1981. – 381 с.

32. Широков, А.П. Расчет и выбор крепи сопряжений горных выработок / А.П. Широков, Б.Г. Писляков. – М. : Недра. 1973. – 304 с.

33. Широков, А.П. Крепление сопряжений лав / А.П. Широков, Б.А. Лидер, И. Петров. – М. : Недра, 1987. – 192 с: ил,

34. Широков, А.П. Расчет анкерной крепи для различных условий применения /Л.П. Широков, В.А. Лидер, Б.Г. Пислятов. – М. : Недра, 1976. – 208 с.

35. Топалкароев, А.Т. К расчету параметров анкерной (штанговой) крепи / А.Т. Топалкароев // Уголь. – 1962. – № 1 – С. 18-22.

36. Топалкароев, А.Т. Метод расчета параметров штанговой крепи по энергетическому балансу / А.Т. Топалкароев // Шахтное строительство. – 1966. – №8. – С. 18-21.

37. Топалкароев, А.Т. Энергетический метод анализа работы крепи в

обособленных выработках / А.Т. Топалкаров // Известия высших учебных заведений : Горный журнал. – 1969. – №5. – С. 29-32.

38. Юрченко, И.А. Энергетический подход к расчету штанговой крепи / И.А. Юрченко // Физико-технические проблемы горного производства. – 1970. – №1. – С. 27-32.

39. Evaluating Roof Control in Underground Coal Mines with the Coal Mine Roof Rating / C. Mark, G.M. Molinda, A.P. Schissler, W.J. Wuest / In: Peng, S.S., ed. Proceedings, 13* International Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, University of West Virginia, 1994. – pp. 252-260.

40. Molinda, G.M. Coal Mine Roof Rating (CMRR): A Practical Rock Mass Rating for Coal Mines / G.M. Molinda, C. Mark. – Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior : Bureau of Mines : IC 9387. – 1994. – 83 pp.

41. Dolinar, D.R. Trends in Roof Bolt Application / D.R. Dolinar, S.K. Bhatt / Proceedings, New Technology for Coal Mine Roof Support. (NIOSH) Publication No. 2000-151 : IC 9453. – 2000. – pp. 43-52.

42. Mark, C. Analysis of Roof Bolt Systems / C. Mark / Proceedings, 20th International Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, West Virginia University, 2001. – pp. 218-225.

43. Factors Influencing Intersection Stability in U.S. Coal Mines / G.M. Molinda, C. Mark, E.R. Bauer, D.R. Babich, D.M. Pappas / In: Peng SS, ed. Proceedings, 17* International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV : University of West Virginia, 1998. – pp. 267-275.

44. Mark, C. Analysis of roof bolt systems / Christopher Mark, Gregory M. Molinda Dennis R. Dolinar // Mining Engineer NIOSH : Pittsburgh Research Laboratory Pittsburgh, Pennsylvania USA.

45. Mark, C. Design of Roof Bolt Systems / C. Mark, D.R. Dolinar, R. Tuchman, eds. // New Technology for Coal Mine Roof Support : proceedings, NIOSH Open Industry Briefing / NIOSH IC 9453, 2000. – pp. 111-132.

46. Molinda, G.M. Assessing Coal Mine Roof Stability Through Roof Fall Analysis // G.M. Molinda, C. Mark, D.R. Dolinar // New Technology for Coal Mine Roof

Support : proceedings, NIOSH Open Industry Briefing / NIOSH IC 9453, 2000 – pp. 53-72.

47. Pappas, D.M. Roof and Rib Fall Accidents and Statistics: A Recent Profile / D.M. Pappas, E.R. Bauer, C. Mark // In Mark, C, Dolinar, D.R., Tuchman, R., eds. New Technology for Coal Mine Roof Support : Proceedings, NIOSH Open Industry Briefing, NIOSH IC 9453, 2000. – pp. 3-22.

48. Gerdeen, J.C. Design Criteria for Roof Bolting Plans Using Fully Grouted Non-Tensioned Bolts to Reinforce Bedded Mine Roof / J.C. Gerdeen, V.W. Snyder, G.L. Viegelahn, J. Parker – U.S. Department of the Interior : Bureau of Mines, OFR 46-80. – Vols. III-IV. – 1979.

49. Damberger, H.H. Effect of Geology on Roof Stability in Room-and-Pillar Mines in the Herrin (No. 6) Coal of Illinois / H.H. Damberger, W.J. Nelson, H.F. Krause, / Proceedings, 1st Conference on Ground Control Problems in the Illinois Coal Basin, Carbondale, IL : Southern Illinois University at Carbondale, 1980. – pp. 14-32.

50. Molinda, G.M. Coal Mine Roof Rating (CMRR) / G.M. Molinda, C. Mark // A Practical Rock Mass Rating for Coal Mines / Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior : Bureau of Mines, IC 9387. – 1994. – 83 pp.

51. Barton, N. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports / N. Barton, R. Lien, J. Lunde // Rock Mechanics. – 1974. – pp. 189-236.

52. Whickham, G.E. Support determination based on geological predictions / G.E. Whickham, H.R. Tiedeman, E.H. Skinner / Proc. North American Rapid Excavation and Tunnelling Conf. – Chicago, 1972. – Vol. 1 – pp. 43-64.

53. Scott, J.J. Roof Bolting in Mining-USA / J.J. Scott / Proceeding, Norsk Jord- ogFjellteknisk Forbuns – Oslo : Norway, November 27. – 1992. –13 pp.

54. Molinda, G.M. Factors Influencing Intersection Stability in U.S. / G.M. Molinda, C. Mark, E.R. Bauer, D.R. Babich, D.M. Pappas // Coal Mines. / In: Peng SS, ed. Proceedings, 17th International Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, University of West Virginia, 1998. – pp. 267-275.

55. Unal, E. Empirical Approach to Calculate Rock Loads in Coal Mine Roadways / E. Unal / In: Peng SS, ed. Proceedings, 5th International Conference on

Ground Control in Mining : Morgantown, WV, University of West Virginia, 1984. – pp. 232-246.

56. Mazzoni, R.A. A trouble shooting Guide for Roof Support Systems / R.A. Mazzoni, G.J. Karabin, J.A. Cybulski – MSHA IR 1237, 1996. – 101 pp.

57. Mark, C. Design of Roof Bolt Systems / C. Mark / Proceedings, New Technology for Coal Mine Roof Support : NIOSH Publication No. 2000-151, IC 9453. – pp. 111-131.

58. Bieniawski, Z. Strata Control in Mineral Engineering / Z.Bieniawski. – John Wiley & Sons, Inc., 1987. – pp. 29-57.

59. Алик, А.М. Штанговая крепь на сланцевых шахтах / А.М. Алик. – М. : Недра, 1964. – 130 с.

60. Thomas, F.M. Roof bolting / F.M. Thomas / Trans. Of Canadian Inst. Mng. and Met., 1950. – vol.23. – Pp. 365-368.

61. Fletcher, R. Roof bolting equipment and practices / R. Fletcher / Mng. Cong. J., Nov., 1956. – Ph. 80-82.

62. Middendorf, H. Ankerabau in Abbaustrecken / H. Middendorf, O. Jacobi // Glucauf. – vol.88. – 1952. – Ph. 25-26.

63. Alliman, G. Le boulon d'ancrage a expansion "Ancrall" / G. Alliman // Revue de l'industrie minerale. – vol. 33. – 1952. – 585 p.

64. Peng, S.S. Design criteria for resin bolting / S.S. Peng, I.B. Guo / Soc. Of Mng. Eng. SME annual meteng, 1989. – 7 p.

65. Peng, S.S. Causes of massive directional roof falls in room and pillar mines / S.S. Peng / Proc. Int. Conf. on Ground Control in Mining. Morgantown : West Virginia University, 1999. – Pp. 8-10.

66. Zhang, X. Design consideration for tensioned bolts / X. Zhang, S. Peng / 21th Int. Conf. on Ground control in mining : Morgantown, WVU, 2002. – Pp. 131-140.

67. Peng, S.S. Roof Bolting Adds Stability to Weak Strata / S.S. Peng // Coal Age Magazine, December, 1998. – Pp. 32-38.

68. Gale, W.J. Optimization of Reinforcement Design of Coal Mine Roadways / W.J. Gale, M.W. Fabjanczyk, R.J. Guy // In: Aziz, N.I., Peng, S., eds. / Proceedings,

11th International Conference on Ground Control in Mining, Wollongong, New South Wales, Australia: University of Wollongong, 1992. – Pp. 272-279.

69. Molinda, G.M. Factors Influencing Intersection Stability in U.S. / G.M. Molinda, C. Mark, E.R. Bauer, D.R. Babich, D.M. Pappas //Coal Mines / In: Peng SS, ed. Proceedings, 17* International Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, University of West Virginia, 1998. – Pp. 267-275.

70. Peng, S.S. Coal Mine Ground Control / S.S. Peng. – John Wiley & Sons, Mew York, 1978. – 491 p.

71. Peng, S. Coal Mine Ground Control / S. Peng. – John Wiley & Sons, Inc. – 1984 – Pp. 131-173.

72. Peng, S. Tailgate Support Practice in U.S. Longwall Mines – A Survey / S. Peng, K. Biswas / Proceedings of 13th Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, 1994. – Pp. 157-160.

73. Peng, S. Roof Bolting in Underground Mining: State of the Art View / S. Peng, D. Tang // International Journal of Mining Engineering. – v. 2. – 1984. – Pp. 1-42.

74. Signer, S. Comparisons of active versus passive bolts in a bedded mine roof / S. Signer, C. Mark / 12th Conference on ground control in mining : Morgantown, 1995. – Pp. 16-23.

75. Molinda, G. Factor influencing intersection stability in U.S. coal mines / S. Signer, C. Mark / Proc. Int. Conf. on Ground Control in Mining. Morgantown: West Virginia University, 1998. – Pp. 267-275.

76. Tingkan, I. Field monitoring of rock bolting performance in weak roof strata / I. Tingkan, B. Hebblewhite / Proc. Int. Conf. on Ground Control in Mining. Morgantown: West Virginia University, 1999. – Pp. 243-248.

77. Signer, S. A case study of bolt performance in a two-entry gateroad / S. Signer, J. Lewis / Int. Conf. on Ground Control in Mining. Morgantown: West Virginia University, 1999. – Pp. 11-17.

78. Mining through in panel entries and full-face recovery room without standing support at U.S. steel mine 50 / J. Stankus, Z. Wang, S. Guo, J. Blankenship / 17th Conference on ground control in mining : Morgantown, WV, 1998. – Pp. 21-30.

79. Bauer, E. Skin failure of roof and rib in undergr : Morgantown, WV, 1999. – Pp. 106-114.
80. Stankus, J. Ground control design for multiple seam mining / J. Stankus, J. Wang / 18th Conference on ground control in mining : Morgantown, WV, 1999. – Pp. 263-270.
81. Рахутин, В. Конструкция и параметры анкеро-пневматической крепи / В. Рахутин, В. Бузило, С. Швец // Подземное пространство мира. – 1996. – №4. – С. 42-43.
82. Якоби, О. Практика управления горным давлением / О. Якоби пер. с нем. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
83. Мельников, Н.И. Использование анкерной крепи за рубежом / Н.И. Мельников, В.С. Трушин. – М.: ЦНИЭИуголь, 1969. – 98 с.
84. Нильва, Э.Э. Горно-подготовительные работы на угольных шахтах / Э.Э. Нильва, И.Э. Цейтин. – М.: Недра, 1981. – 280 с.
85. Петер Ахиллес. Опыт проходки выработок прямоугольного сечения с анкерной крепью на выемочном участке 259 по пласту L(H1) на шахте “Августа Виктория” / Петер Ахиллес, РайнерФирхаус, Франк Люттиг // Глюкауф. – 1998. – №2. – С. 24-42.
86. Булич, Ю.Ю. О несущей способности анкерных штанг / Ю.Ю. Булич, С.А. Головки // Уголь Украины. – №9. – 2000. – С. 26-27.
87. Анкерная крепь: Справочник / А.П. Широков, В.А. Лидер, М.А. Дзауров, М.Е. Рыжковский, А.И. Петров – М.: Недра, 1990. – 205 с.
88. Ремезов, А.В. Анкерное крепление на шахтах Кузбасса и дальнейшее его развитие: учебное пособие / А.В. Ремезов, В.Г. Харитонов и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. – 471 с.
89. СОУ 10.1.00185790.011:2006. Подготовительные выработки на пологих пластах. Выбор крепления, способов и средств охраны, Мінпаливенерго України, Київ (2006).
90. СОУ 10.1.05411357.010:2014. Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования. – 84 с.

91. СОУ 10.1–00185790–002–2005 Правила технічної експлуатації вугільних шахт, Київ, Мінвуглепром України (2006).

92. Патент на корисну модель №55763 Україна. МКИ E21D 20/00. Спосіб встановлення анкера, М.М. Касьян, О.О. Новіков, Ю.А. Петренко, П.С. Дрипан, І.М. Шестопапов, С.Ю. Гладкий, Д.Д. Виговський, Заявл. 04.06.2010, опубл. 27.12.2010, бюл. № 24.

93. Методика определения параметров анкерных породо-армирующих систем для обеспечения устойчивости горных выработок : СТП (02070826) (26319481) / Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков и др. – Донецк–Доброполье, 2010. – 27 с.

94. Анкерная крепь: справочник / А.П. Широков, В.А. Лидер, М.А. Дзауров, М.Е. Рыжневский, А.И. Петров – М. : Недра, 1990. – 205 с.

95. Косков И.Г. Опыт применения анкерной крепи на шахтах Челябинского бассейна / И.Г. Косков. – М. : ЦНИЭИуголь, 1976. – 29 с.

96. Борисов, А.А. Новые методы расчета штанговой крепи / А.А. Борисов. – М. : Госгортехиздат, 1962. – 64 с.

97. Мельников, Н.И. Анкерная крепь / Н.И. Мельников.– М.: Недра, 1978.– 232с.

98. Штанговая крепь / В.Н. Семевский, В.М. Волжский, О.В. Тимофеев, А.П. Широков. – М. : Недра, 1965. – 328 с.

99. Махно, Е.Я. К вопросу о расчете штанговой крепи / Е.Я. Махно // Уголь. – 1959. –№5. – С. 41-42.

100. Biron, C. Design of Supports in Mines / C. Biron, E. Arioglu. – John Wiley & Sons, Inc., 1983. – Pp. 89-117.

101. Xiu, Z. Strategies for the Application of Rockbolting Technology to Longwall Gateroads / Z. Xiu, X. Wang, A. Wang // Chinese Coal Mines / proceedings of 16th Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, 1997. – Pp. 191-198.

102. Гетце, В. Основы применения анкерной крепи в горизонтальных выработках арочного сечения / В. Гетце // Глюкауф. – 1977. – №15. – С. 25-27.

103. Гетце, В. Проектирование анкерной крепи в пластовых штреках / В. Гетце // Глюкауф. – 1981. – №17. – С. 31-35.

104. Гетце, В. Границы, область применения и будущее развитие анкерной крепи / В. Гетце, П. Штефан, Х.А. Виганд // Глюкауф. – 1982. – №21. – С. 16-25.
105. Gerrard, C. Rock bolting in theory / C. Gerrard / Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting : Abisko, Sweden, 1983. – Pp.3-29.
106. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск. : Вильпо, 2002. – 372 с.
107. Виноградов, В.В. Геомеханика, мониторинг и основы технологии опорного крепления горных выработок / В.В. Виноградов / Уголь Украины. – 2000.– №9.– С. 7-12.
108. Скоростная подготовка штреков для высокопроизводительных лав глубоких шахт / Дж. Лиминг, Р. Холлидей, П. Алтуньян, В.Е. Хайндмарш // Уголь. – 1998. – №1. – С. 56-60.
109. Талобр, Ж. Механика горных пород : пер с франц. / Ж. Талобр. – М. : Госгортехиздат, 1960. – 430 с.
110. Югон, А. Штанговое крепление горных пород : пер. с франц. / А. Югон, А. Кост. – М. : Госгортехиздат, 1962. – 204 с.
111. Natau, O. Die Verbundwirkung Systemankerung-Gebirge / O. Natau, W. Lechnitz // Grundlegende Anwendungen der Anweisungen fur Felsmechanik : Felsmech. Koll. Karlsruhe, 1978. – Pp. 297-317.
112. Теория и практика применения трубчатой анкерной крепи : монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Поротников. – Днепропетровск : Систем. технологии, 2005. – 321 с.
113. Tadolini S. Cable Supports for Improved Longwall Gateroad Stability / S. Tadolini, R. Koch / Proceedings of 12th Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, 1993. – Pp. 9-15.
114. Fuller, P. Cable Support in Mining, / P. Fuller / Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting : Abisko, Sweden, 1983. – Pp. 511-521.
115. Fuller, P. FLEXIBOLT Flexible Roof Bolts : A New Concept for Strata Control / P. Fuller / Proceedings of 12th Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, 1993. – Pp.24-34.

116. Khair, A. Physical and Analytical Modeling of the Behavior of Truss Bolted Mine Roofs / A. Khair / Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting : Abisko, Sweden, 1983. – Pp.125-141.

117. Continuing Development of Innovative Cable Support Systems/ Oldsen J, Stankus J, Guo S., Khair A. / Proceedings of 16th Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, 1997. – Pp.117-129.

118. Smith, W. Roof Control Strategies for Underground Coal Mines / W. Smith / Information Circular 9351, the U.S. : Bureau of Mines, 1993. – p. 17.

119. Unal, E. Design Guidelines and Roof Control standards for Coal Mine Roofs : Ph.D. Dissertation / E. Unal ; Pennsylvania State University, University Park, PA, 1983. – p. 355.

120. Lang, T. Stabilization of Rock Excavations Using Rock Reinforcement / T. Lang, J. Bischoff / Proceedings 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics : AIME, New York, 1982. – Pp. 935-944.

121. Lang, TA. Theory and practice of rock bolting / TA. Lang // Trans AIME 1961. – 220:333-48.

122. Stankus, J. New Design Criteria for Roof Bolt Systems / J. Stankus, S. Guo / Proceedings of 16th Conference on Ground Control in Mining : Morgantown, WV, 1997. – Pp. 158-166.

123. Hoek, E. Underground excavations in rock / E. Hoek, ET. Brown / London : Institution of Mining and Metallurgy, 1980.

124. Hoek, E. Practical Estimates of Rock Mass Strength / E. Hoek, ET. Brown // Int. J.Rock Mech.Min.Sci. – 1997. – vol.34, No.8. – Pp. 1165-86.

125. Hoek, E. Underground Excavations in E.T / E. Hoek, ET. Brown . – Rock IMM, London, 1980. – 527 p.

126. The Nutcase Cable Bolt. Paper in nnovalive Wine Design for the 21st Century/ A. J. Hyett, W.F. Bawden, R. Powers, Rocque P. / Proceedings of the International Congress on vline Design, ed. by W. P. Bawden and J. F. Archibald (Kingston, ON, 23-26, Aug. 1993) 3alkema, 1993. – Pp. 409-419.

127. Лангош, У. Проектные основы управления горным давлением комби-

нированной крепью в пластовых выработках / У. Лангош // Глюкауф, 2002. – № 1. – С. 16-20.

128. Whickham, G.E. Support determination based on geological predictions / G.E. Whickham, H. R. Tiedeman, E. H. Skinner / Proc. North American Rapid Excavation and Tunnelling Conf., Chicago. – 1972. – Vol. 1. – Pp. 43-64.

129. Kuschel, K.H. Sprengvortrieb mit mehrschaligen Ausbau in Haupt – und Abbaustrecken / K.H. Kuschel. – Bergbau, 1986. – n.9. – s. 390-398.

130. Mazzoni, R.A. A Trouble shooting Guide for Roof Support Systems / R.A. Mazzoni, G.J. Karabin, J.A. Cybukski. – U.S. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration, IR 1237, 1996. – 101 p.

131. Wittenberg, D. Quality Management for Grouted Rockbolts / D. Wittenberg, U. Ruppel / Proceedings, 19th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, West Virginia University, 2000. – Pp. 249-254.

132. Haas, C.J. Analysis of Rockbolting to Prevent Shear Movement in Fractured Ground / C.J. Haas // Mining Engineering, 1981, Jun:691-704.

133. Ulrich, B.F. Relationships Between Annulus Thickness and the Integrity of Resin Grouted Bolts / B.F. Ulrich, J. Wuest, R.M. Stateham. – 1989. – 13 p.

134. Krauland, N. Rock bolting and economy / N. Krauland // Rock bolting – theory and applications in mining and underground construction ; editor Stephansson O. – Rotterdam: Balkema; 1983. – Pp. 499-507.

135. Optimization of Reinforcement Design of Coal Mine Roadways / Gale, WJ., Fabjanczyk, M.W., Tarrant, G.C. and Guy, R.J. / Proceedings, 11th International Conference on Ground Control in Mining : Wollongong, NSW, Australia, 1992. – Pp. 272-279.

136. Fairhurst, C. Roofbolting in Horizontally Laminated Rock / C. Fairhurst, B. Singh // Engineering and Mining Journal. – 1974. – v. 175, February. – pp. 80-90.

137. Thomas, E. Suspension Roof Support / E. Thomas, AJ. Barry, A. Metcalfe / Progress Report 1. – 1949. – p. 3. – USBM IC 7533.

138. Thomas, E. Progress and Problems in Roof Support / E. Thomas // Coal Age, Aug., 1956. – p. 87.

139. Jorstad, T. Rock bolting / T. Jorstad / M.S. Thesis : Colorado School of Mines, Golden, CO., 1967. – p. 168.

140. Franklin, J.A. Comparison of a Polyester Resin and a Mechanical Rockbolt Anchor / J.A. Franklin, P.R. Woodfield // Trans Inst Min Metall /Section A: Mining Industry, 1971. – pp. A91-100.

141. Баклашов, И.В. Конструкции и расчет крепей и обделок / И.В. Баклашов, О.В. Тимофеев. – М. : Недра, 1980.

142. Вагин, Н.А. Новый метод расчета параметров штанговой крепи / Н.А. Вагин // Известия высших учебных заведений : Горный журнал. – 1967. – №9. – С. 24-27.

143. Моделирование проявлений горного давления / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, Ю.И. Васильев, М.Ф. Шкляровский, Г.Г. Юревич – М.: Недра, 1968. – 278 с.

144. Круковский, А.П. Обоснование параметров и условий применения анкерной крепи на угольных шахтах : дис. канд. техн. наук / Александр Петрович Круковский. – Днепропетровск, 2005. – 175 с.

145. JunLu Luo. A new rock bolt design criterion and knowledge-based expert system for stratified roof. Blacksburg / Luo JunLu. – Virginia, 1999. – 177 pp.

146. Stillborg, B. Professional users handbook for rock bolting / B. Stillborg. – Lulea: Trans Tech Publ., 1994. – 164 pp.

147. Ficek, J. Obudowa kotwiowa jako skuteczny sposob zabezpieczenia wyrobisk gornicznych / J. Ficek, S. Konsek, M. Sobik / IX Int. Synp. Geotechnika'2002. – Gliwice, 2002. – 15 pp.

148. Фармер Я. Выработки угольных шахт / Я. Фармер ; пер. с англ. Е.А. Мельников. – М. : Недра, 1990. – 269 с.

149. Бабиюк Г.В. Способ создания армо-породных грузонесущих конструкций в кровле подготовительных выработок / Г.В. Бабиюк, А.А. Леонов // Строительство шахт, механика и разрушение горных пород : сб. науч. тр., Донбасский горно-металлургический институт. – Алчевск : ДГМИ, 1996.– С. 136-144.

150. Бабиюк, Г.В. Системное обоснование и разработка адаптивных способов

обеспечения надежности горных выработок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.15.04 «Шахтне и подземне строительство» / Г.В. Бабиюк ; Национальний горний університет. – Дніпропетровськ, 2005. – 35 с.

151. Бабиюк, Г.В. Изучение запредельных свойств армированных пород / Г.В. Бабиюк, А.А. Леонов // Сб. науч. трудов ДГМИ. – Вып. 15. – Алчевск : ИПЦ «Лад», 2002. – С. 18-28.

152. Бабиюк, Г.В. Выявление связи запредельных свойств с параметрами анкерной крепи / Г.В. Бабиюк, А.А. Леонов // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2002. – Вып. 15. – Том 2. – С. 95-102.

153. Бабиюк, Г.В. Взаимодействие анкеров с породным массивом / Г.В. Бабиюк, В.Ф. Пунтус // Известия Тульского государственного университета : Тульский государственный университет. – Тула: Гриф и К, 2009. – Вып. 4: Естественные науки. Серия «Науки о Земле» – С. 21-24.

154. Ключев, А.П. Перспективные способы управления состоянием разрушенного массива вокруг выработки на больших глубинах / А.П. Ключев, Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко // Известия Донецкого горного института. – Донецк, 1998. – №2. – С. 21-25.

155. Касьян, Н.Н. Влияние анкерной крепи на геомеханические процессы в массиве пород вокруг поддерживаемых выработок / Н.Н. Касьян, А.П. Ключев, В.И. Лысенко // Известия Донецкого горного института. – Донецк, 1996. – №1(3). – С. 57-60.

156. О применении анкерных крепей и систем для поддержания выработок глубоких шахт / Н.Н. Касьян, М.П. Зборщик, А.П. Ключев, П.С. Дрипан // Уголь Украины. – 1999. – № 10. – С. 24-27.

157. Сажнев, В.П. Обоснование пространственного ориентирования анкеров при креплении горной выработки / В.П. Сажнев // Известия Донецкого горного института. – 1999. – №2. – С. 55-59.

158. Snyder, VW. Analysis of beam building using fully grouted roof bolts / VW.Snyder // Rock bolting-theory and applications in mining and underground construction : editor Stephansson O. – Rotterdam: Balkema; 1983. – Pp. 187-194.

159. Snyder, V. Analysis of Beam Building Using Fully Grouted Roof Bolts / V. Snyder / Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting. – Abisko, Sweden, 1982. – Pp. 187-194.

160. Krohn, R. Experimental Verification of the Beam Building Mechanism Using Fully Grouted Resin Roof Bolts as Applied to Reinforcement of Bedded Mine Roof / R. Krohn / M.S. Thesis : Michigan Tech. University, Houghton, MI, 1978. – p.89.

161. Jeffery, R. Analysis of Rockbolt Reinforcement of Layered Rock Using Beam Equations / R. Jeffery, J. Daemen / Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting – Abisko, Sweden, 1982. – Pp. 173-185.

162. Stimpson, B. The Influence of Rock Bolt Location on the Reinforcement of Horizontally Bedding Roofs by Full Column Grouted Bolts / B. Stimpson / Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting. – Abisko, Sweden, 1982. – Pp. 195-204.

163. Ремезов, А.В. Анкерное крепление на шахтах Кузбасса и дальнейшее его развитие : учебное пособие / А.В. Ремезов, В.Г. Харитонов и др. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2006. – 471 с.

164. Заславский, Ю.З. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт / Ю.З. Заславский, А.Н. Зорин, И.Л. Черняк. – Киев : Техника, 1972. – 142 с.

165. Заславский, Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна / Ю.З. Заславский – М. : Недра, 1966. – 178 с.

166. Заславский, Ю.З. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт / Ю.З. Заславский, А.Н. Зорин, И.Л. Черняк. – Киев : Техника, 1972. – 152 с.

167. Борзых, А.Ф. Влияние ПГД на смещения пород, вмещающих подрабатываемый квершлаг / А.Ф. Борзых, О.В. Князьков, В.И. Лиликович // Уголь Украины. – 2002. – №12. – С. 25-27.

168. Ардашев, К.А. Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России / К.А. Ардашев, В.Б. Артемьев, В.А. Базиковец. – СПб, 2002. – 70 с.

169. Подготовительные выработки на пологих пластах. Выбор крепления, способов и средств охраны : СОУ 10.1.00185790.011: 2006.

170. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР : утв. Минуглепромом СССР 26.12.84. – 4-е изд., доп. – Ленинград : ВНИМИ, 1986. – 220 с. : ил.

171. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги : СОУ 10.1.05411357.010:2008

172. Временная методика по выбору параметров сталепolyмерного анкерного крепления подготовительных выработок в качестве основного и усиливающего вида крепи. – Донецк : Фонды ГП "ДОНУГИ", 2005. – Том 1, 2.

173. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М. : Стройиздат, 1983.

174. Герсеванов, Н.М. Теория продольного упругого удара с применением к определению сопротивления свай / Н.М. Герсеванов. Собрание сочинений. Т.1. Свайные основания и расчет фундаментов сооружений. М.: Стройвоенмориздат, 1948.–С. 72-94.

175. Офрихтер, Я.В. Использование волновой теории удара для определения несущей способности свай /Я.В. Офрихтер ,А.Б. Пономарев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т.10, №3. – С. 35-43.

176. Прочность. Устойчивость. Колебания. Т.1. Под общ. ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко.–М.: машиностроение, 1968 – 831с.

177. Дрипан, П.С. Устойчивость анкера при установке в породный массив под действием динамической нагрузки / П.С. Дрипан // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 3 (56). – С.37 – 45.

178. Дрипан, П.С. Устойчивость анкера при установке в породный массив под действием динамической нагрузки [Электронный ресурс] / П.С. Дрипан, И.Ф. Марийчук // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й междунар. науч.-практ. конф., 21-23 мая 2019 г., г. Донецк. Т. 1: Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве – Донецк : ГОУВПО "ДОННТУ", 2019. – С. 119-126.

179. Дворников, Л.Г. Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии / Л.Г. Дворников,

И.А. Жуков // Матер. XVI науч-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения.– Новокузнецк: Сиб. ГИУ, 2006.–С. 225-229.

180. Леденев, В.В. Несущая способность и деформируемость оснований и фундаментов при сложных силовых воздействиях / В.В. Леденев. – Тамбов: ФГБОУ ВПО, 2015. – 253 с.

181. Новиков, А.О. Математическая модель внедрения анкера в породный массив под нагрузкой / А.О.Новиков, П.С.Дрипан.– Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – №3(55). – С. 91-101.

182. Дрипан, П.С. Математическая модель процесса динамической установки анкера в направляющий шпур меньшего диаметра, пробуренный в породном массиве [Текст] / П.С. Дрипан, Я.В. Шажко // Физика и техника высоких давлений. – 2018. – №3. – С. 98-107.

183. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский – М: Высшая школа, 2004. – 664 с.

184. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шор, Г.Б. Иосимыч.–М.: Машиностроение, 1993. – 702с.

185. Соппротивление материалов / Под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Высшая школа, 1973. – 671с.

186. Дарков, А.В. Соппротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шапиро.– М.: Высшая школа, 1969.– 734с.

187. Дрипан, П.С. Ударная нагрузка при установке анкера в породный массив / П.С. Дрипан.– Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – №4(56). – С. 65-71.

188. Харрис, С.М. Справочник по ударным нагрузкам / С.М. Харрис, И.И. Крид. – Л.: Судостроение, 1980. – 359 с.

189. Насонов, И.Д. Моделирование горных процессов / И.Д. Насонов – М. : Недра, 1969. – 204 с.

190. Петренко, Ю.А. Моделирование физических процессов в горном производстве/ Борщевский С.В., Калякин С.А., Лабинский К.Н., Марийчук И.Ф. и др. // Учебное пособие. – Донецк: НОУЛИДЖ, 2016. – 250 с.

191. Основы моделирования геомеханических процессов / Под общей ред. Ефремова И.А. и Малеева Н.В. – Донецк: НОУЛИДЖ, 2012. – 263 с.

192. Механика горных пород : учебное пособие для вузов : В 2 т. / С.С. Гребенкин [и др.]. Под общ. ред. С.С. Гребенкина, Н.Н. Гавриша. – Донецк : ДонНТУ, 2004. – 169 с.

193. Новиков, А.О. Бесклеевой способ закрепления анкера под действием статической нагрузки // А.О. Новиков, П.С. Дрипан, И.Г. Старикова // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – Вып.1 (58). – С. 59-67.

194. Правила безопасности в угольных шахтах [Электронный ресурс] : утв. приказом № 36/208 от 18.04.2016 / М-во угля и энергетики ДНР, Гос. Ком. горн. и техн. надзора ДНР // Министерство угля и энергетики ДНР : офиц. сайт. – Донецк, 2015-2019. – Режим доступа: http://mintek-dnr.ru/zue/pravila_bezopasnosti_na_ugolnykh_shakhtakh.pdf.

Приложение А

Результаты испытаний моделей по определению статических нагрузок при закреплении анкеров, а также нагрузок, необходимых для преодоления сил трения при их извлечении

Таблица А.1. – Результаты испытаний по определению $P_{ст}$ для моделей, в которые анкера устанавливались с помощью статической нагрузки

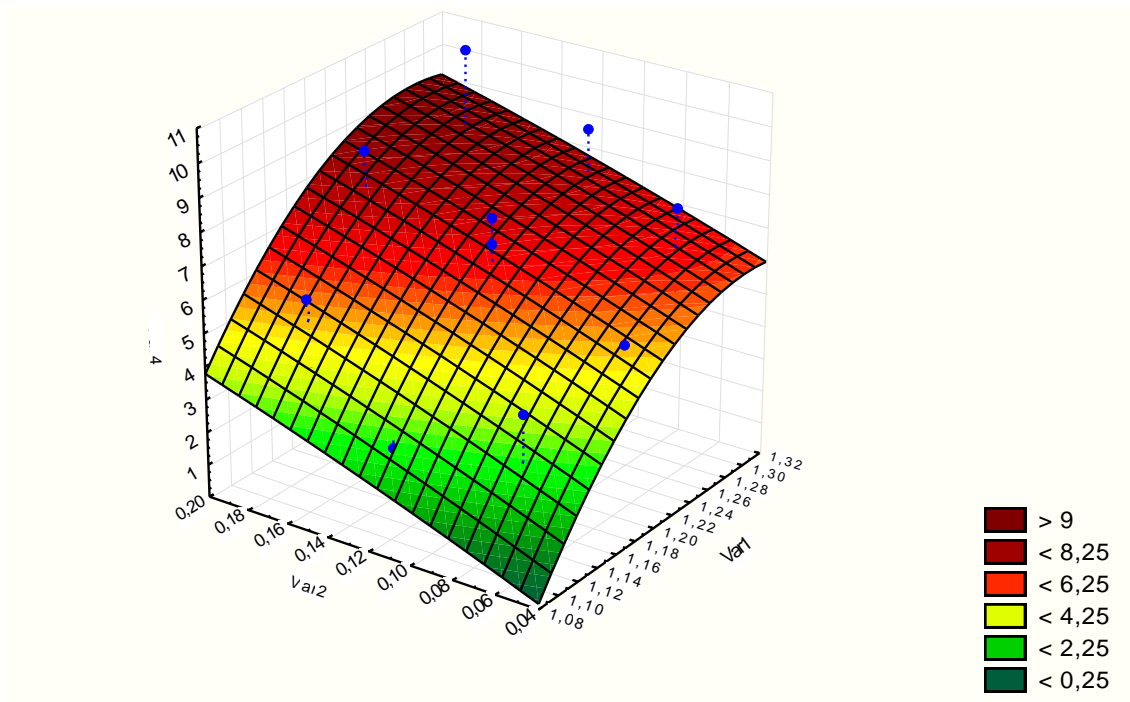
Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина вдавливания в породу, $l_{вд}$, мм	Статическая нагрузка $P_{ст}$, кН		
Глинистый сланец	1,1	0	0,0	0,0	0,0
		0,015	12,0	15,2	18,4
		0,03	20,8	24	27,2
		0,05	35,0	31,7	28,4
		0,064	40,7	44,3	47,9
		0,078	47,1	50,9	54,7
		0,086	59,3	55,1	50,8
		0,1	60,4	64,7	69
		0,125	70,3	74,9	79,5
		0,132	74,6	79,7	84,8
		0,141	89,9	84,1	78,3
		0,15	80,8	87,1	93,4
	1,2	0	0,0	0,0	0,0
		0,02	41,5	44,3	47,1
		0,035	76,5	73,4	70,3
		0,05	89,9	93,5	97,1
		0,06	108,8	113	117,2
		0,08	149,3	144,6	139,9
		0,1	168,7	173,8	178,9
		0,11	185,1	190,6	196,1
		0,12	216,1	209,8	203,5
		0,135	216,8	223,7	230,6
	1,3	0	0,0	0,0	0,0
		0,01	63,3	61,2	59,1
		0,025	98,9	101,4	103,9
		0,05	146,1	149,1	152
		0,07	193,3	190	186,7
		0,08	214,9	218,6	222,3
		0,1	255,4	259,7	264
		0,105	277	271,9	266,8
		0,115	291,6	297,9	304,2
		0,12	298,9	305,6	312,3

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина вдавливания в породу, $l_{вд}$, мм	Статическая нагрузка $P_{ст}$, кН			
Песчаный сланец	1,1	0	0,0	0,0	0,0	
		0,02	26,1	28	29,9	
		0,035	46,4	44	41,6	
		0,05	52,5	55,3	58,1	
		0,065	73,5	70,4	67,3	
		0,08	80,1	83,4	86,7	
		0,1	93,3	96,8	100,3	
		0,12	108,5	112,5	116,6	
		0,128	110,7	115,6	120,5	
		0,135	123,1	116,6	110,5	
	1,15	0	0,0	0,0	0,0	
		0,025	51,9	54	56,1	
		0,035	72,8	70,3	67,8	
		0,05	87,4	90,3	93,2	
		0,065	117,8	114,3	110,8	
		0,085	138,9	143,1	147,3	
		0,1	155,4	160	164,6	
		0,11	165,5	170,6	175,7	
		0,12	176,3	181,9	187,5	
		0,13	193,5	187,2	180,9	
	1,2	0	0,0	0,0	0,0	
		0,025	75,6	77,9	80,2	
		0,035	98,1	100,8	103,5	
		0,05	121,7	125,6	129,5	
		0,0603	145,5	150,2	154,9	
		0,08	204,3	199,1	193,9	
		0,1	230,1	235,5	240,9	
		0,11	254,7	248,6	241,9	
		0,12	253	259,1	265,2	
		0,125	254,3	260,8	267,3	
	Песчаник	1,1	0	0,0	0,0	0,0
			0,02	29,3	31,2	33,1
			0,045	63,5	61,2	58,9
0,05			63,3	66,5	69,7	
0,065			83,4	86,6	89,4	
0,085			114,8	110,7	106,6	
0,1			122,4	127	131,6	
0,11			127,5	132,6	137,7	
0,115			139,3	134,6	129,9	
0,12			131,2	136,4	141,7	
1,13		0	0,0	0,0	0,0	
		0,02	49,2	51,5	53,8	
		0,04	86,5	89,1	91,7	
		0,05	109	105,3	101,6	
		0,075	152,5	157,9	163,3	

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина вдавливания в породу, $l_{вд}$, мм	Статическая нагрузка $P_{ст}$, кН		
		0,085	179	176	173
		0,1	208,4	203,1	197,8
		0,105	203,4	208,9	214,4
		3	4	5	6
		0,11	207,8	213,9	220
		0,115	223,6	217,2	210,8
	1,17	0	0,0	0,0	0,0
		0,025	89,5	93,5	97,5
		0,04	133,7	129,2	124,7
		0,05	146,2	151,3	156,4
		0,0655	193,7	200	206,3
		0,085	249,8	256,5	263,2
		0,1	293,2	299,9	306,6
		0,105	300,1	307	313,9
		0,108	315,4	308,9	302,4
		0,11	304,3	311,3	318,3

Приложение Б

Результаты исследований изменения статической нагрузки в моделях



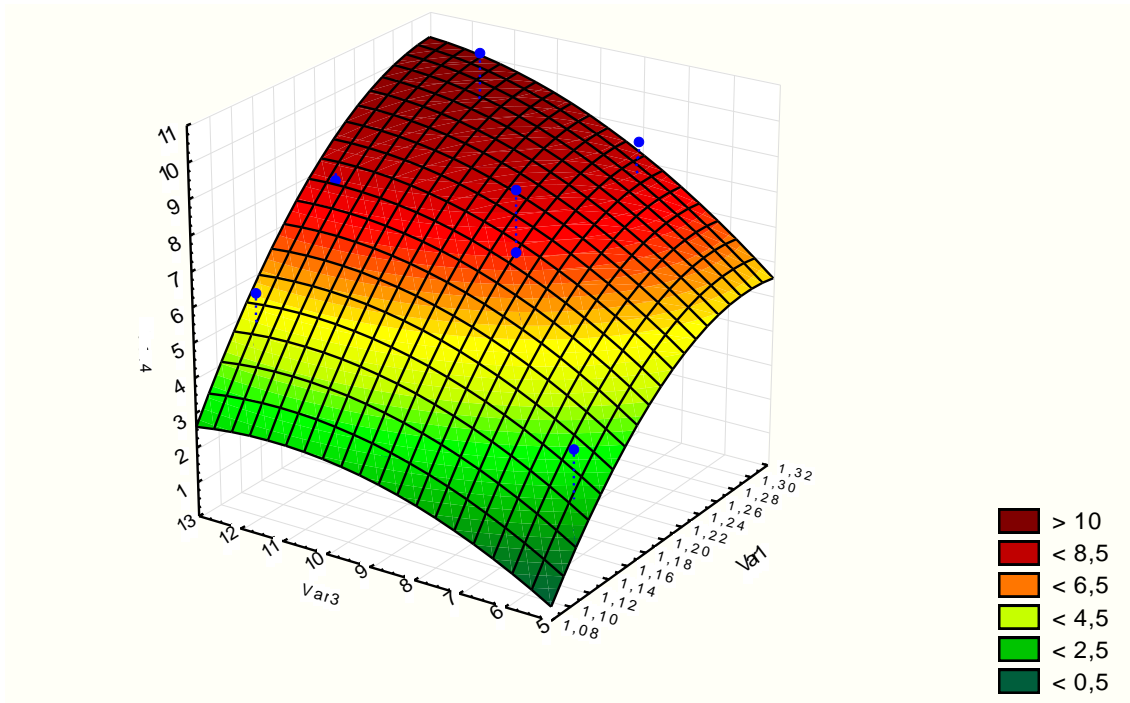
$\text{Var1}(k_o)$ – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;

$\text{Var2}\left(\frac{E_n}{E_a}\right)$ – отношение модулей упругости породы E_n и материала анкера E_a ;

$\text{Var5}(P_{ст}^H)$ – статическое усилие закрепления анкера в породе для модели, кН.

Рисунок Б.1 – Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$) (в модели)

от отношений $\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{E_n}{E_a}$



Var1(k_o) – отношение диаметров анкера d_a и шпура $d_{ш}$;

Var3($\frac{l_a}{d_a}$) – отношение длины анкера l_a к диаметру анкера d_a ;

Var5($P_{ст}^H$) – статическое усилие закрепления анкера в породе для модели, кН.

Рисунок Б.2 –Изменение статической нагрузки ($P_{ст}$) (в модели)

от отношений $\frac{d_a}{d_{ш}}$ и $\frac{l_a}{d_a}$

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЕ
СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В МОДЕЛЯХ

Зависимость $P_{ст}^M = f\left(k_0, \frac{E_n}{E_a}\right)$ для параметров модели

$$P_{ст}^M = 314,9 \cdot k_0 + 41,2 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 120 \cdot k_0^2 - 13,3 \cdot k_0 \cdot \frac{E_n}{E_a} - 17,4 \cdot \left(\frac{E_n}{E_a}\right)^2 - 199,8, \text{ кН} \quad (\text{Б.1})$$

Зависимость $P_{ст}^M = f\left(k_0, \frac{l_a}{d_a}\right)$ для параметров модели

$$P_{ст}^M = 294,6 \cdot k_0 - 0,05 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 116,6 \cdot k_0^2 + 1,32 \cdot k_0 \cdot \frac{l_a}{d_a} - 0,06 \cdot \left(\frac{l_a}{d_a}\right)^2 - 187,1, \text{ кН} \quad (\text{Б.2})$$

Область применения зависимостей ограничена пределами изменения факторов, указанных в табл. 3.4. (п. 3.2.1).

Таблица Б.1 – Результаты исследований по установке анкеров статической нагрузкой на физических моделях

Натуральные значения			Кодированные значения			Нагрузка $P_{ст}$, кН
$x_1=k_0$	$x_2=E_n$	$x_3=l_a$	x_1	x_2	x_3	
1,12	1,32	0,06	-1	-1	-1	1,35
1,28	1,32	0,06	+1	-1	-1	4,65
1,12	3,38	0,06	-1	+1	-1	3,91
1,28	3,38	0,06	+1	+1	-1	5,12
1,12	1,32	0,14	-1	-1	+1	4,45
1,28	1,32	0,14	+1	-1	+1	7,77
1,12	3,38	0,14	-1	+1	+1	5,88
1,28	3,38	0,14	+1	+1	+1	10,85
1,10	2,35	0,1	-1,215	0	0	2,8
1,30	2,35	0,1	1,215	0	0	8,95
1,20	1,1	0,1	0	-1,215	0	5,27
1,20	3,6	0,1	0	1,215	0	8,83
1,20	2,35	0,05	0	0	-1,215	4,04
1,20	2,35	0,15	0	0	1,215	7,91
1,20	2,35	0,1	0	0	0	7,1

Таблица Б.2 – Результаты экспериментальных исследований по определению статической нагрузки (в модели) при закреплении анкеров в образцах горных пород

№ п/п	Тип горной породы	Длина l_a , мм; диаметр анкера d_a , мм; длина шпура $l_{ш}$, мм; диаметр шпура $d_{ш}$, мм, k_0	Глубина вдавливания в породу l_b , мм	Статическая нагрузка $P_{ст}$, кН		
1	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	50	1,1	1,0	0,9
			100	2,05	1,9	1,75
			150	2,4	2,6	2,8
2	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	50	2,6	2,7	2,8
			100	5,05	5,2	5,35
			135	6,9	6,7	6,5
3	Сланец глинистый	$l_a=150\text{мм}, d_a=13\text{мм}, l_{ш}=180\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,3$	50	4,0	4,1	4,2
			100	7,35	7,2	7,05
			120	9,0	9,2	9,4
4	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	50	1,3	1,4	1,5
			100	2,65	2,8	2,95
			135	3,7	3,5	3,3
5	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,5\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,15$	50	2,6	2,5	2,4
			100	4,45	4,6	4,75
			130	5,8	5,6	5,4
6	Сланец песчаный	$l_a=150\text{мм}, d_a=12\text{мм}, l_{ш}=160\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,2$	50	3,7	3,8	3,9
			100	7,25	7,1	6,95
			125	7,7	7,9	8,1
7	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,1$	50	1,8	2,0	2,1
			100	3,65	3,8	3,95
			120	4,3	4,1	3,9
8	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,3\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,13$	50	3,1	3,2	3,3
			100	6,25	6,1	5,95
			115	6,0	6,2	6,4
9	Песчаник	$l_a=150\text{мм}, d_a=11,7\text{мм}, l_{ш}=140\text{мм}, d_{ш}=10\text{мм}, k_0=1,17$	50	4,7	4,6	4,5
			100	9,15	9,0	8,85
			110	9,2	9,4	9,6

Приложение В

Результаты испытаний моделей по определению времени установки анкеров

Таблица В.1. – Результаты экспериментальных исследований по определению времени установки при закреплении анкеров в образцах горных пород с использованием динамической нагрузки

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усреднённое время установки, $T_{уст}$, с
Глинистый сланец	1,1	0	0
		0,015	1
		0,03	2
		0,05	3
		0,064	4
		0,078	6
		0,086	8
		0,1	9
		0,125	9,5
		0,132	11
		0,141	12,5
		0,15	13
	1,2	0	0
		0,015	2
		0,03	4
		0,05	6
		0,064	9
		0,0782	13
		0,086	17
		0,1	21
		0,125	23
		0,132	25
		0,141	26
		0,15	27
	1,3	0	0
		0,015	3
		0,03	7
		0,05	10
		0,064	14
		0,078	18
		0,086	22
		0,1	26
		0,125	29
		0,132	32
		0,141	35
		0,15	37

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усреднённое время установки, $T_{уст}$, с
Песчаный сланец	1,1	0	0
		0,015	3
		0,03	7
		0,05	11
		0,064	15
		0,078	20
		0,086	25
		0,1	29
		0,125	32
		0,132	35
		0,141	38
	0,15	40	
	1,15	0	0
		0,015	5
		0,03	9
		0,05	14
		0,064	20
		0,078	25
		0,086	29
		0,1	34
		0,125	37
		0,132	40
		0,141	43
	0,15	45	
	1,2	0	0
		0,015	6
		0,03	12
		0,05	19
		0,064	25
		0,078	32
		0,086	37
		0,1	44
		0,125	46
		0,132	49
		0,141	51
	0,15	53	
Песчаник	1,1	0	0
		0,015	7
		0,03	14
		0,05	21
		0,064	39
		0,078	51
		0,086	70
		0,1	97
		0,1256	106

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усреднённое время установки, $T_{уст}$, с
		0,132	110
		0,141	115
		0,15	120
	1,13	0	0
		0,015	12
		0,03	25
		0,05	33
		0,064	45
		0,078	62
		0,086	84
		0,1	101
		0,125	118
		0,132	125
		0,141	133
		0,15	144
		1,17	0
	0,015		15
	0,03		28
	0,05		43
	0,064		56
	0,078		72
	0,086		93
	0,1		118
	0,125		130
	0,132		142
	0,141		154
	0,15	167	

Приложение Г

Результаты исследований по определению нагрузки, необходимой для преодоления сил трения при извлечении анкеров из породы

Таблица Г.1 – Результаты испытаний по определению N_s для моделей, в которые анкера устанавливались с помощью статической нагрузки

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породу, $l_{уст}$, мм	Усилие извлечения, N_s , кН		
Глинистый сланец	1,1	0	49,7	44,6	39,5
		0,013	37,8	42,3	46,8
		0,031	33,9	38,0	42,1
		0,05	28,2	31,9	35,6
		0,062	31,4	28,3	25,2
		0,075	21	23,5	26
		0,087	17,3	20,2	23,1
		0,1	14,5	17,0	19,5
		0,12	9,5	11,8	14,1
		0,13	10,2	8,1	6
		0,14	5,3	3,8	2,3
	0,15	0,0	0,0	0,0	
	1,2	0	103,9	109,2	114,5
		0,024	108,5	103,4	98,3
		0,033	94,1	99,5	104,9
		0,05	80,8	85,9	91
		0,065	71	75,6	80,2
		0,085	60,8	58,8	56,8
		0,1	43,1	44,9	46,7
		0,105	38,3	39,8	41,3
		0,12	21,1	19,9	18,7
		0,135	0,0	0,0	0,0
	1,3	0	154,2	149,2	144,2
		0,025	139,5	144,3	149,1
		0,04	128,9	133,4	137,9
		0,05	127,8	120,5	116,2
		0,075	99,4	95,3	91,2
		0,085	82,9	86,6	90,3
		0,1	64,1	67,2	70,3
		0,105	54,6	51,9	49,2
		0,11	33,3	35,6	37,9
		0,12	0,0	0,0	0,0

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породу, $l_{уст}$, мм	Усилия извлечения, N_s , кН			
Песчаный сланец	1,1	0	63,2	59,0	54,8	
		0,027	49,1	52,9	56,7	
		0,04	46	49,4	52,8	
		0,05	49,2	46,2	43,2	
		0,063	44,2	41,3	38,4	
		0,086	30,5	32,6	34,7	
		0,1	24,2	24,2	22,2	
		0,115	13,5	15,2	16,9	
		0,13	5,2	4,2	3,2	
		0,135	0,0	0,0	0,0	
	1,15	0	89,6	94,7	99,8	
		0,029	92,3	87,5	82,7	
		0,04	78,2	82,6	87	
		0,05	70,9	74,8	78,7	
		0,07	66,4	63,1	59,8	
		0,087	48,7	51,4	54,1	
		0,1	44,9	42,7	40,5	
		0,105	36,4	34,6	32,8	
		0,115	19,5	20,0	21,5	
		0,13	0,0	0,0	0,0	
	1,2	0	138,3	133,5	128,7	
		0,03	126,6	130,9	135,2	
		0,04	131,2	127,3	123,4	
		0,05	115,8	119,1	122,4	
		0,065	102,6	105,6	108,3	
		0,085	82,5	85,2	87,9	
		0,1	64,6	62,1	59,6	
		0,105	53,6	51,5	49,4	
		0,123	3,1	4,1	5,1	
		0,125	0,0	0,0	0,0	
	Песчаник	1,1	0	71,1	66,6	62,1
			0,025	61,5	65,6	69,7
			0,04	60,6	64,1	67,6
0,05			59,6	62,8	66	
0,06			55,9	58,8	61,7	
0,08			50,6	48,1	45,69	
0,1			31,8	33,2	35	
0,105			25,5	26,8	28,1	
0,11			17,2	18,2	19,2	
0,12			0,0	0,0	0,0	

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усилие извлечения, N_s , кН		
	1,13	0	100,2	104,8	109,4
		0,025	107	102,9	98,8
		0,035	98,9	102,6	106,3
		0,05	97,1	100,4	103,7
		0,065	91,2	94,1	97
		0,08	79,1	81,4	83,7
		0,1	55,2	53,3	51,4
		0,105	39,3	40,8	42,3
		0,11	23,5	22,5	21,5
		0,115	0,0	0,0	0,0
	1,17	0	152,2	157,5	162,8
		0,02	160,8	155,9	151
		0,037	150,2	154,7	159,2
		0,05	149,4	153,5	157,2
		0,06	150,3	146,5	142,7
		0,08	116,4	119,5	123
		0,1	71,7	74,4	77,1
		0,103	57,7	55,4	53,1
		0,105	42,1	43,9	45,4
		0,11	0,0	0,0	0,0

Таблица Г.2 – Результаты испытаний по определению N_s для моделей, в которые анкера устанавливались с помощью и динамической нагрузки

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усилие извлечения, N_s , кН		
Глинистый сланец	1,1	0	60,3	63,8	67,3
		0,015	64,9	61,8	58,7
		0,03	54,7	57,4	60,1
		0,05	49,6	47,3	45
		0,064	40,3	42,2	44,1
		0,078	34	35,8	37,6
		0,086	30,9	29,4	27,9
		0,1	21,8	23,0	24,2
		0,125	9,2	10,1	11
		0,132	7,1	6,4	5,7
		0,141	2,2	2,4	2,6
		0,15	0,0	0,0	0,0
		1,2	0	83,8	88,0
	0,015		81,5	85,4	89,3
	0,03		77,7	81,1	84,5

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усилие извлечения, N_s , кН		
		0,05	71,7	74,6	77,5
		0,064	64,4	62,1	59,8
		0,0782	56,1	54,2	52,1
		0,086	49,3	51,0	52,7
		0,1	43,5	42,2	40,9
		0,125	21,4	22,3	23,2
		0,132	15	15,5	16
		0,141	5,6	5,4	5,2
		0,15	0,0	0,0	0,0
	1,3	0	156,2	161,4	166,6
		0,015	159,2	154,3	149,4
		0,03	139,5	144,0	148,5
		0,05	125,2	129,3	133,4
		0,064	115,3	111,8	108,3
		0,078	86,7	89,8	92,9
		0,086	83,8	81,1	78,4
		0,1	57,9	59,8	61,7
		0,125	36,5	35,6	34,7
		0,132	24,0	24,7	25,4
		0,141	10,4	10,1	9,8
	0,15	0,0	0,0	0,0	
	Песчаный сланец	1,1	0	69,2	73,4
0,015			67,1	70,8	74,5
0,03			60,4	63,6	66,8
0,05			56,2	53,5	50,8
0,064			40,8	42,9	45
0,078			32,6	30,8	29
0,086			23,9	25,3	26,7
0,1			17,2	16,8	16,4
0,125			6,4	6,5	6,6
0,132			4,1	4,0	3,9
0,141			0,9	1,0	1,1
0,15		0,0	0,0	0,0	
1,15		0	89,7	94,3	98,9
		0,015	95,9	91,8	87,7
		0,03	83,4	87,1	90,8
		0,05	74,2	77,5	80,8
		0,064	64	66,9	69,8
		0,078	57,7	55,3	52,9
		0,086	44,6	46,5	48,4
		0,1	34,7	36,2	37,7
		0,125	13,6	14,7	15,8
		0,132	10,2	9,6	9,0
	0,141	3,8	4,1	4,4	
0,15	0,0	0,0	0,0		

Тип породы	Отношение диаметров анкера и шпура, k_0	Глубина установки в породе, $l_{уст}$, мм	Усилие извлечения, N_s , кН		
	1,2	0	148,4	153,5	158,6
		0,015	154,9	150,4	145,9
		0,03	141,6	145,5	149,4
		0,05	129,8	133,1	136,4
		0,064	114,4	117,1	119,8
		0,078	96,3	94,1	91,9
		0,086	82,0	84,0	86,0
		0,1	63,0	61,0	58,0
		0,125	26,2	27,1	28,0
		0,132	17,1	16,8	16,5
		0,141	7,6	7,8	8,0
		0,15	0,0	0,0	0,0
Песчаник	1,1	0	71,5	76,5	81,5
		0,015	79,1	74,5	69,9
		0,03	69,0	73,0	77,0
		0,05	62,6	66,2	69,8
		0,064	61,9	58,8	55,7
		0,078	43,3	46,0	48,7
		0,086	39	36,9	34,8
		0,1	26	27,4	28,8
		0,1256	7,3	8,3	9,3
		0,132	4,7	5,2	5,7
		0,141	2,2	2,0	1,8
		0,15	0,0	0,0	0,0
	1,13	0	110,9	116,0	121,1
		0,015	117,9	113,4	108,9
		0,03	104,7	108,6	112,5
		0,05	99,5	102,7	105,9
		0,064	90,0	92,8	95,6
		0,078	75,0	73,0	71,0
		0,086	61,0	63,4	64,8
		0,1	48,3	47,2	46,1
		0,125	18,8	19,4	20,0
		0,132	13,3	13,1	12,9
		0,141	4,9	5	5,1
		0,15	0,0	0,0	0,0
	1,17	0	165,6	170,9	176,2
		0,015	164,8	169,7	174,6
		0,03	162,4	166,5	170,4
		0,05	165,1	162,6	160,1
		0,064	154,3	152,2	150,1
		0,078	128,6	130,4	132,2
		0,086	112,2	110,6	109,0
		0,1	80,0	81,3	82,6
		0,125	32,4	32,9	33,4
0,132		23,6	23,4	23,2	
0,141		12,4	12,3	12,2	
0,15		0,0	0,0	0,0	

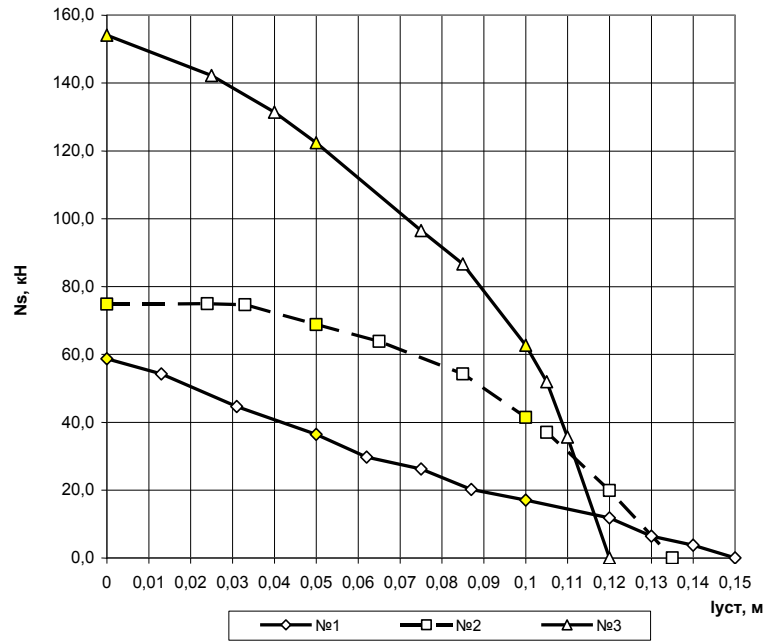


Рисунок Г.1 – Изменение нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) (№ 1, 2 и 3) в моделях из глинистого сланца

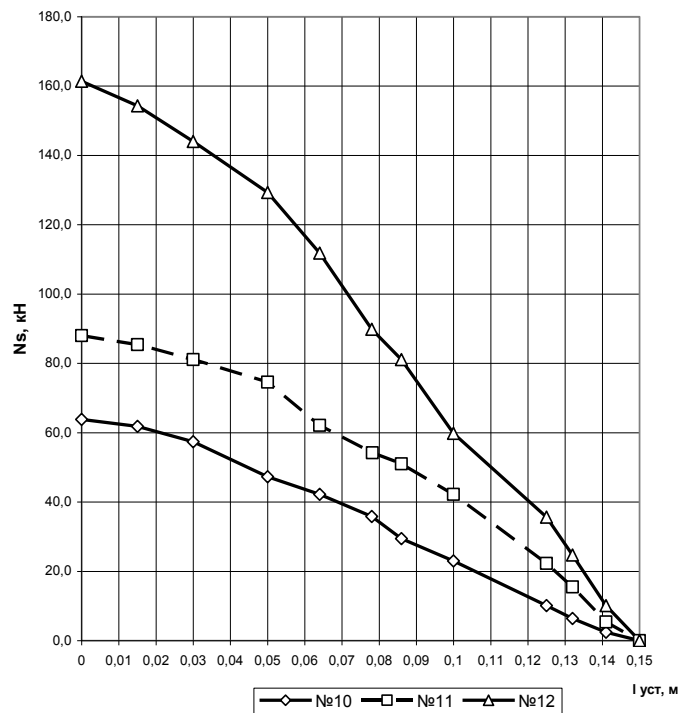


Рисунок Г.2 – Изменение нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) (№10, 11 и 12) в моделях из глинистого сланца

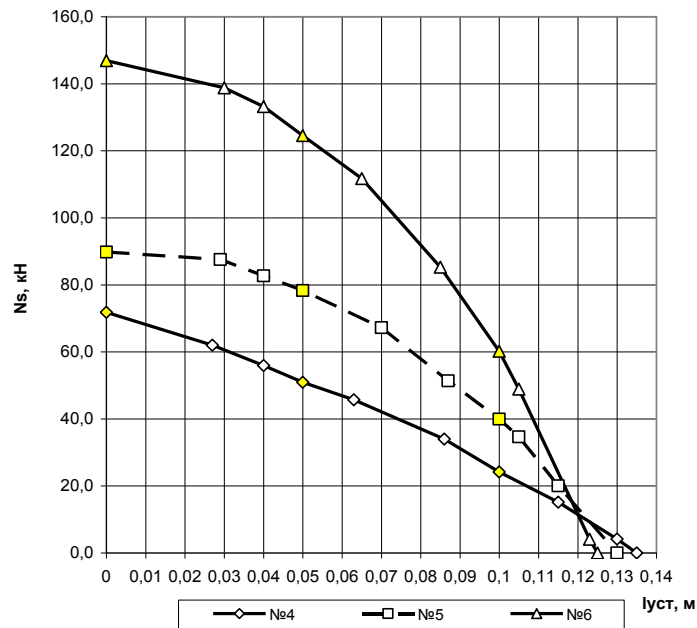


Рисунок Г.3 – Изменение нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) (№ 4, 5 и 6) в моделях из песчаного сланца

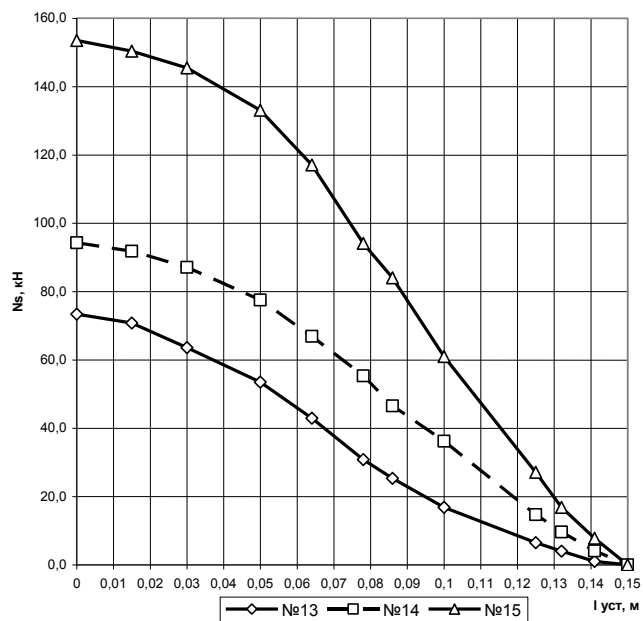


Рисунок Г.4 – Изменение нагрузки на преодоление сил трения (N_s , кН) при извлечении анкеров в зависимости от глубины их установки ($l_{уст}$, м) (№ 13, 14 и 15) в моделях из песчаного сланца

Приложение Д

Схемы крепления боков выработки анкерной крепью

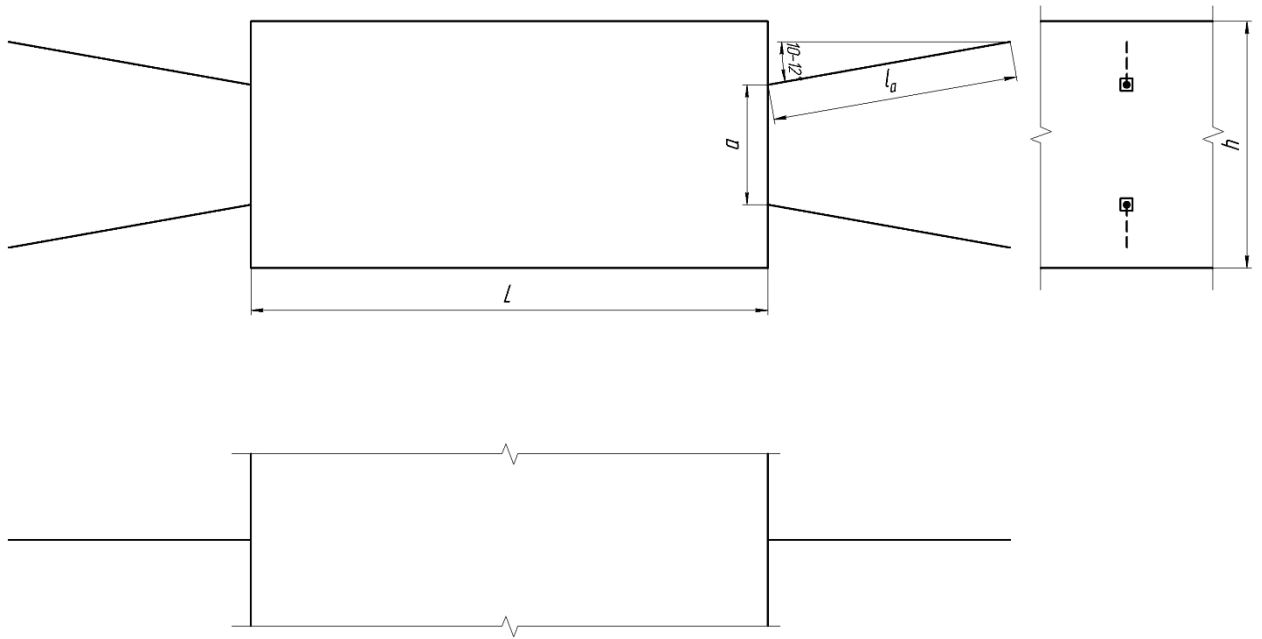


Рисунок Д.1 – Схема 1

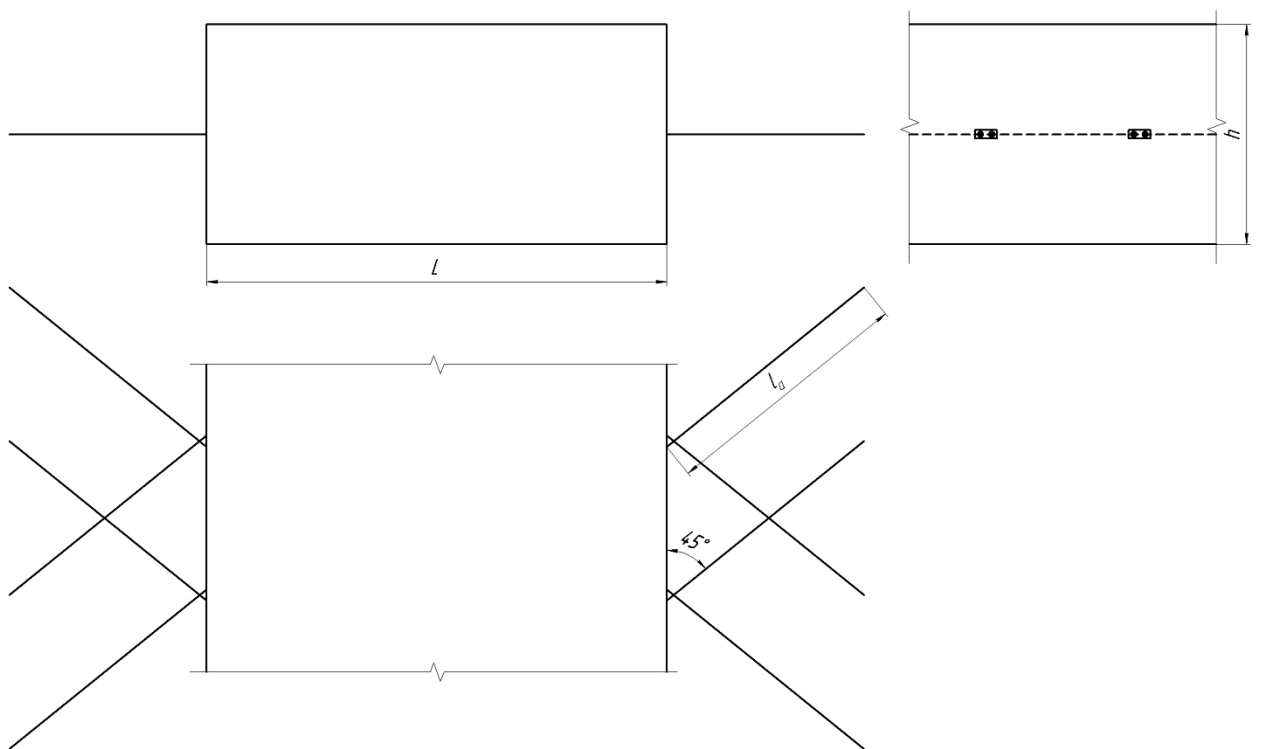


Рисунок Д.2 – Схема 2

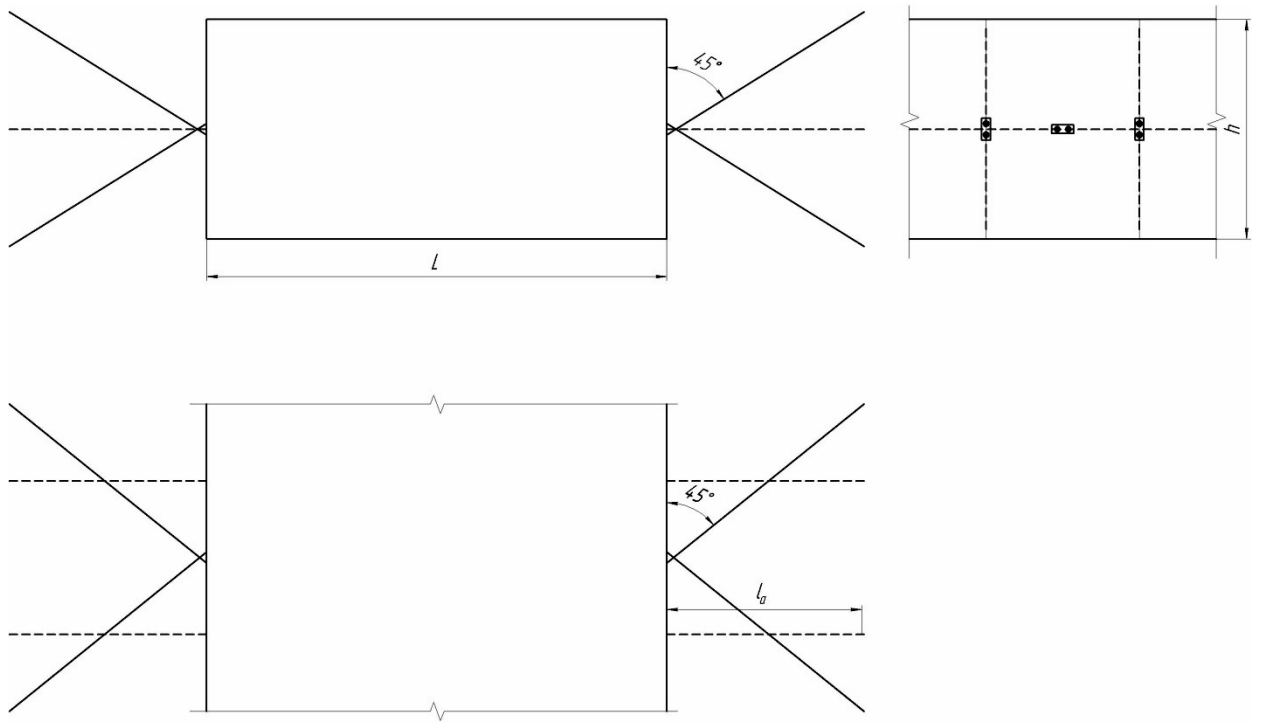


Рисунок Д.3 – Схема 3

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»


Кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых»

УТВЕРЖДАЮ:
И.О. Генерального директора
ГУП ДНЭ «ДОНЭНЕРГЕТИКА»
И.В. Шестоуц
« 21 » _____ 2021 г.



СОГЛАСОВАНО:
Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
С.В. Борщевский
« 21 » _____ 2021 г.


Зам. проректора
Госгортехнадзора ДНР
Ю.И. Лаворко
« 21 » _____ 2021 г.




МЕТОДИКА

определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью
динамической нагрузки в направляющий шпур
с диаметром меньшим, чем у анкера

Руководитель работы

 д.т.н., проф. А.О. Новиков

Исполнители

 к.т.н., доц. И.Н. Шестопаля

 Аспирант П.С. Дрипан

 Аспирант В.Г. Лепешкин

Соответствует оригиналу
Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.001.01



И.А. Бершадский

Министерство угля и энергетики
Донецкой Народной Республики



ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ДОНЕЦКАЯ УГОЛЬНАЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ»
(ГУП ДНР «ДУЭК»)

ул. Артема, 63, г. Донецк, 83001, тел. (062) 345-73-11
e-mail: donug2015@mail.ru, Идентификационный код 33161769

15.07.2022 № 1-1099

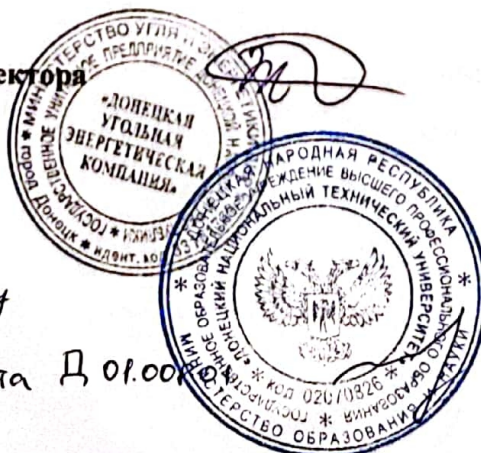
СПРАВКА

О внедрении результатов диссертационной работы старшего преподавателя кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Государственного Образовательного Учреждения «Донецкий Национальный Технический Университет» Дрипана Павла Сергеевича, выполненной на тему «Обоснование безклеевого способа установки анкеров в горных выработках динамической нагрузкой».

Справка дана старшему преподавателю кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Государственного Образовательного Учреждения «Донецкий Национальный Технический Университет» Дрипану Павлу Сергеевичу о том, что разработанная в его диссертационной работе «Методика определения параметров анкеров, устанавливаемых с помощью динамической нагрузки в направляющий шпур с диаметром меньшим, чем у анкера», позволяющая уменьшить затраты на крепление выработок анкерной и комбинированной (рамно-анкерной) крепью, принята к внедрению в Государственном Унитарном Предприятии «Донецкая Угольная Энергетическая Компания».

Разработанная «Методика...» будет использована при составлении паспортов проведения и крепления горизонтальных и наклонных выработок шахт ГУП ДНР «ДУЭК».

И.о. генерального директора



П.В. Толстоус

Соответствует оригиналу
Учётный секретарь
диссертационного совета Д 01.004

И.А. Бершадский

Приложение К

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых»



УТВЕРЖДАЮ:

Генерального директора
«ДОНЕЦКАЯ УГОЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ»

П.В. Толстоус
2021 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Доктора по научной работе
Института «Донецкий национальный
технический университет»

С.В. Борщевский
2021 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по поддержанию подготовительных выработок шахт ГП «ДУЭК», проводи-
мых в соответствии с программой развития горных работ на 2021 год, разра-
ботанных на основании методики расчета параметров анкерных породо-
армирующих систем,

Заведующий кафедрой
РМПИ, ДонНТУ

д.т.н., проф. Ю.А. Петренко

Руководитель работы

д.т.н., проф. А.О. Новиков

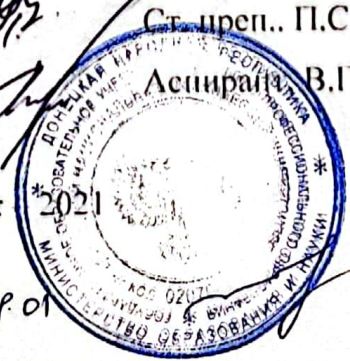
Исполнители

к.т.н., доц. И.Н. Шестопалов

Ст. преп. П.С. Дрипан

Аспирант В.Г. Лепешкин

Донецк



Соответствует оригиналу
Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

от 08.08.12. № 29-16/15

На № _____

СПРАВКА

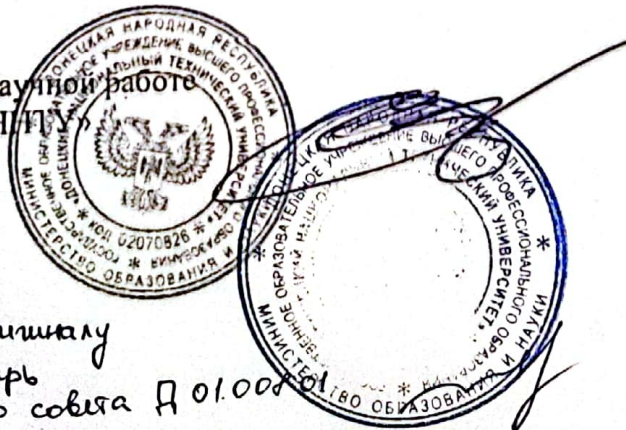
О внедрении результатов диссертационной работы старшего преподавателя кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» Дрипана Павла Сергеевича, выполненной на тему «Обоснование безклевого способа установки анкеров в горных выработках динамической нагрузкой».

Справка дана старшему преподавателю кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» Дрипану Павлу Сергеевичу о том, что результаты научных исследований, полученные при выполнении им диссертационной работы на тему: «Обоснование безклевого способа установки анкеров в горных выработках динамической нагрузкой», приняты к внедрению в учебный процесс при подготовке студентов, обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело» всех специализаций и форм обучения.

Результаты диссертационной работы будут использованы при чтении следующих дисциплин: «Прикладная механика», «Крепление горных выработок», «Способы охраны горных выработок», «Ремонт и погашение горных выработок», а также при выполнении студентами выпускных квалификационных работ.

Проректор по научной работе
ГОУВПО «ДОННТУ»

С.В. Борщевский



*Соответствует оригиналу
Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.002.01*

И.А. Бершадский