

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН**  
**Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии**

*На правах рукописи*

УДК 550.82:624.19.034.5 (282.255.123.11)



**НУРАЛИЗОДА МУХЙИДДИН НУРАЛИ**  
**ВЛИЯНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ФАКТОРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТОННЕЛЯ  
СТ-4 РОГУНСКОЙ ГЭС**

**Диссертация**  
на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности  
2.1. Геология, геодезия, гидрология, строительство, архитектура  
(2.1.8. Гидротехническое строительство)

**Научный руководитель:**  
кандидат технических наук, доцент  
**Сулаймонова Мутабар Абдулхаевна**

**ДУШАНБЕ -2026**

## АББРЕВИАТУРА БУКВЕННАЯ

ГЭС – гидроэлектростанция

МГЭС – малая гидроэлектростанция

микроГЭС – микрогидроэлектростанция

миниГЭС - минигидроэлектростанция

ГАЭС-гидроаккумулирующие электростанции

ТЭО – технико-экономическое обоснование

ВОС – высотная опорная сеть

ОРУ – открытое распределительное устройство

ЛЭП – линия электропередачи

ГРП – гребень плотины

НПУ – нормальный подпорный уровень

УМО – уровень мёртвого объёма

СТ-4 – строительный тоннель

УГВ – уровень грунтовых вод

БВР – буровзрывные работы

НДС- напряженно-деформированное состояние

НСУ - напорно-станционный узел

RQD - оценка по прочности природного массива

Q – оценка по устойчивости выработки разработанный Бартоном

RMR - рейтинг горного массива

GSI - индекс геологической прочности

МКЭ – метод конечных элементов

	<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1</b>	<b>ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....</b>	<b>15</b>
1.1.	Мировая энергетика.....	15
1.2.	Гидроэнергетика Центральной Азии и России.....	19
1.3.	Гидроэнергетика республики Таджикистан.....	26
1.5.	Выводы по главе 1.....	28
<b>Глава 2</b>	<b>ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА И МЕСТА СТРОИТЕЛЬСТВА ПРОЕКТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА.....</b>	<b>29</b>
2.1.	Структура.....	29
2.2.	Задачи исследований.....	33
2.3.	Инженерно-геологические и гидрогеологические условия строительного тоннеля СТ-4.....	33
2.4.	Геология строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС.....	35
2.4.1.	Разломы.....	41
2.4.2.	Гидрогеология.....	45
2.5.	Выводы по главе 2.....	57
<b>Глава 3</b>	<b>НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СТ-4 РОГУНСКОЙ ГЭС...</b>	<b>59</b>
3.1.	Зависимость минимальной глубины заложения напорных необлицованных тоннелей.....	59
3.2.	Выбор конструктивной обделки и технология цементационных работ строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС.....	64
3.3.	Геотехнической мониторинг строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС.....	73
3.4.	Применение КИА для измерений гидравлических параметров в тоннеле СТ-4 Рогунской ГЭС.....	81
3.5.	Расположение геотехнических контрольно-измерительных приборов и системы мониторинга СТ-4 Рогунской ГЭС.....	89
3.6.	Выводы по главе 3.....	97

<b>Глава</b>	<b>РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ</b>	<b>98</b>
<b>4.</b>	<b>СТ-4 МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. РЕКОМЕНДАЦИИ</b>	
	<b>ПО ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ КРЕПИ.....</b>	
4.1.	Крепь и материалы крепи.....	98
4.2.	Выбор системы крепи породы с использованием эмпирических методов.....	101
4.3.	Проект крепи породы для потенциально неустойчивых клиньев.....	103
4.4.	Анализ системы крепи с использованием К-Э моделирования.....	107
4.5.	Рекомендации по выбору класса типа крепи.....	135
4.6.	Выводы по главе 4.....	137
	<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....</b>	<b>138</b>
	<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>140</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>153</b>



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время в Республике Таджикистан продолжается строительство одного из уникальных и основных проектов в области возведения гидротехнических сооружений, входящих в состав Рогунской ГЭС. Обеспечение электричеством населения осуществляется возведением гидроэлектростанций и является важным и основным направлением, способствующим экономическому и социальному развитию республики.

Для достижения этих целей в нашей стране возросли объёмы строительства гидротехнических сооружений, возводимых на реке Вахш и обладающими большой мощностью. В этом направлении возведение Рогунской ГЭС является не только важным, но и одним из основных и востребованных проектов в нашей республике.

Строительство гидротехнических сооружений Рогунской ГЭС является основной и главной частью, которая способствует как экономическому, так и социальному развитию нашей республики.

В Таджикистане строительство гидроэлектростанций больших мощностей, а также создание крупнейших водохранилищ приводят к увеличению высоты плотины, размеров сечения и площади, величины напоров гидротехнических тоннелей и подземных водоводов, вследствие чего, происходит возрастание нагрузок, которые передаются на основание или стенки сооружения. В этом случае геологические условия играют большую роль, так как в большинстве случаев являются очень сложными и требуют проведения тщательных исследований, определения физических и механических свойств скальных горных пород и изучения поведения их под нагрузкой, причём с учетом одновременного воздействия вод. В таких случаях в горных условиях республики при строительстве гидротехнических сооружений часто требуется разработка инженерных мероприятий по укреплению и консолидации скальных горных пород вокруг выработки.

В связи с вышеизложенным реализация комплекса исследований с использованием современных методов, которые обладают совершенными технологиями геологического картирования тоннеля и моделирования с использованием компьютерных технологий, а также исследований горно-геологических условий гидротехнического тоннеля СТ-4В Рогунской ГЭС дает возможность выявить их влияние на напряженно-деформированное состояние исследуемого объекта возведения, что позволяет правильно выбрать трассу объекта строительства, место его расположения и способа возведения.

Актуальность диссертационной работы заключается в претворении полученных результатов работы исследований, проведенных современными методами и способами с использованием современных технологий по рекомендуемые классы крепи породы исследуемого гидротехнического тоннеля, использование методов моделирования компьютерными технологиями, достижения хороших результатов.

**Степень изученности данной тематики.** В процессе работы над концепцией завершения строительства Рогунской ГЭС были анализированы все доступные материалы изысканий предыдущих лет, хранящиеся в архивах ОАО «Институт Гидропроект», ОАО «Рогунская ГЭС», ЦСГНЭО. В 2009 году для получения дополнительной информации, по программам и рекомендациям, разработанных в Гидропроекте, были выполнены дополнительные исследования. Следует отметить, что исследованиям по возведению гидротехнических тоннелей в сложных горно геологических условиях посвящены труды Экклестона Д., Мехинрада А., Гешмепура А., Солеймани М., Аскари М., Регли М., Гадоева Олим., Кабилова Ш., Мухаммадризо Зангане, Холова Ф.А. и др.

**Связь темы диссертационной работы с научными программами.** Исследования, послужившие основой диссертационной работы, связаны с научной тематикой Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ, в разработке которых соискатель принимал непосредственное

участие: «Стратегия Республики Таджикистан в области науки и технологий на 2016-2020 годы» (раздел «Строительство и стройиндустрия»); Программного обеспечения, UNWEDGE ver. 3.0, разработанного компанией RocScience Co. (Торонто, Канада) и работающего по методу предельного равновесия; Программа для вычислений конечно-элементными методами RS2, вер. 9.0, разработанная RocScience Co.

### **Общая характеристика исследования**

Детальные исследования для проектирования гидротехнического тоннеля СТ-4В, заключаются в проведении исследований инженерно-геологические факторов, влияющих на проходку в различных литологических условиях. Проведение анализов геотехнических данных, оценка геомеханических параметров, параметры прочности на сдвиг для несплошностей породы, выбор крепи породы с использованием эмпирических методов, проект крепи породы для потенциально неустойчивых клиньев, также крепи с использованием К-Э моделирования и рекомендации временной крепи строительного тоннеля СТ-4 на правом берегу Рогунской ГЭС. Результаты исследований параметров неповрежденной породы и основных несплошностей и оценки состояния горного массива дают возможность использовать системы инженерной классификации горного массива для определения основных систем временной крепи, которые будут использованы во время проходки гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС в различных горных породах. После этого представляются расчеты моделирования процесса земляных работ вместе с проектированием системы временной крепи с использованием численного моделирования, подходящего для ожидаемых механизмов разрушения, преобладающих во время производства земляных работ.

С целью выполнения численного анализа горные массивы вокруг гидротехнического тоннеля СТ-4 моделировались как упругопластический материал, у которого в пластическом режиме прочностные параметры

уменьшаются. Кроме того, в методе численного проектирования моделируются процессы выемки грунта и первичной породы, а также проверяются ожидаемые условия дополнительной крепи с целью достижения экономичных, безопасных и стабильных решений.

**Целью диссертационной работы** является - исследование влияния инженерно-геологических факторов (литологические разности, геомеханические и геотехнические параметры), на напряженно-деформированное состояние гидротехнического тоннеля СТ-4 и разработка рекомендаций по выбору класса крепи породы обеспечивающих устойчивость сооружения.

**Задачи исследования:**

1. Исследовать существующими теоретическими методами влияние инженерно-геологических условий на напряженно-деформированное состояние гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС.

2. Определить физико-механические свойства вмещающих горных пород, проектируемого гидротехнического тоннеля СТ-4.

3. Смоделировать напряженно-деформируемые процессы, протекающие в горных породах гидротехнического тоннеля при проходке и возведении временной крепи.

4. Определить и исследовать упругие и прочностные свойства пород в зоне разуплотнения, а также сохранных вмещающих горных пород проектируемого гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС и разработать рекомендации по выбору типов скальной крепи.

5. Разработать систему мониторинга, рассчитать количество наблюдательных створов и типов КИА гидротехнического тоннеля СТ-4.

**Объектом** диссертационных исследований является безнапорный гидротехнический тоннель СТ-4 Рогунской ГЭС.

**Предметом** исследования является: воздействие инженерно-геологических условий на напряженно-деформированное состояние

безнапорного гидротехнического тоннеля и проявление возможных деформации при воздействии сейсмических сил.

**Гипотеза исследования** заключается в том, что гравитационные, тектонические и сейсмические усилия в совокупности существенно изменяют, напряжённно-деформированное состояние крепи гидротехнического тоннеля СТ-4В Рогунской ГЭС, вызывая локальные концентрации напряжений и деформаций, что снижает её устойчивость и требует конструктивного усиления.

**Исследования проводились** в период с 2022 по 2026 годы на объекте Рогунской ГЭС, в частности на гидротехническом тоннеле СТ-4В с целью анализированные напряжённно-деформированного состояния крепи в условиях воздействия гравитационных, тектонических и сейсмических факторов.

**Теоретической основой исследований** является изучение инженерно-геологических условий Рогунской ГЭС с целью исследования их влияния на напряженно-деформированное состояние безнапорного гидротехнического тоннеля СТ-4.

**Информационная база диссертации** включает в себя технический отчёт Рогунской ГЭС (1978), технический проект подземного комплекса Рогунской ГЭС (1980), технический проект НБО Рогунской ГЭС на реке Вахш (Ташкент, 1978), а также отчёт о выполнении инженерно-геологических работ при строительстве объектов Рогунской ГЭС (2011) и требования к проектированию.

**Научная новизна исследования** состоит в:

- выявление геологических причин оказывающих воздействий на разрушение и устойчивость вмещающих массивов горных пород гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС. Определение направления главного минимального и максимального напряжения на основе проведенных специальных исследований в больших подземных выработках;

- численное моделирование напряженно-деформированного состояния гидротехнического тоннеля и разработка рекомендаций по выбору класса крепи породы с использованием торкретбетона толщиной 10см;

- в разработке рекомендаций по выбору класса крепи породы, для различных литологических частей гидротехнического тоннеля СТ-4 с учетом фактической геометрии тоннеля и геологических условий;

- в разработке системы мониторинга, установлении количества наблюдательных створов, типов контрольно измерительных приборов и программу наблюдения гидротехнического тоннеля СТ-4.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Выявление инженерно-геологических факторов, влияющих на прочностные характеристики упругости и прочности вмещающих массивов горных пород гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС. Определение направления главного минимального и максимального напряжений на основе проведенных специальных исследований в крупных подземных выработках.

2. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния гидротехнического тоннеля СТ-4 и разработка рекомендации по выбору типа несущей конструкций с учётом сейсмоустойчивости сооружения.

3. Разработка рекомендаций по выбору типов скальной крепи, с учетом фактической геометрии тоннеля и их основных элементов.

**Теоретическая значимость диссертационной работы заключается** в решении задач, связанных с инженерно-геологическим картированием тоннелей, расположенных вблизи исследуемого тоннеля СТ-4; выбором способа проведения цементационных работ; подбором модели для расчета крепи тоннеля; обоснования расчетной крепи тоннеля СТ-4; геотехнического мониторинга гидротехнического тоннеля СТ-4.

### **Практическая значимость работы заключается:**

- в выборе конструкций тоннеля обеспечивающих защиту от разрушений при минимальных дополнительных затратах и времени на ремонт;

- в применении в учебном процессе в высших учебных заведениях и университетах, при чтении лекций и на практических занятиях, а также при проведении лабораторных и полевых работ для студентов по специальным курсам: «Шахтное и подземное строительство», «Основы горного дела», «Технология проведения буровзрывных способов», «Механика горных пород и горное давление», «Специальные способы строительства подземных сооружений», Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими для студентов по специальностям – «Шахтное и подземное строительство» и «Строительство и эксплуатация гидроэлектростанций» и другие.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждаются идентичностью результатов расчета моделирования по предлагаемой автором методике с результатами проведенных экспериментов и данными других исследователей, а также использованием натурных и теоретических исследований, современных методов физико механических параметров горных пород, использованием современного оборудования и приборов для испытания разработки безнапорного гидротехнического тоннеля Рогунской ГЭС.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует положений пунктов 3, 11 паспорту научной специальности 2.1. Геология, геодезия, гидрология, строительство, архитектура (2.1.8. Гидротехническое строительство)

3. Разработка новых направлений прогнозирования напряженно-деформированного состояния напорных и безнапорных гидротехнических сооружений; совершенствование методов определения различных видов нагрузок на сооружения речных гидроузлов, здания и машинные залы гидроэлектростанций; обоснование путей повышения надежности и долговечности конструкций водно-транспортных сооружений.

11. Эксплуатационная надежность гидротехнических сооружений, разработка новых критериев их безопасности, новые системы контроля и

наблюдений за сооружениями, совершенствование методов технической диагностики и мониторинга водных систем и объектов.

Название темы диссертации соответствует паспорту специальности 2.1. Геология, геодезия, гидрология, строительство, архитектура (2.1.8. Гидротехническое строительство).

**Личный вклад автора.** Автором сформулированы цель и задачи исследований, намечены пути их теоретического и экспериментального решения. Автором уточнены геомеханические параметры горных массивов напряженно-деформированного состояния конструкций тоннеля с определением основных параметров проходки безнапорного гидротехнического тоннеля, а также получены и сформулированы основные выводы.

**Апробация результатов.** Основные положения работы и полученные результаты были доложены и обсуждены на: РНПК. «Развитие гидроэнергетики - развитие Таджикистана» Институт Энергетика Таджикистана (г. Бохтар, 2018 г); МНПК: “Архитектурное образование и архитектура Таджикистана” 60 лет развития и совершенствования. ТТУ (г. Душанбе, 2019 г); МНПК, «Естествознание, техника, технологии: современные парадигмы и практические разработки» г. Белгород, (Россия, 2019 г); МНПК, «Прикладные исследования и экспериментальные разработки в области естественных и технических наук» г. Белгород, (Россия, 2020 г); V Международная (XI Всероссийская конференция) Строительство и застройка: жизненный цикл - 2020, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», (Россия, 2020 г); МНПК на тему: «Куатбековские чтения-1: Уроки Независимости», посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан г. Чимкент (Казахстан, 2021 г); МНПК, «Водные ресурсы, инновация, ресурсо- и энергосбережения», 6-7 октября 2023 года, г. Душанбе, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана.



**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 22 работах, в том числе 11 статьях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов ВАК при Президенте Республики Таджикистан.

По результатам исследований получен 1 малый патента Республики Таджикистан № TJ 1417 от 22 ноября 2022 года.

Изобретение относится к области подземного строительства, а именно к устройствам возведения подземных сооружений различного назначения, преимущественно к строительству водопропускных сооружений и подземных переходов.

Сооружение содержит фундамент, боковые стенки с установленными на них арками перекрытия и грунтовую засыпку, на которую уложена дорожная одежда. Боковые стенки с арками перекрытия выполнены сборными или монолитными в зависимости от степени косогорности. В сопряженных частях боковых стенок и арок вставлены прокладки из фторопласта. Для предотвращения сдвига при сейсмическом воздействии в фундаменте выполнен поперечный "зуб", упирающийся в грунт основания.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, списка литературы и заключения. Общий объём работы включает 137 страниц, 105 рисунков, 20 таблиц, приложения, список использованной литературы из 123 наименований.

Автор выражает свою признательность руководству и сотрудникам Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ за поддержку и постоянную помощь по реализации научных исследований и подготовки работы к защите.

Автор глубоко благодарен и признателен своему научному руководителю, кандидату технических наук, доцент Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими Сулаймоновой Мутабар Абдулхаевне, за чуткое руководство, советы, ценные замечания и помощь в работе над диссертацией на всех её этапах выполнения

# **Глава 1. ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

## **1.1. Мировая энергетика**

Основные понятия, классификация и особенности гидроэлектростанции (ГЭС).

Гидроэлектростанция (ГЭС) – электростанция, преобразующая механическую энергию воды в электрическую энергию (ГОСТ 19431-84).

Действующая нормативная литература:

СНиП 33-01-2003 «Гидротехнические сооружения. Основные положения».

СО 34.21.308-2005. «Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения».

Классификация гидроэлектростанция состоит по ГОСТу 51328-98, в следующем:

- малая гидроэлектростанция; малая ГЭС, МГЭС, ГЭС с соответствий мощностью от 100 до 30000 кВт;
- микрогидроэлектростанция; микроГЭС, МкГЭС, МГЭС с установленной мощностью до 100 кВт.

ENCO ENGINEERING CONSULTANTS, ссылается на UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) и приводит такую классификацию:

пико-ГЭС до 5 МВт; микро-ГЭС до 100 кВт; мини-ГЭС до 1000 кВт и малые ГЭС до 10000 кВт.

**UNIDO** (см. " World Small Hydropower Development Report 2013") в разделе "Technical notes and abbreviations" отмечает, что к малым ГЭС относятся в докладе станции мощностью до 10 МВт и далее замечает, что в разных странах существует разная классификация.

**Министерство энергетики США (DOE)** на страницах сайта приводит следующую классификацию ГЭС в зависимости от мощности: подразделяется на: микро-ГЭС до 100 кВт, малые ГЭС от 100 кВт до 30 МВт и большие ГЭС свыше 30 МВт[1].

ANEEL (Бразилия) относит: к микро ГЭС электростанции до 3000 кВт включительно, к малым ГЭС - от 3000 до 30000 кВт с площадью водохранилища до 13 км<sup>2</sup> и другие ГЭС - гидроэлектростанции свыше 30000 кВт [1,2,3].



Рисунок 1.1. Развитие гидроэнергетики в мире



Рисунок 1.2. Крупнейшие ГЭС в мире

## Реализация проектов строительства ГАЭС



Рисунок 1.3. Строительство ГАЭС

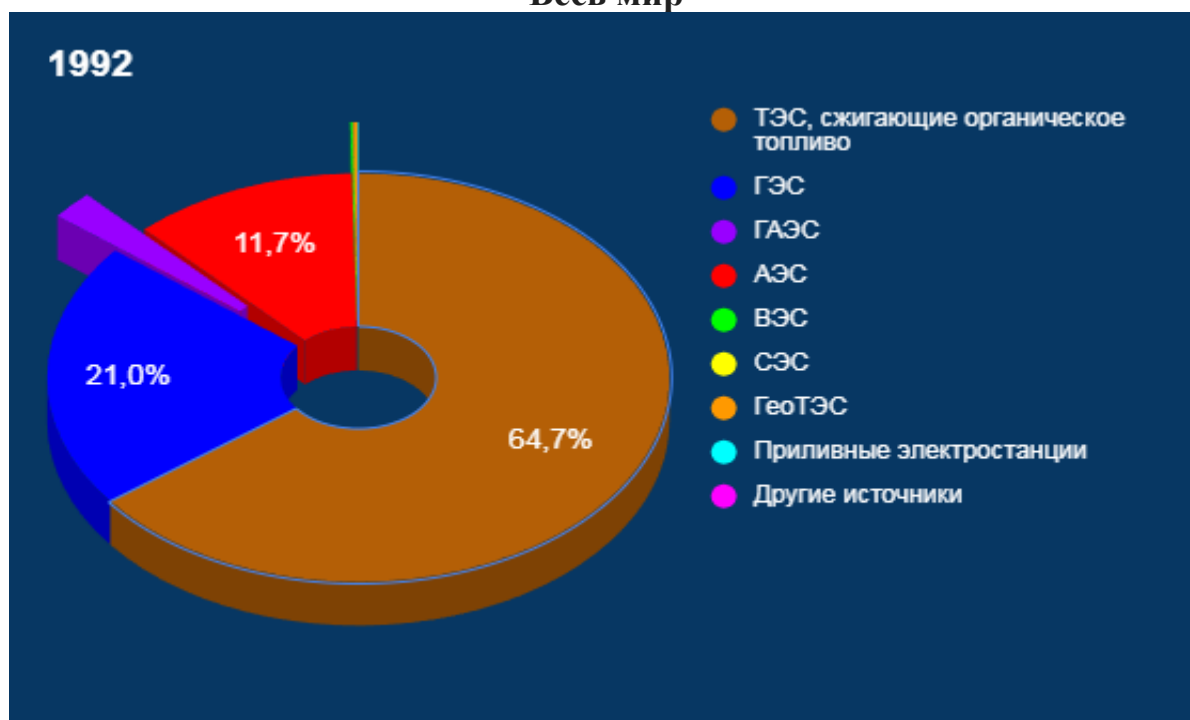
Мощность гидроаккумулирующих станций (ГАЭС) на начало 2021 года составила 159,5 тыс. МВт (+0,9%). ГАЭС обеспечивают 90,3% общемировой суммарной мощности накопителей энергии. В течении 2021-2030 гг. составит почти 30% (65тыс. МВт).

В структуре установленной мощности электростанций регионов мира за 2021 год на долю ГАЭС приходится от 4,4 % на Ближнем Востоке до почти 46,9 % в Центральной и Южной Америке. Диапазон изменения этой доли в структуре установленной мощности крупных стран: Бразилия - доля ГАЭС составляет 57,9 %, а, например, в Саудовской Аравии ГАЭС отсутствуют. В числе стран, где удельный вес ГАЭС составляет практически 100% находится, например, Парагвай, где установленная мощность-нетто всех электростанций, на конец 2021 года - 8761 МВт, в том числе ГАЭС - 8760 МВт.

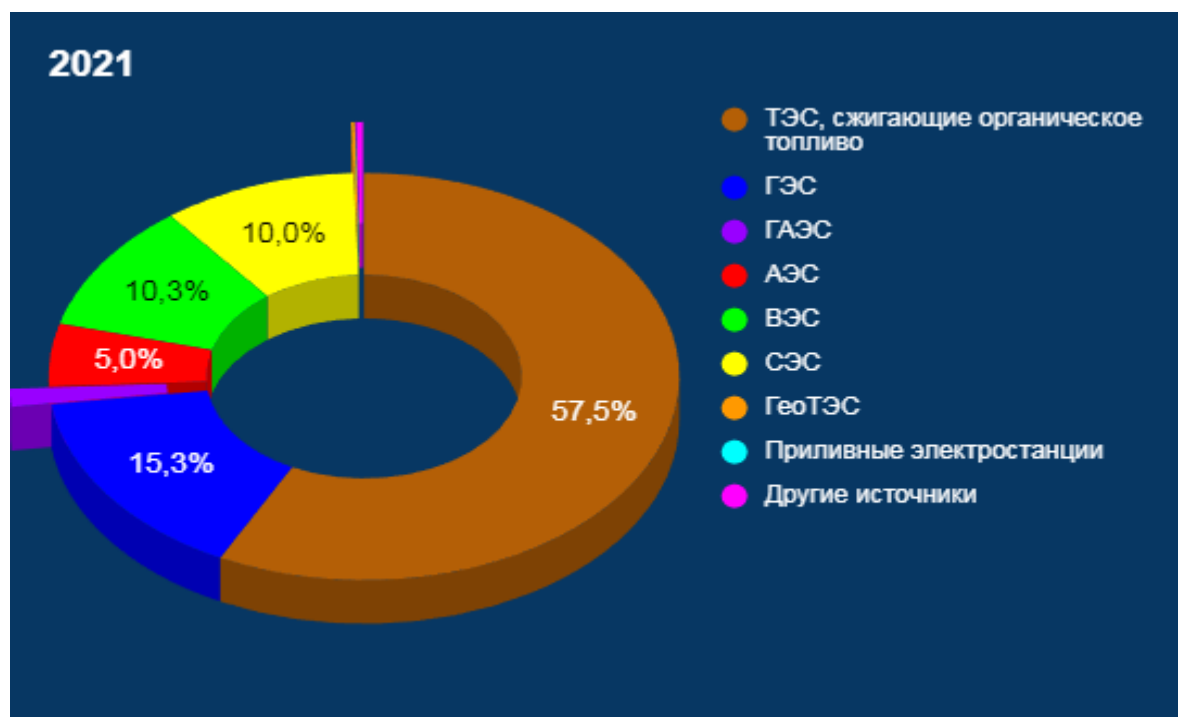
Уникальность ГАЭС заключается и в том, что она является важнейшей подсистемой транспортной системы страны. Следовательно, производство электроэнергии на ГАЭС является попутной (не основной продукцией), равно,

как и производство электроэнергии на ТЭЦ. Основное назначение последних производство и отпуск тепловой энергии [1,2,3].

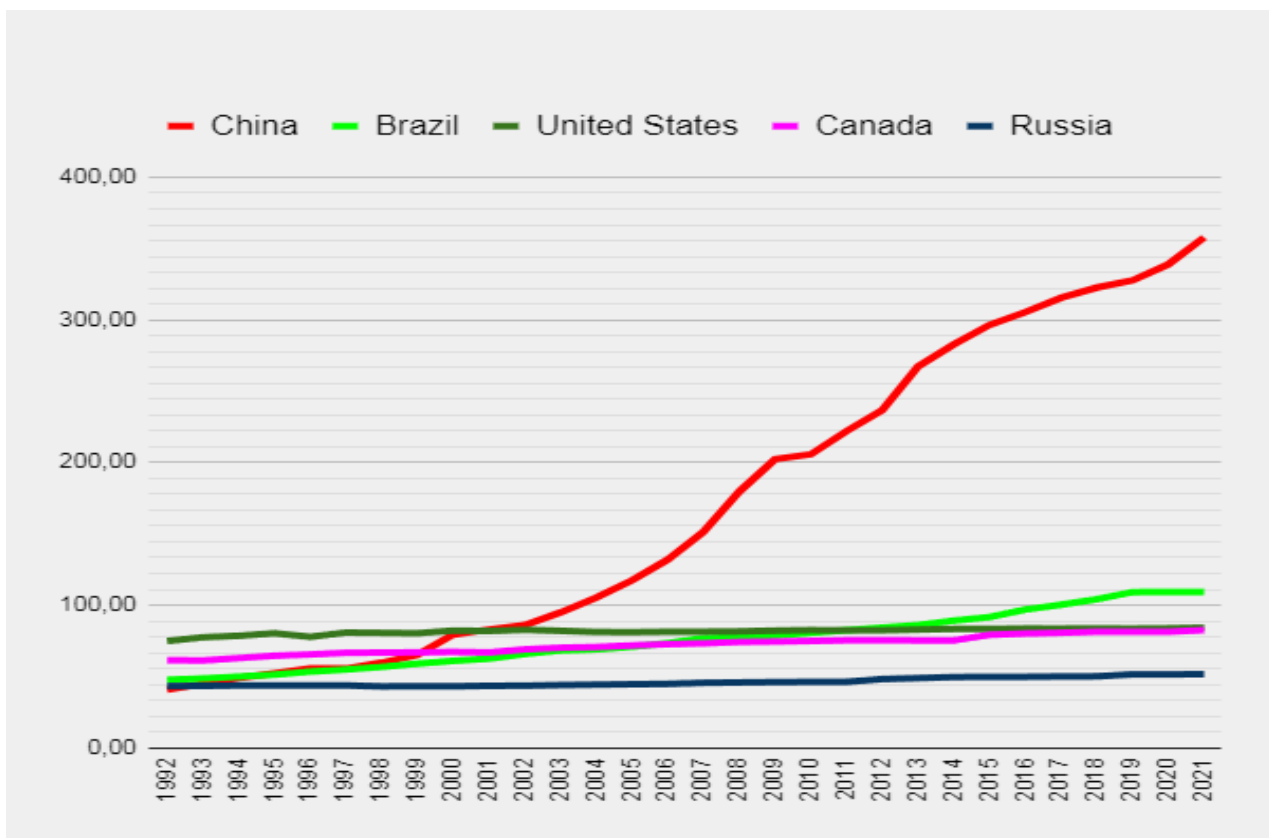
### Основные тенденции и анализ, 1992-2021 годы Весь мир



**Рисунок 1.4.** Структура установленной мощности электростанций по типам за 1992 год, млн. кВт (%)



**Рисунок 1.5.** Структура установленной мощности электростанций по типам за 2021 год, млн. кВт (%)



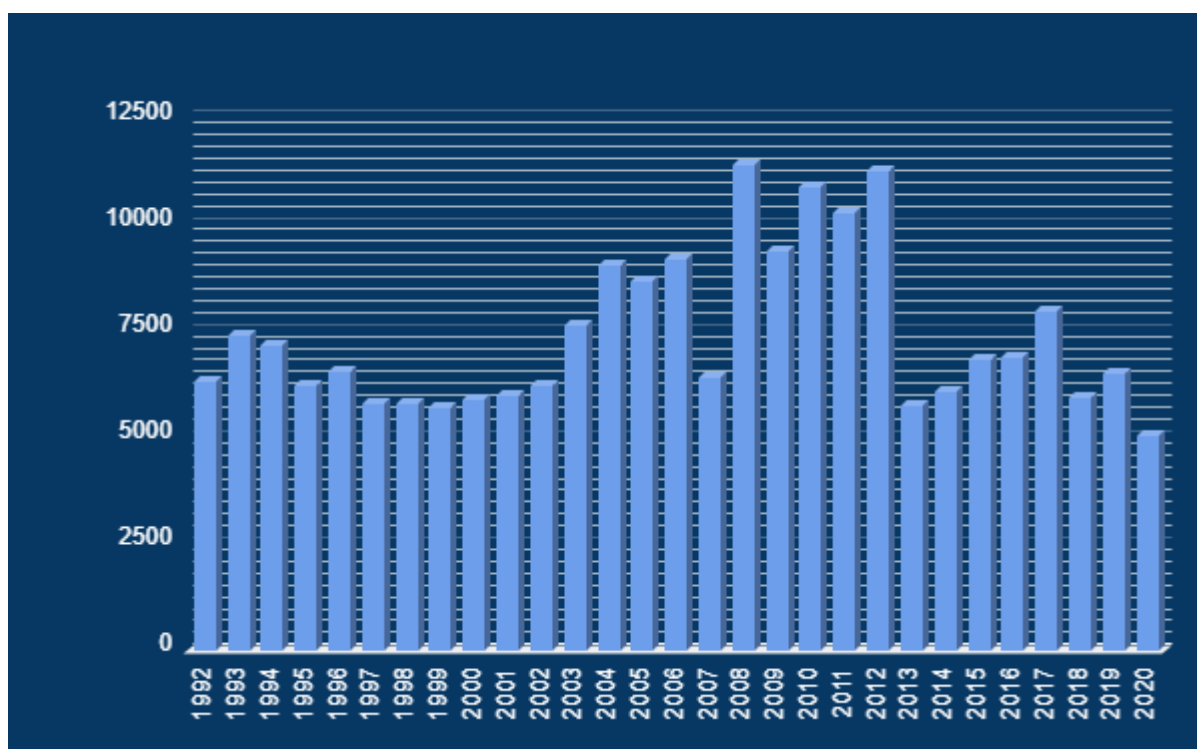
**Рисунок 1.6.** Развитие гидроэнергетики в период с 1992 по 2021 годы в странах с установленной мощностью ГЭС (свыше 50 ГВт) в 2021 году

## 1.2. Электроэнергетика Республики Узбекистан

Последние десятилетия центрально азиатских республик Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркменистан и Узбекистан который развивается в области строительство гидроэлектростанции. Регион богат энергетическими ресурсами, как запасами угля, нефти и газа, так и гидроэнергетическими ресурсами. Распределены они по территории неравномерно, что определяет и разную структуру электрогенерирующих мощностей, развитие системообразующих сетей между центрами генерации и потребления [4].

Крупнейшей в Центральной Азии является энергосистема республики Узбекистан. Общая мощность электростанций в республики Узбекистан составляет около 14140,5 МВт. Около 85% выработки электроэнергии приходится на тепловые электростанции, основном работает на природном газе, остальные на ГЭС.





**Рисунок 1.7.** Производство электроэнергии на ГЭС, 1992-2020, млрд. кВт·ч

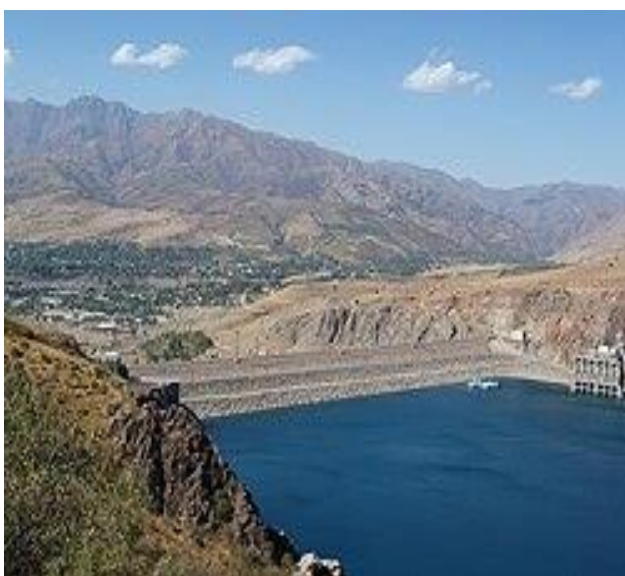


**Рисунок 1.8.** Производство электроэнергии на ГЭС, до 2017 года

В Республики Узбекистан наиболее крупные гидроэлектростанции является – Чарвакская ГЭС (666 МВт) [5,6], Ходжикентская ГЭС (165МВт) [8,9], Тупалангская ГЭС (175 МВт) [7], и Туямунская ГЭС (150 МВт) [10],

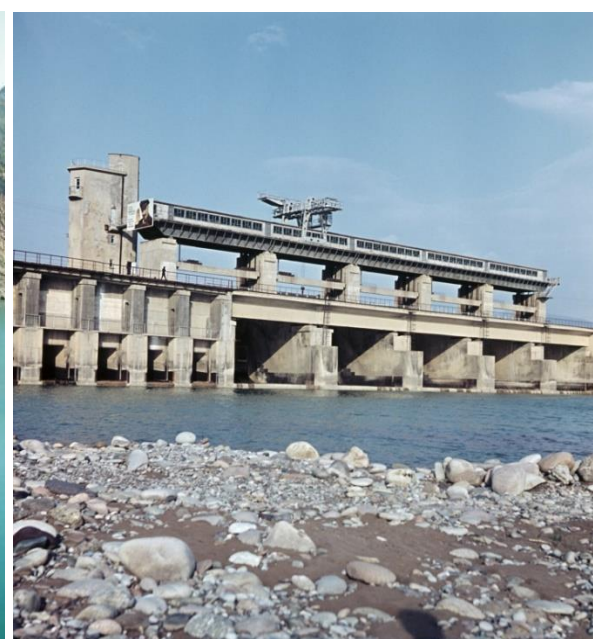
имеют водохранилища, позволяющие гидростанциям работать в режиме регулирования мощности, остальные ГЭС работают в базисном режиме.

<p><b>Чарвакская ГЭС</b>  Тип плотины - грунтовая каменно-набросная  Высота плотины – 168 метров</p>	<p><b>Тупалангская ГЭС</b>  Тип плотины - грунтовая каменно-набросная  Высота плотины – 180 метров</p>
--	--



Рисунки 1.9а. Крупнейшие электростанции Узбекистана

<p><b>Ходжикентская ГЭС</b>  Тип плотины - грунтовая  Высота плотины – 40 метров</p>	<p><b>Туямунская ГЭС</b>  Тип плотины - грунтовая  Высота плотины – 34метров</p>
--	--



Рисунки 1.9б. Крупнейшие электростанции Узбекистана



### 1.2.1. Электроэнергетики республики Казахстан

В Республики Казахстане потенциал по выработке электроэнергии с помощью гидроэлектростанций (ГЭС) составляет 170 млрд кВт·ч, а технически обоснованный – 62 млрд кВт·ч. [11-14].

Следует отметить, что в 2022 году потребление электроэнергии в Казахстане составило 112,8 млрд кВт·ч. Таким образом, потенциально РК может закрыть примерно половину потребности в электроэнергии только за счет ГЭС [11-14].

Суммарная установленная мощность всех электростанций Казахстана составляют итогом до 2018 года 18 992.7 МВт электроэнергии. Однако, выработка большинства электростанций не достигает установленной мощности. Выработка по типу электростанций распределяется следующим образом:

- ТЭС (тепловые электростанции) — 87,7 %;
- КЭС (конденсационная электростанция) — 48,9 %;
- ТЭЦ (теплоэлектроцентраль) — 36,6 %;
- ГТЭС (газотурбинная электростанция) — 2,3 %;
- ГЭС (гидроэлектростанции) — 12,3 %.

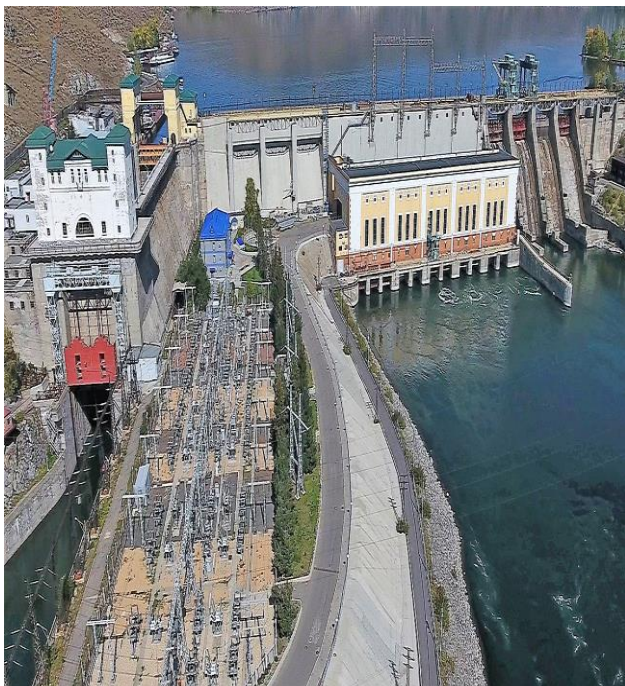
Тип плотины - земляная насыпная Высота плотины – <b>39 метров</b>	Тип плотины - гравитационная бетонная Высота плотины – <b>91 метров</b>
--	---



Рисунки 1.10а. Крупнейшие электростанции Республики Казахстана

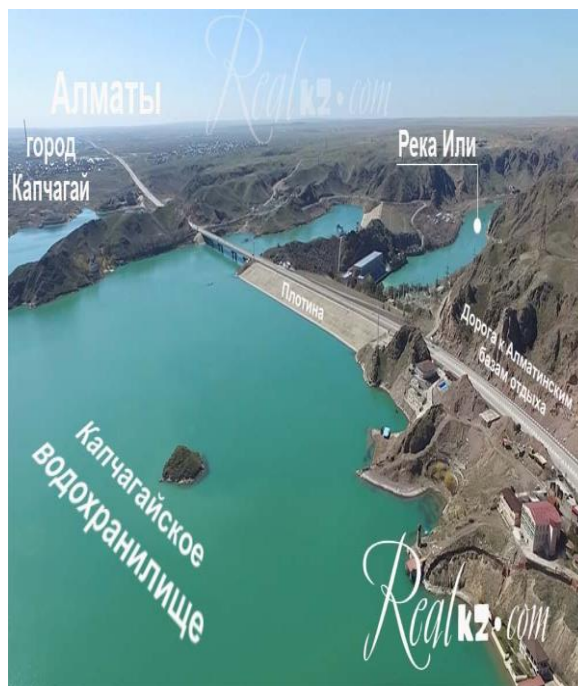
### Усть-Каменогорская ГЭС

Тип плотины - бетонная  
гравитационная  
Высота плотины – 64 метров



### Капчагайская ГЭС

Тип плотины - грунтовая  
Высота плотины – 56 метров



Рисунки 1.10б. Крупнейшие электростанции Республики Казахстан

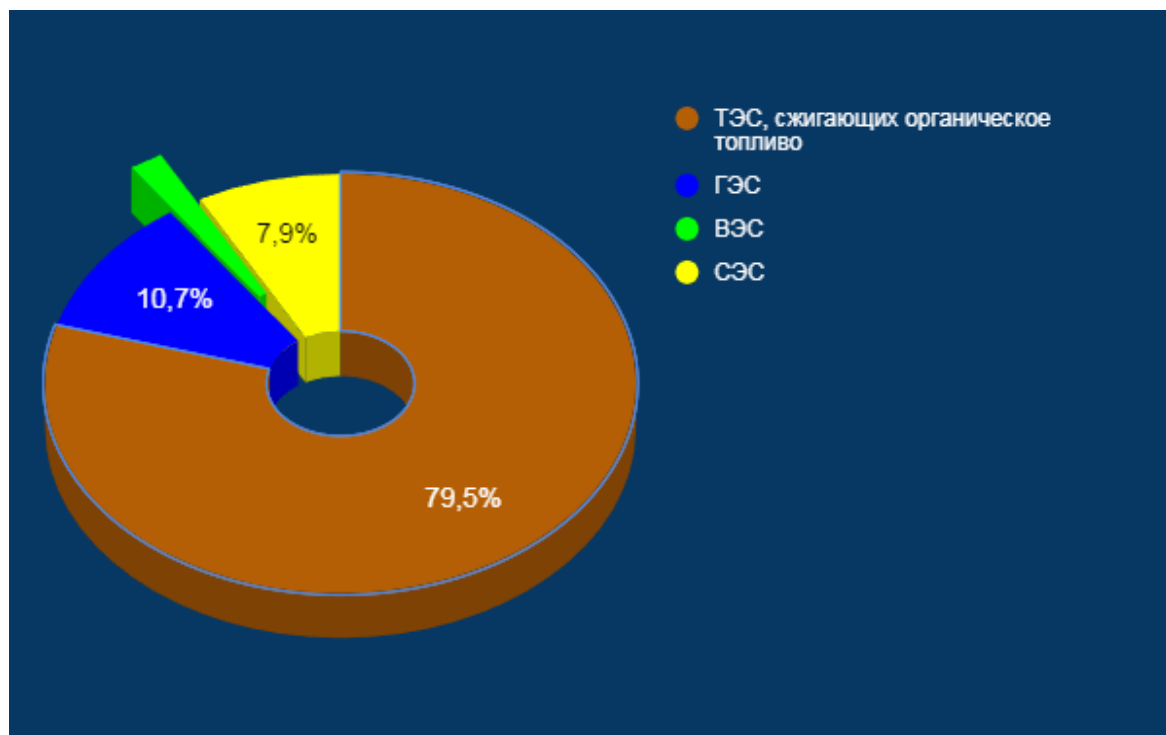


Рисунок 1.11. Структура установленной мощности-нетто генерирующих источников по типам на конец 2020 года, МВт



### 1.2.2. Электроэнергетики Республики Кыргызстан

Республики Кыргызстан обладает большим потенциалом для развития гидроэнергетики. По объему формируемых на ее территории водных ресурсов Республика занимает третье место среди государств СНГ.

На территории республики производство электрической энергии осуществляют 7 ГЭС, 2 тепловые станции национального значения ОАО «Электрические станции» и 9 малых ГЭС ОАО «Чакан ГЭС» [4].

1-Токтогульская ГЭС[17,18]; 2-Курпсайская ГЭС[19]; 3-Таш-Кумырская ГЭС[19]; 4- Камбар-Атинская ГЭС-2[19]; 5 - Уч-Курганская ГЭС; 6- Шамалды-Сайская ГЭС; 7- Ат-Башинская ГЭС

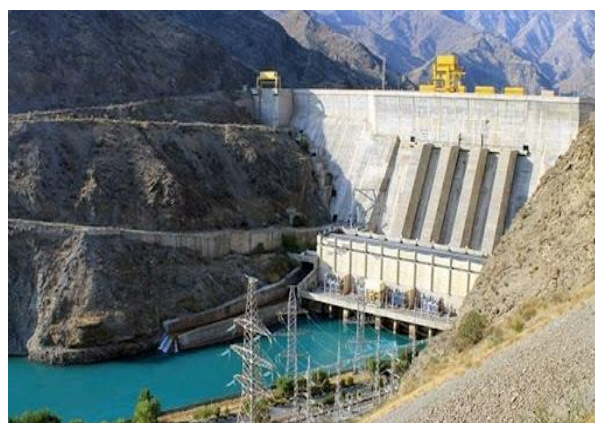
#### Токтогульская ГЭС

Тип плотины - гравитационная бетонная  
Высота плотины – **215 метров**



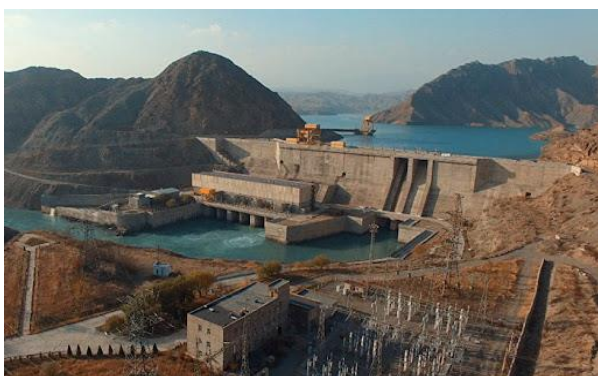
#### Курпсайская ГЭС

Тип плотины - бетонная гравитационная  
Высота плотины – **113 метров**



#### Таш-Кумырская ГЭС

Тип плотины - гравитационная бетонная  
Высота плотины – **75 метров**



#### Камбаратинская ГЭС-2

Тип плотины - грунтовая взрывонабросная  
Высота плотины – **70 метров**



Рисунки 1.12а. Крупнейшие электростанции Республики Кыргызстан

Рисунки 1.12б. Крупнейшие электростанции Республики Кыргызстан

### **1.2.3. Электроэнергетики России**

Гидроэнергетика является важнейшей частью электроэнергетики России. Общая мощность гидроэлектростанций Российской Федерации превышает 52 ГВт, что составляет около 20% общей мощности всех электростанций страны. Из пяти самых мощных электростанций России всех типов - три ГЭС: Саяно-Шушенская (6,4 ГВт), Красноярская (6 ГВт) и Братская (4,5 ГВт).

Крупнейших ГЭС России самые мощные гидроэлектростанции расположены в Сибири

#### **1. Саяно-Шушенская ГЭС**

установленная мощность - 6400 МВт;

Тип плотины бетонная арочно-гравитационная; высота плотины - 242 метров.

#### **2. Красноярская ГЭС**

установленная мощность - 6000 МВт;

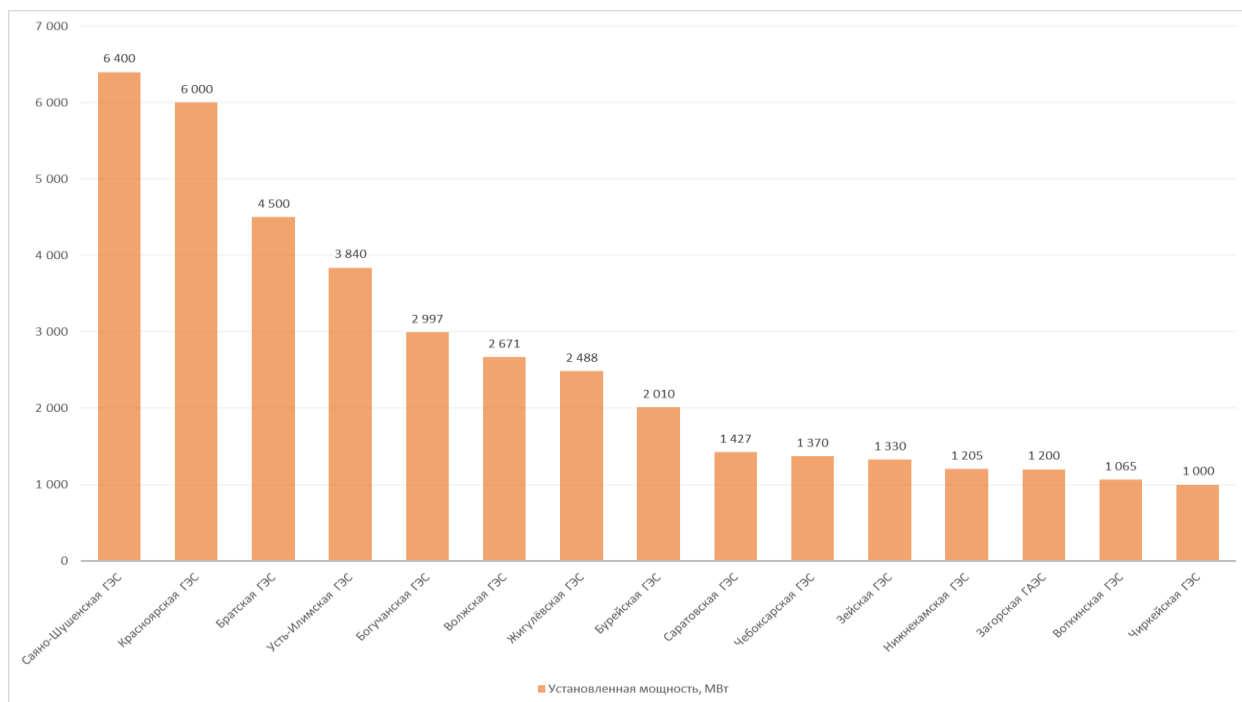
Тип плотины бетонная гравитационная; высота плотины - 128 метров.

#### **3. Братская ГЭС**

установленная мощность - 4500 МВт;

Тип плотины бетонная гравитационная; высота плотины - 125 метров.

В России до 2018 года эксплуатировались 102 ГЭС и ГАЭС (мощностью более 10 МВт) совокупной мощностью 51,7 ГВт (в том числе в составе Единой энергосистемы России эксплуатировались гидроэлектростанции общей мощностью 48 506,3 МВт). На гидроэнергетику приходится около 20 % установленной мощности российской электроэнергетики и 17-18 % выработки электроэнергии в России. В 2022 году мощность гидроэнергетики составляла 52 754 МВт [20,21].



**Рисунок 1.13. Крупнейшие ГЭС России**

### **1.3. Гидроэнергетика Республики Таджикистан**

Главным источником электричества в Республики Таджикистан является гидроэлектроэнергия основным доступным энергетическим ресурсом.

Республики Таджикистан занимает 8-е место в мире по уровню гидроэнергетического потенциала с совокупными возможностями выработки электроэнергии на ГЭС до 527 млрд кВт-ч в год [22]. Следует отметить, что, по оценкам экспертов, для поддержания существующего объема мощностей ГЭС в Таджикистане к 2030 г. потребуются модернизировать около 80 % мощностей в стране [23].

Крупнейшими гидроэлектростанциями республики являются:

- Нурекская ГЭС на реке Вахш мощностью 3000 МВт; тип плотины каменно-земляная; высота плотины - 300м;
- Байпазинская ГЭС мощностью 600 МВт; тип плотины грунтовая; высота плотины - 75м;
- Сангтудинская ГЭС-1 мощностью 670 МВт; тип плотины каменно-земляная; высота плотины - 75м;

-Сангтудинская ГЭС-2 мощностью 220 МВт; тип плотины каменно-земляная; высота плотины - 34м;

Кроме того, на реке Вахш построены и успешно работает Каскад Вахшских ГЭС, три гидроэлектростанции, с общей мощностью 285 МВт; на реке Варзоб – Каскад Варзобских ГЭС общей мощностью 25 МВт; на реке Сырдарья – Кайраккумская ГЭС мощностью 126 МВт; на Памире, на реке Гунт Хорогская ГЭС и Памирская ГЭС-1 с общей мощностью 37 МВт [1,22].

### РОГУНСКАЯ ГЭС

Рогунская ГЭС - строящаяся гидроэлектростанция на реке Вахш, входит в состав Вахшского каскада и с установленной мощностью 3600 МВт является самой большой ГЭС в Центральной Азии. В здании ГЭС будут установлены шесть гидроагрегатов мощностью по 600 МВт с радиально-осевыми турбинами. Среднегодовая выработка электроэнергии в Рогунской ГЭС составит более 17,0 млрд кВт.час в год.

Каменно-набросной плотины высотой 335 метров станет самой высокой в мире.

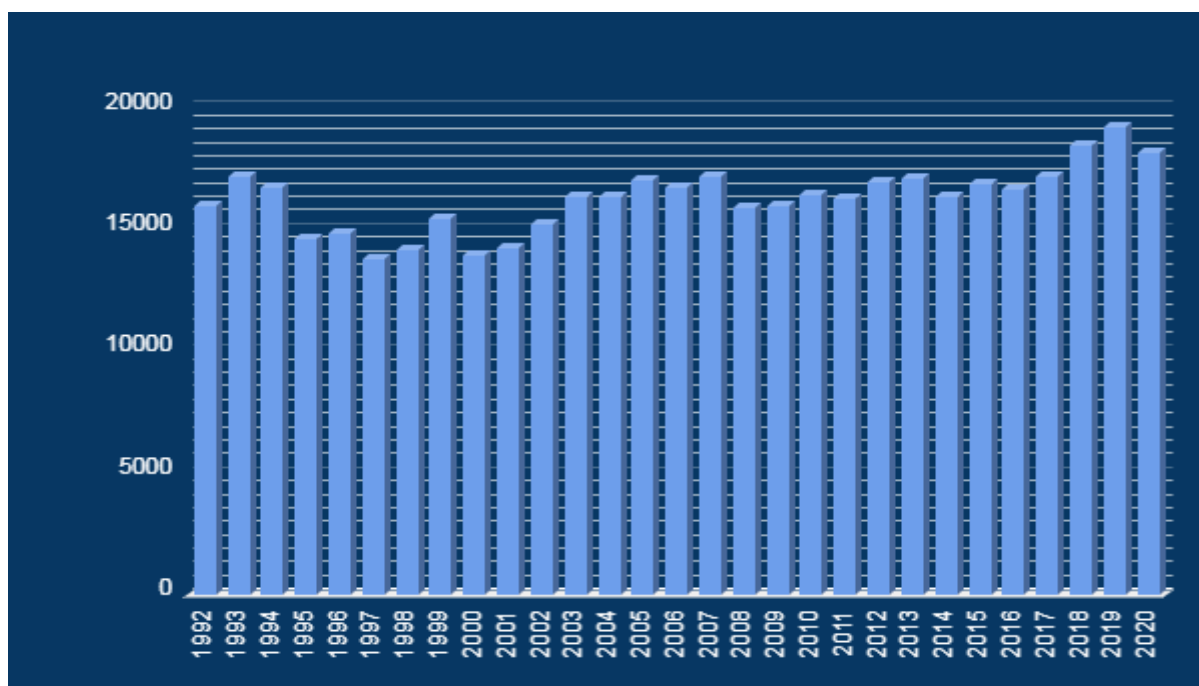


Рисунок 1.14. Производство электроэнергии на ГЭС, 1992-2020, млрд. кВт·ч

### **Выводы по главе 1:**

1. Проанализированы опыты строительства отечественных и зарубежных гидроэнергетических тоннелей.
2. Проанализирована мировая энергетика и гидроэнергетика центральной Азии и России.
3. Произведены исследования, изучению проблемы и опыты строительства гидроэнергетика республики Таджикистан

## **Глава 2. ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЙОНА И МЕСТА СТРОИТЕЛЬСТВА ПРОЕКТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА**

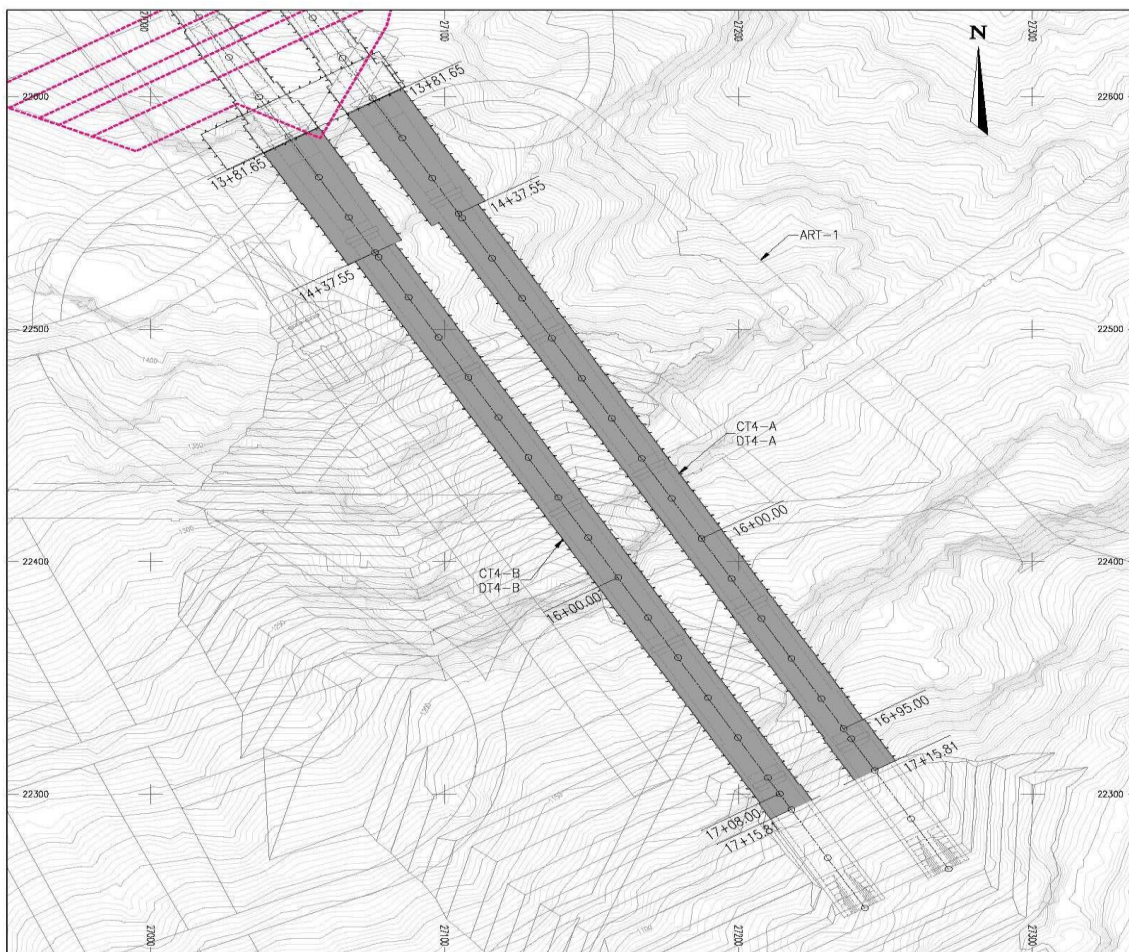
### **2.1. Структура**

Проходки и крепи породы безнапорных тоннелей и переходного участка после камеры затворов СТ-4, расположенного на правом берегу створа плотины Рогунской ГЭС.

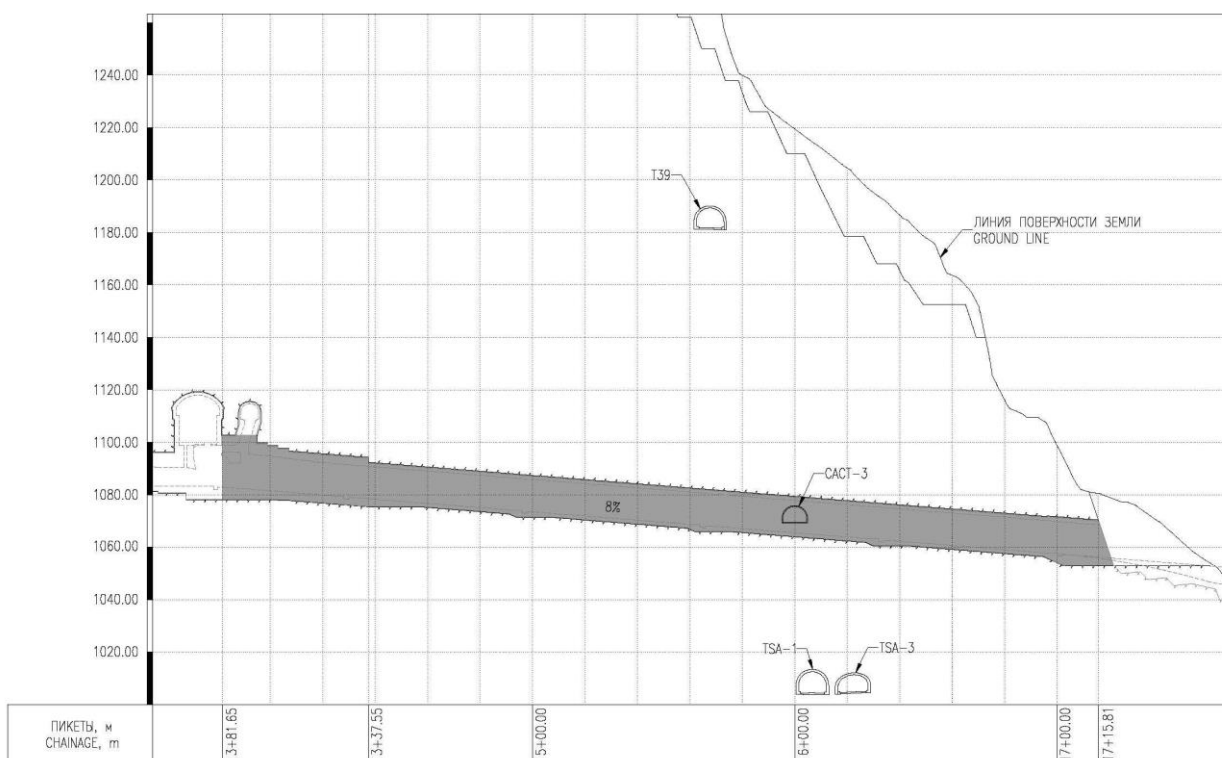
Анализ устойчивости и расчет крепи породы для СТ-4 выполнялись с учетом геологических условий, известных на данном этапе реализации проекта и опираясь на имеющуюся информацию, включая данные, собранные при составлении геологических карт по пройденным участкам СТ-4, подходного тоннеля АСТ-2, аэрационного тоннеля ART-1 и строительного подходного тоннеля САСТ-3. Кроме того, использовались также данные исследований разведывательных скважин RE-37 и RE-38, основная цель которых заключалась в том, чтобы исследовать разлом №35 и охарактеризовать породные массивы, вмещающие безнапорные тоннели СТ-4А и СТ-4Б, а также их переходные участки после камеры затворов. Разведочные скважины RE-37 были пробурены на пикетаже П13+57 гидротехнического тоннеля СТ4-А вдоль стороны левого ответвления общей длиной 96м, также имеет пересечения разломом №35 в СТ-4А на пикете П14+17м. Также разведочные скважины RE-38 была пробурена на пикете П15+00 м тоннеля СТ-4Б, за камерой затворов, вдоль правого ответвления общей протяженностью 82м с целью исследования разлома №35 и получения информации о состоянии скального грунта в данном ответвлении. Скважина RE-38 пересекла разлом № 35 в СТ4-Б на пикете П14+38 м.

Безнапорные тоннели СТ-4 расположены за низовой камерой затворов, и начинаются на ПК. 13+81.65 м и заканчиваются на ПК 17+15.81 м. рисунок 2.1 и 2.2. показывают общий план и продольный профиль СТ-4. Некоторые типовые сечения данных тоннелей изображены на 2.3. по 2.6.

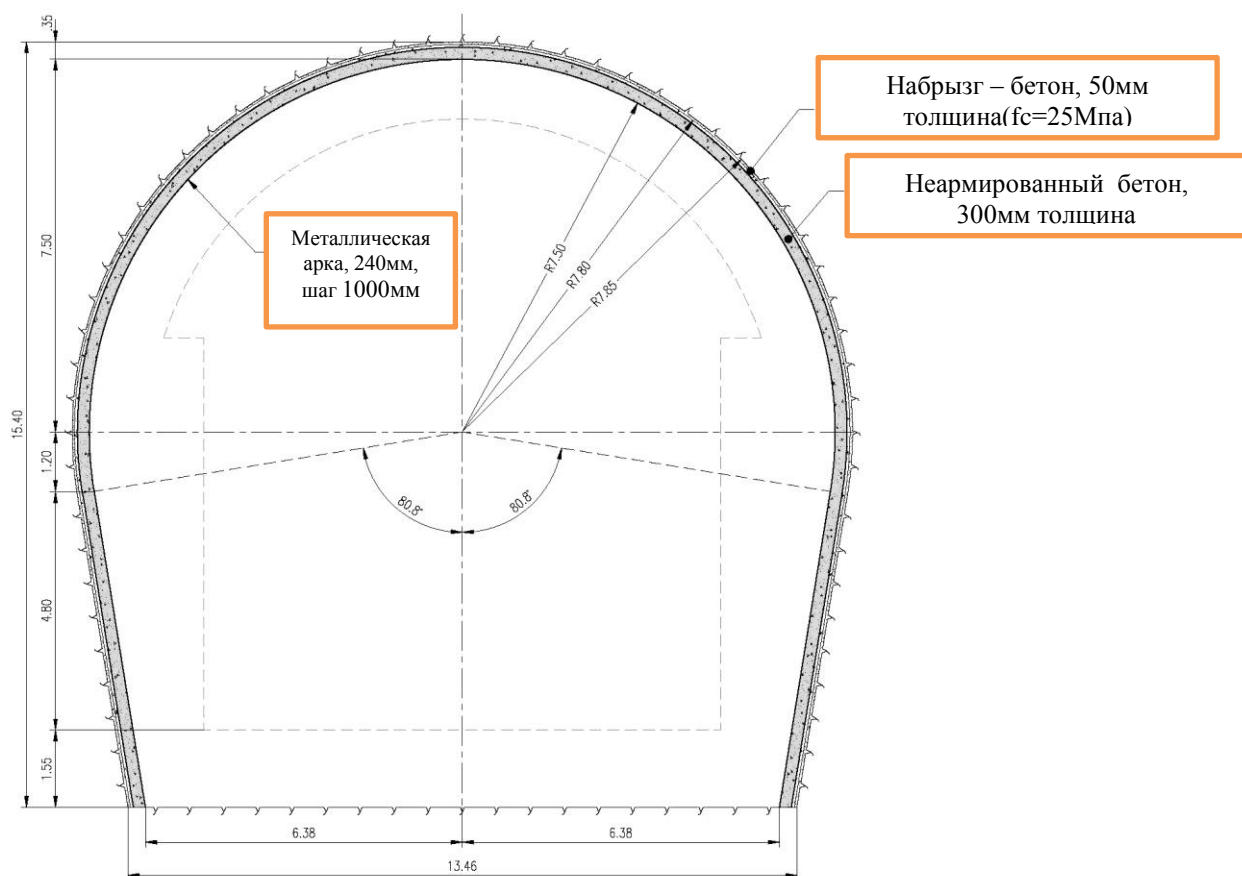




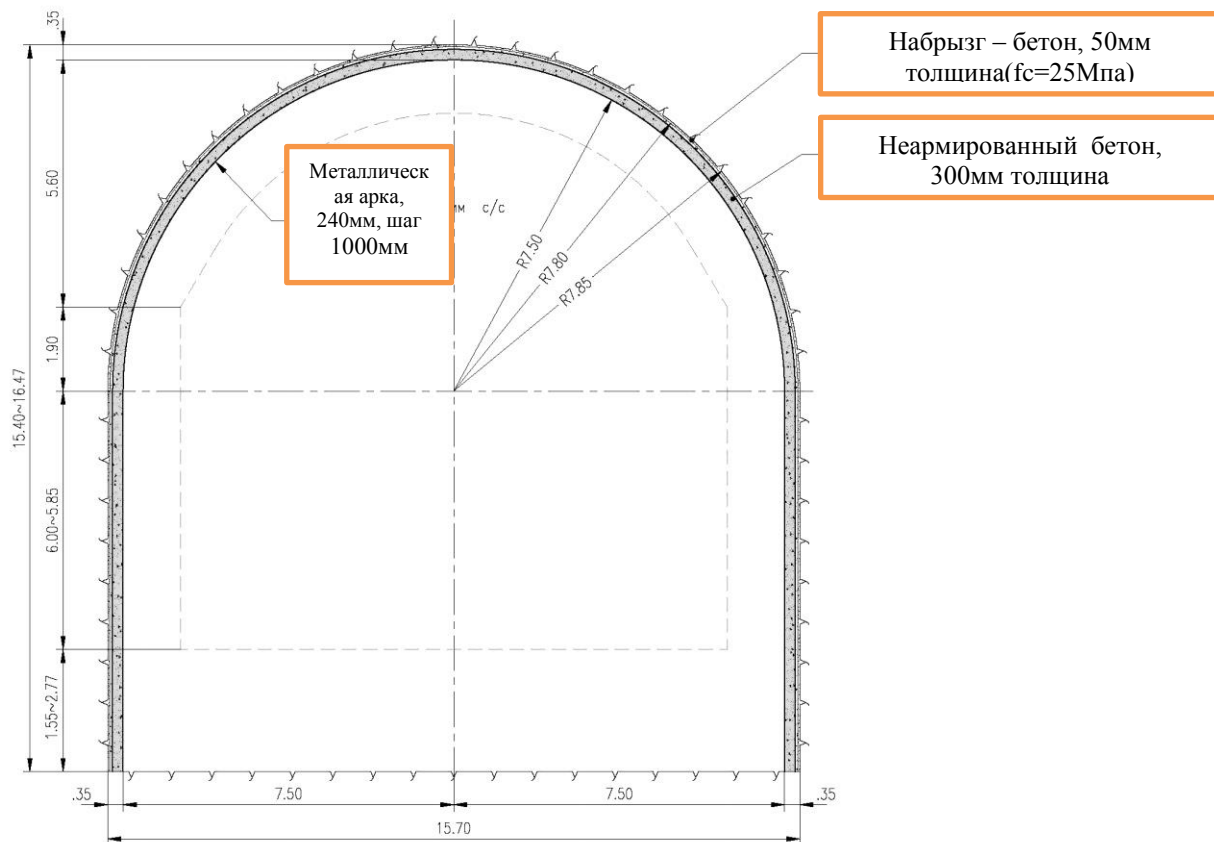
**Рисунок 2.1.** Вид в плане безнапорный тоннелей СТ-4



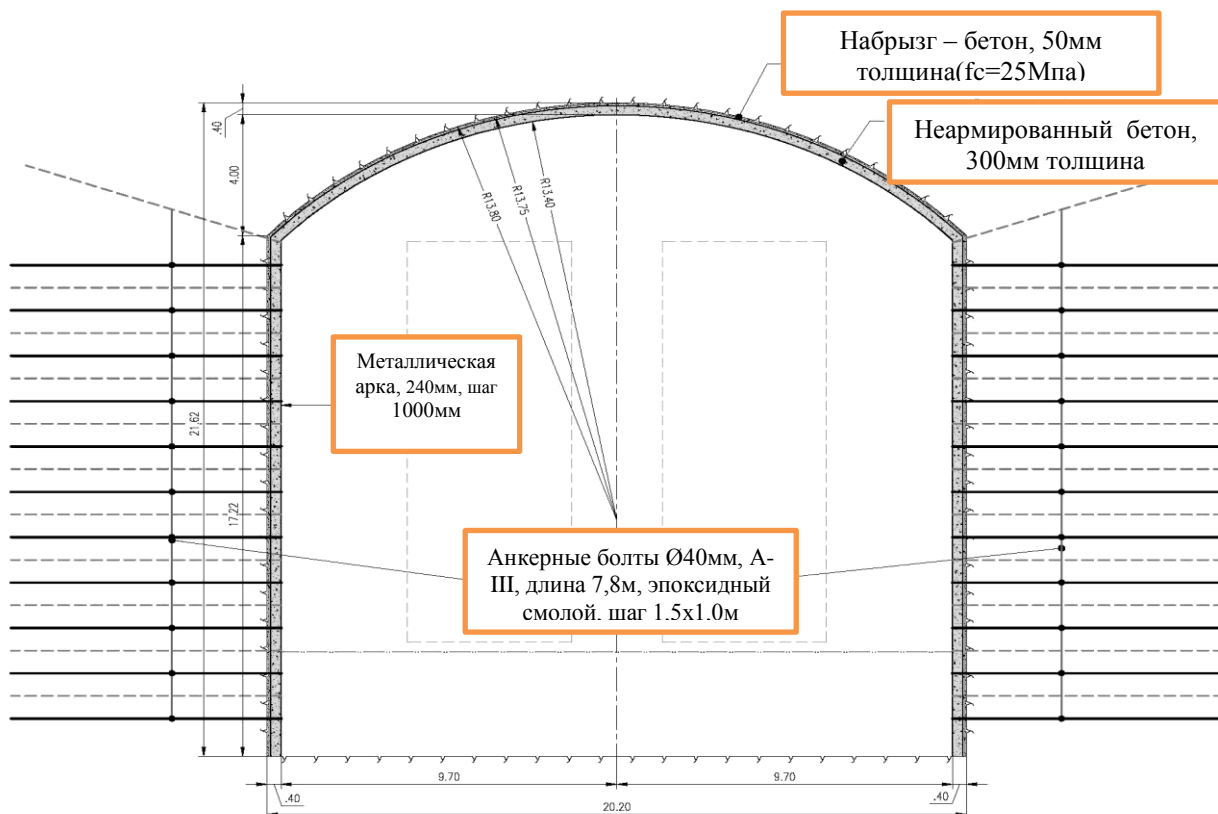
**Рисунок 2.2.** Продольный профиль вдоль безнапорного тоннеля СТ-4



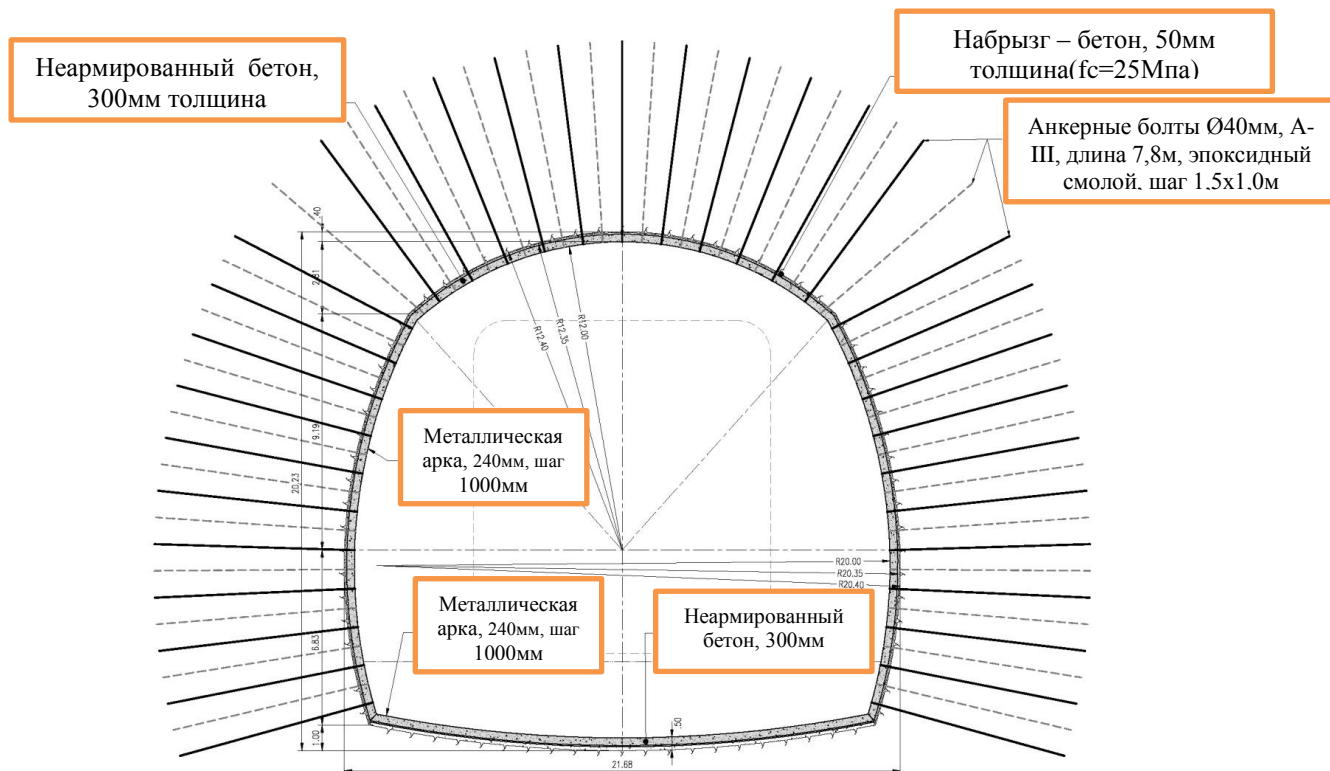
**Рисунок 2.3.** Безнапорные тоннели СТ-4 подковообразное сечение



**Рисунок 2.4.** Безнапорные тоннели СТ-4, D-образное сечение, используемое в месте расположения азраторов



**Рисунок 2.5.** Безнапорные тоннели СТ-4 . Типовое сечение XXII используемое для переходной зоны после камеры затворов



**Рисунок 2.6.** Безнапорные тоннели СТ4 – Типовое сечение XXIV используемое для переходной зоны после камеры затворов и при пересечении разлома 35

## **2.2. Задачи исследования**

Цель данной исследований состоит в том, чтобы дать пояснения по трем различным методикам, использованным при проектировании систем крепи породы, которые должны быть установлены в ходе проходки СТ-4.

Полученные анализы по неразрушенной горной породе и оценка состояния породного массива грунтов мы использовали самая современная методика системы классификации (Q2015) [24] по выявления первичные системы крепи горных породы, которые потребуются при разработке СТ-4 в различных литологических грунтах. Кроме того, для оценки параметров породного массива использовалась откорректированная версия классификации по GSI, разработанная В Мариносом в 2010 [25] с проверкой при помощи количественного метода (Хоек и др., 2013 [26]). *Затем, путем применения аналитического метода (анализ клиньев) и математического метода (конечно-элементный анализ), системы первичной крепи породы, подобранные при помощи эмпирического метода, проверялись, и принималось решение о требуемых системах крепи для установки в различных частях СТ-4.*

## **2.3. Инженерно-геологические условия СТ-4**

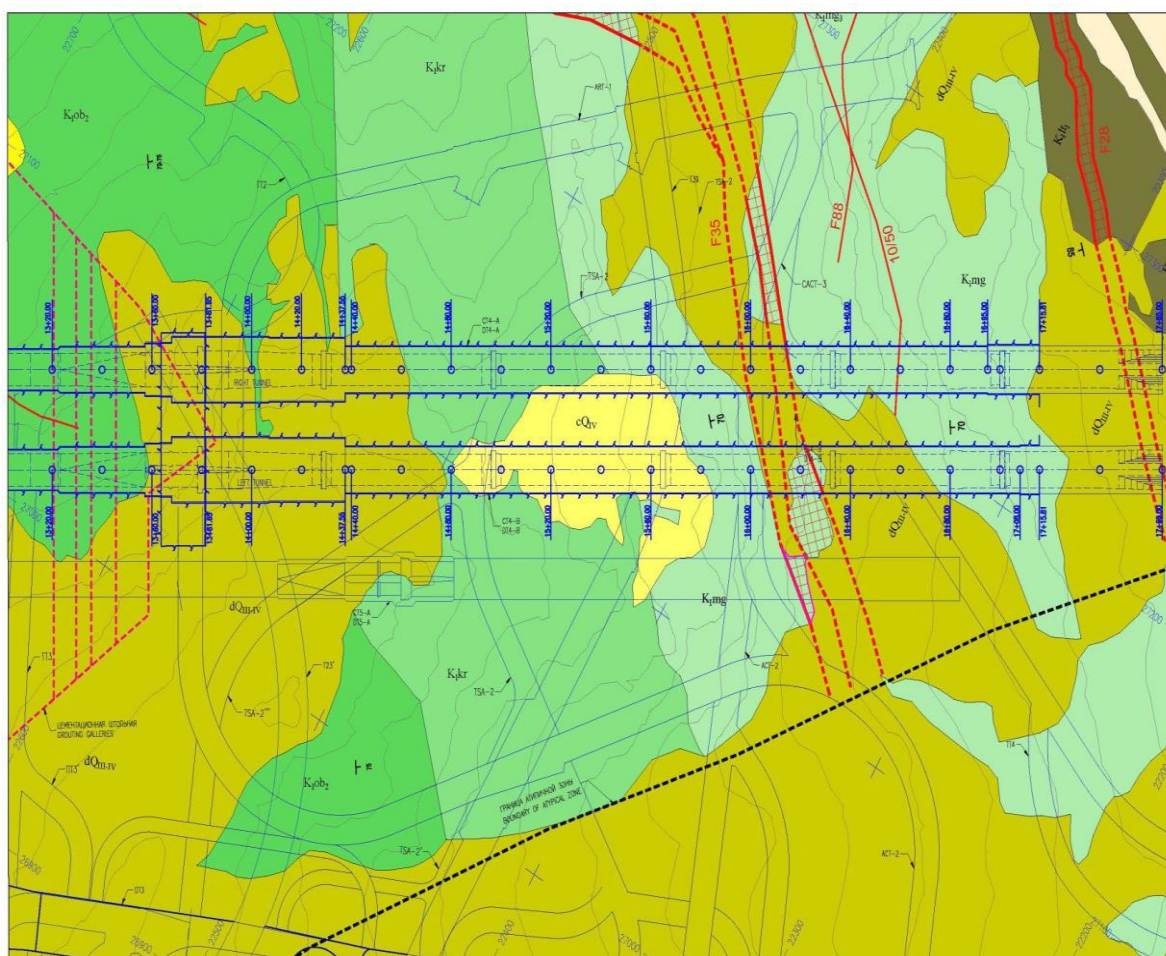
Основные литологические условия гидротехнического безнапорного тоннеля СТ-4 заключается в том, что вдоль безнапорных тоннелей действительно залегают породные массивы преимущественно удовлетворительного и плохого качества, однако на некоторых участках тоннелей встречаются очень слабые и чрезвычайно слабые грунты. В связи с этим при том, что доминирующим режимом образования обрушений в ходе проходки данных двух тоннелях является структурно контролируемое обрушение, в породных массивах, вмещающих СТ-4, в местах пересечения зоны разлома №35, могут возникать обрушения, индуцированные напряжением

Последовательности проходки и установки первичной крепи выбирались, исходя из геологических условий, известных на данном этапе



реализации проекта, опираясь на данные, собранные в ходе составления геологических карт соседних тоннелей, которые уже построены или строятся сейчас на различных высотных отметках по правому берегу, включая СТ-4 и его подходные тоннели, СТ-3 и его аэрационный тоннель (АТ2), а также результаты дополнительных исследований, направленных на выяснение места расположения разлома №35 на правом берегу, включая пробуренные скважины RE-37 и RE-38. В любом случае, фактические геологические условия не будут известны до тех пор, пока проходка СТ-4 не будет доведена до конца. В ходе ведения земляных работ фактические геологические условия будут подвергаться сравнению с допущениями по проекту.

Геологический план и продольный разрез строительного тоннеля СТ-4, приведены на рисунки 2.8 по 2.10.



**Рисунок 2.8.** Геологический план тоннеля СТ-4

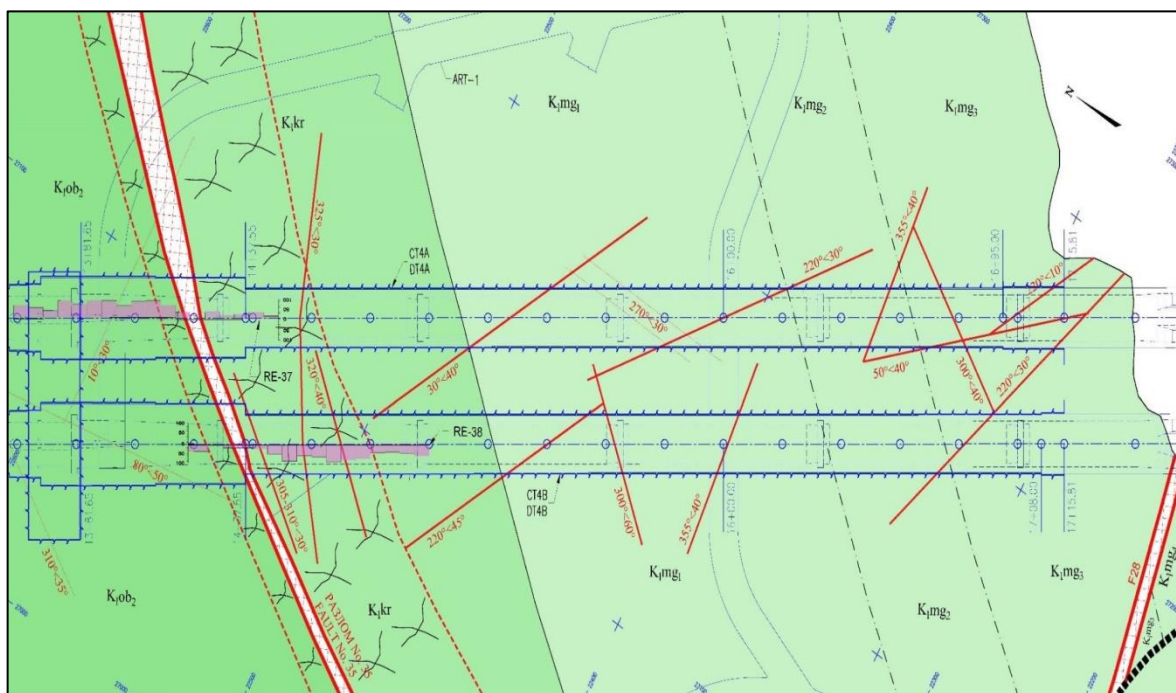


Рисунок 2.9. План геологических уровней свода безнапорных тоннеля СТ-4

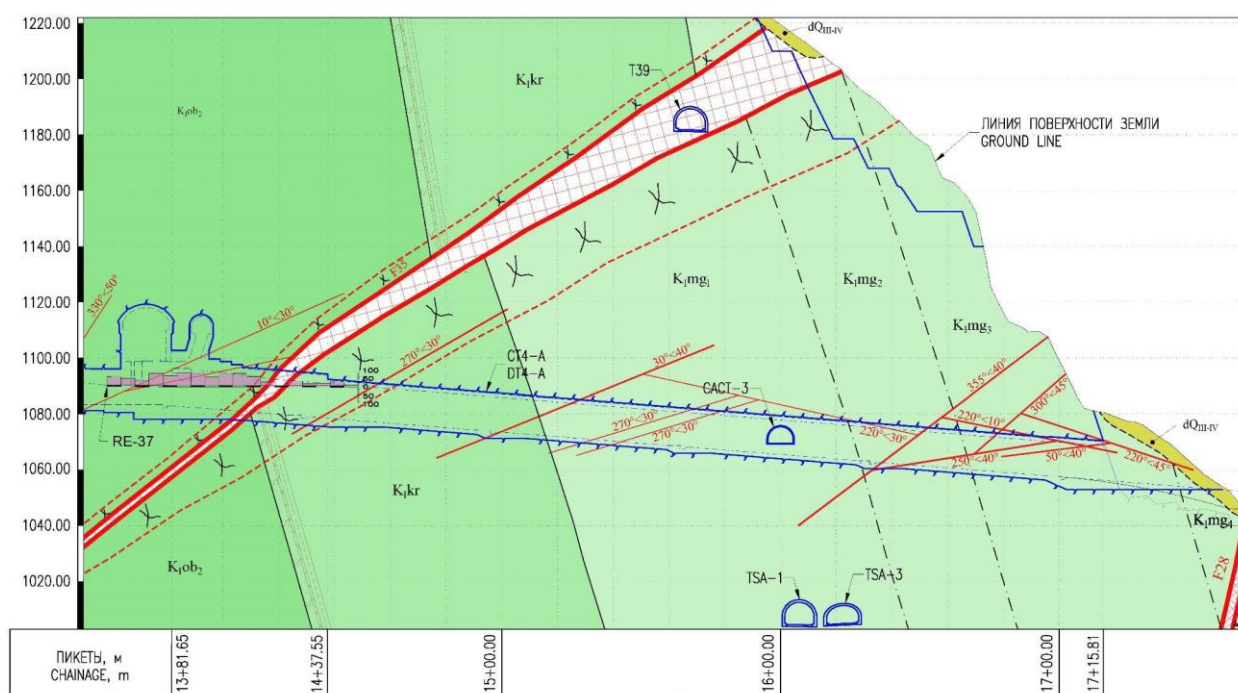


Рисунок 2.10. Геологический профиль вдоль безнапорного тоннеля ветви СТ-4

## 2.4. Геология строительного тоннеля СТ-4

Основными геологическими формациями вдоль безнапорных тоннелей являются мингбатманская, каракузская и верхнеобигармская формации, которые можно описать следующим образом.



### ***Мингбатманская формация (K1mg)***

Эта свита состоит в основном из песчаников с вкраплениями алевролитов и аргиллитов. СТ-4 пересекают три пачки этой формации, начиная от поздней (третья пачка) у портала до ранней (первая пачка) у конца тоннеля:

-третья пачка (K1mg3): слои песчаников большой и очень большой мощности с прослоями алевролитов и брекчии (граувакка). Мощность этой пачки составляет 73 м.

-вторая пачка (K1mg2): чередование слоев коричневых песчаников малой и средней мощности со слоями серовато-зеленых аргиллитов и красновато - коричневых алевролитов малой и средней мощности. Мощность этой пачки составляет 38 м. На рисунок 2.11 показан общий вид K1mg2.

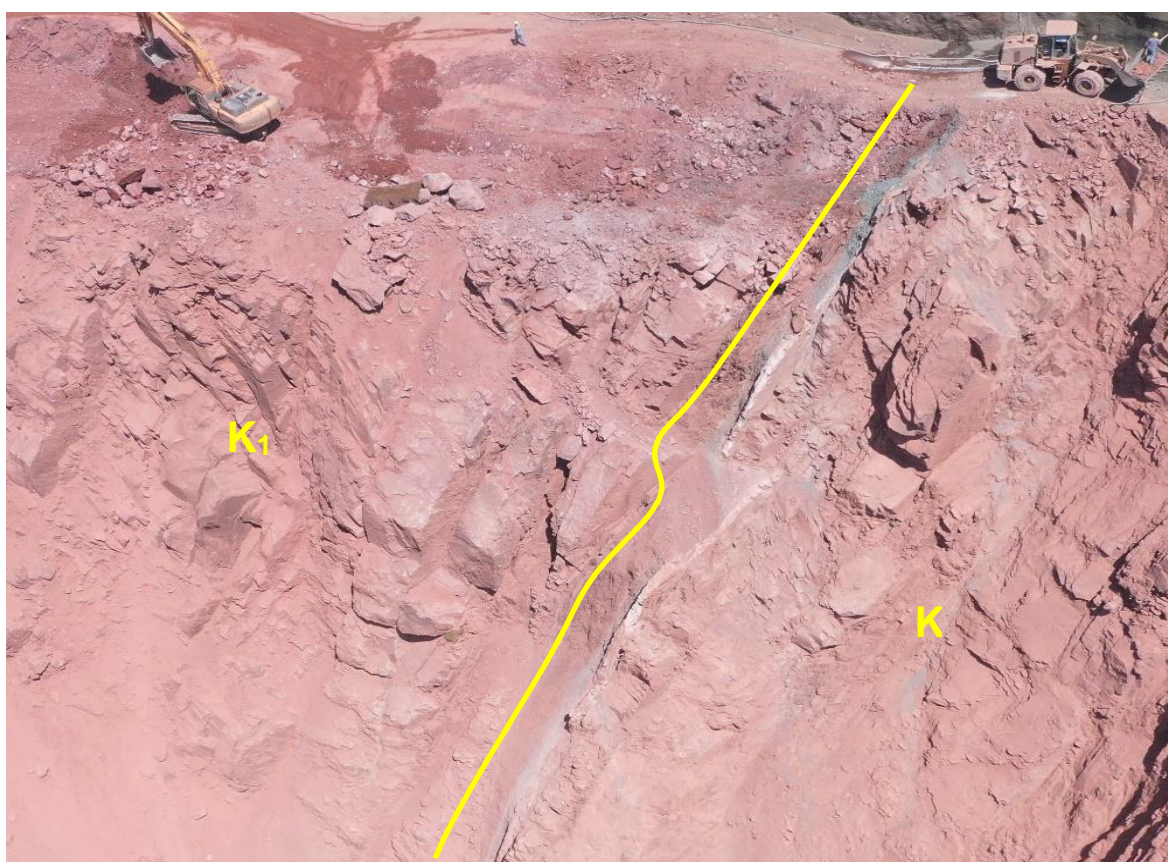


**Рисунок 2.11.** Общий вид второй пачки мингбатманской формации (K1mg2) с прослоями песчаников, аргиллитов и алевролитов

Первая пачка (K1mg1): Коричневые песчаники большой и очень большой мощности с тонкими прослоями аргиллитов и алевролитов. Мощность этой пачки составляет 96 м.

### *Каракузская формация (K<sub>1kr</sub>)*

Такие горные породы состоят из прослоев коричневых тонкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов. Вблизи контакта с верхнеобигармской формацией чаще встречаются вкрапления алевролитов, аргиллитов и гипса. На самом деле, имеются три пласта алевролитов, серовато-зеленых аргиллитов и гипса в основании формации с породами нижележащей верхнеобигармской свиты, которые были помечены как маркирующие слои. Эти слои показаны на продольном геологическом профиле СТ-4 (рисунок 2.12).



**Рисунок 2.12.** Общий вид по БПЛ в направлении снизу вверх. 1) красновато-коричневые алевролиты, 2) серовато-зеленые аргиллиты и 3) розовато-белый гипс

### *Верхнеобигармская формация (K<sub>1ob2</sub>)*

Верхнеобигармская формация сложена из пластов песчаников большой и средней мощности с прослоями аргиллитов и алевролитов. Пласты алевролитов встречаются практически повсеместно в данной формации в качестве прослоев между слоями песчаников. Песчаники



являются твердыми и тонкозернистыми, очень прочными с известковым цементом (плотным и твердым), слабо и сильно трещиноватыми.

Следует отметить, что по результатам исследования трещин и геологического картографирования близлежащих подземных проходов, были составлены характеристики несплошностей вдоль безнапорных тоннелей, которые приведены рисунок 2.13 и в таблице 2.1.

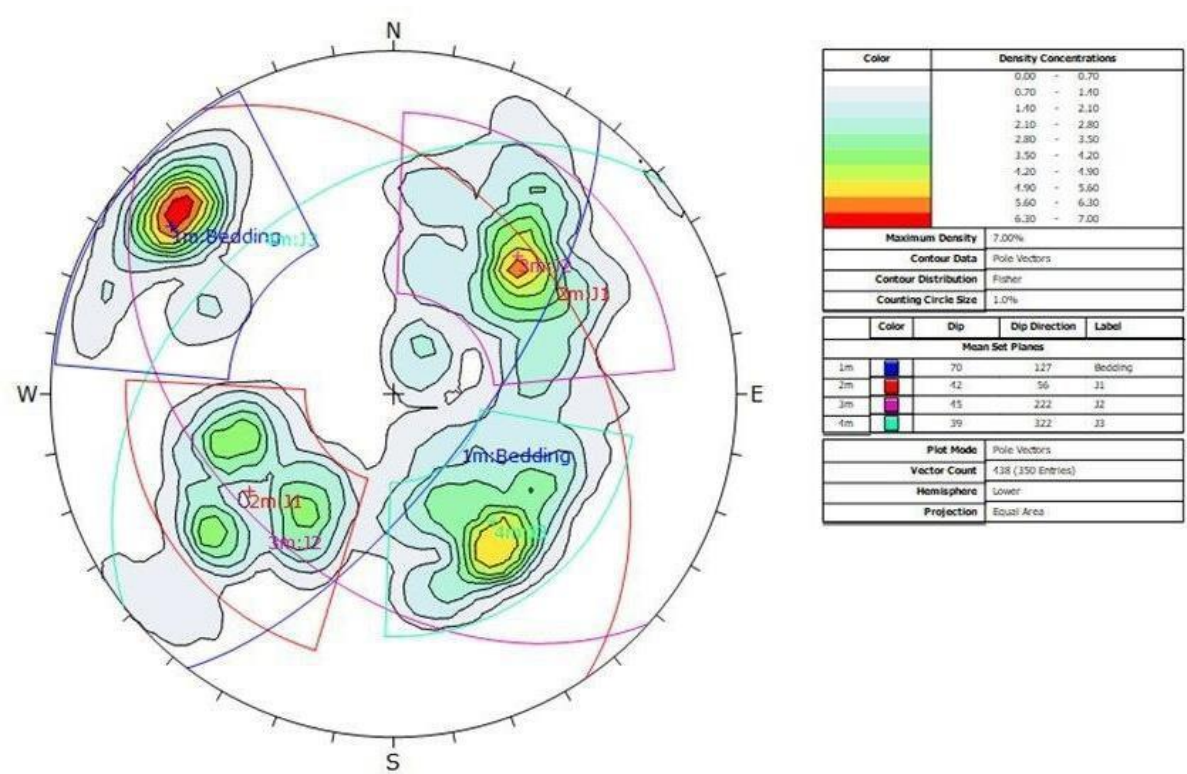


Рисунок 2.13.Стреограмма несплошности СТ-4



**Таблица 2.1.** Характеристики основных несплошностей строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС

Тип	Направление / Угол падения [°]	Протяжен- ность [м]	Интервал [см]	Шероховатость	Раскрытие [мм]	Заполнение		Выветренность	Состояние по грунт. водам
						Тип	Толщина [мм]		
J1 (Напласто- вание)	127°/70°	>20	6-20 (10%) 20-60 (40%) 60-200 (50%)	Волнистая гладкая до шероховатой (60%) – Плоско гладкая до шероховатой (40%)	0.1-1(60%) 1-5 (30%) >5 (10%)	Нет (10%) Глина (30%) Гипс (40%) Кальцит (20%)	<0.1(20%) 0.1-1(30%) 1-5 (30%) >5 (20%)	Слегка до умеренно выветрелый	Мокрый до капающего
Система трещин J2	056°/42°	3-10	6-20 (40%) 20-60 (60%)	Волнистая гладкая до шероховатой (30%) – Плоско гладкая до шероховатой (70%)	0.1-1(50%) 1-5 (40%) >5 (10%)	Нет (10%) Глина (30%) Гипс (30%) Кальцит (30%)	<0.1(20%) 0.1-1(30%) 1-5 (30%) >5 (20%)	Слегка до умеренно выветрелый	Влажный до мокрого
Система трещин J3	222°/45°	3-10	6-20 (20%) 20-60 (50%) 60-200 (30%)	Волнистая гладкая до шероховатой (40%) – Плоско гладкая до шероховатой (40%)	0.1-1(60%) 1-5 (30%) >5 (10%)	Нет (10%) Глина (20%)	<0.1(20%) 0.1-1(30%) 1-5 (30%) >5 (20%)	Слегка до умеренно выветрелый	Влажный до мокрого
Система трещин J4	322°/39°	3-10 10-20	20-60 (50%) 60-200 (50%)	Волнистая гладкая до шероховатой (40%) плоскогладкая до шероховатой (60%)	0.1-1(70%) 1-5 (20%) >5 (10%)	Нет (10%), Глина (20%), Гипс (40%) и кальцит (30%)	<0.1(20%) 0.1- 1(30%) 1-5 (30%) >5 (20%)	Слегка до умеренно выветрелый	Мокрый до копающего

### 2.4.1. Разломы

Основным разломом, который пересекает СТ-4, является разлом F35 и несколько второстепенных разломов. В соответствии с геологическим планом горизонта и профилем, пересечение безнапорными тоннелями разлома F35 будет происходить в пикетах от 14+07 м и 14+28 м для СТ4-А и в пикетах 14+20 м и 4+43 м для СТ4-Б.

В соответствии с недавно пробуренными разведочными скважинами на участке вблизи цементационной галереи G1R на правом берегу и двумя разведывательными скважинами, пробуренными в безнапорных тоннелях СТ4-А и СТ4-Б, мощность глинки трения в основной ветви разлома составляет примерно от 3 до 6 м, но в некоторых местах она может достигать 10 м.

Расположение этих скважин RE-37 [27] и RE-38 [28] на виде в плане и геологическом продольном профиле по трассе двух ответвлений безнапорных тоннелей показано на рисунок 2.9 и 2.10, соответственно. Фотографии ящиков с кернами из разведочной скважины RE-37, пробуренной изнутри СТ4-А на пикете 14+37 м и скважины RE-38, пробуренной изнутри СТ4-В на пикете 15+00м показаны на рисунки 2.14 по 2.17. Материалы глинки трения включают непластичные материалы с размером зерна, соответствующего песку и алевролитам, с немногочисленными фрагментами песчаников размером с гравий.

Расположение скважин с RGC-06 [29] по RGC-09 на плане и геологический продольный профиль вдоль G1R представлены на рисунках 2.18 по 2.19, соответственно. Фотографии ящиков кернов, отобранных из скважины RGC-08 [30] пробуренной изнутри подходного тоннеля Т-3' показаны на рисунках 2.20 и 2.21.





Рисунок 2.14: Скважина RE-37 – Зона сдвига разлома 35 на глубине 59.90 до 62.85м.



Рисунок 2.15: Скважина RE-37 – Зо на сдвига разлома 35 на глубине 62.85 до 66.55м.

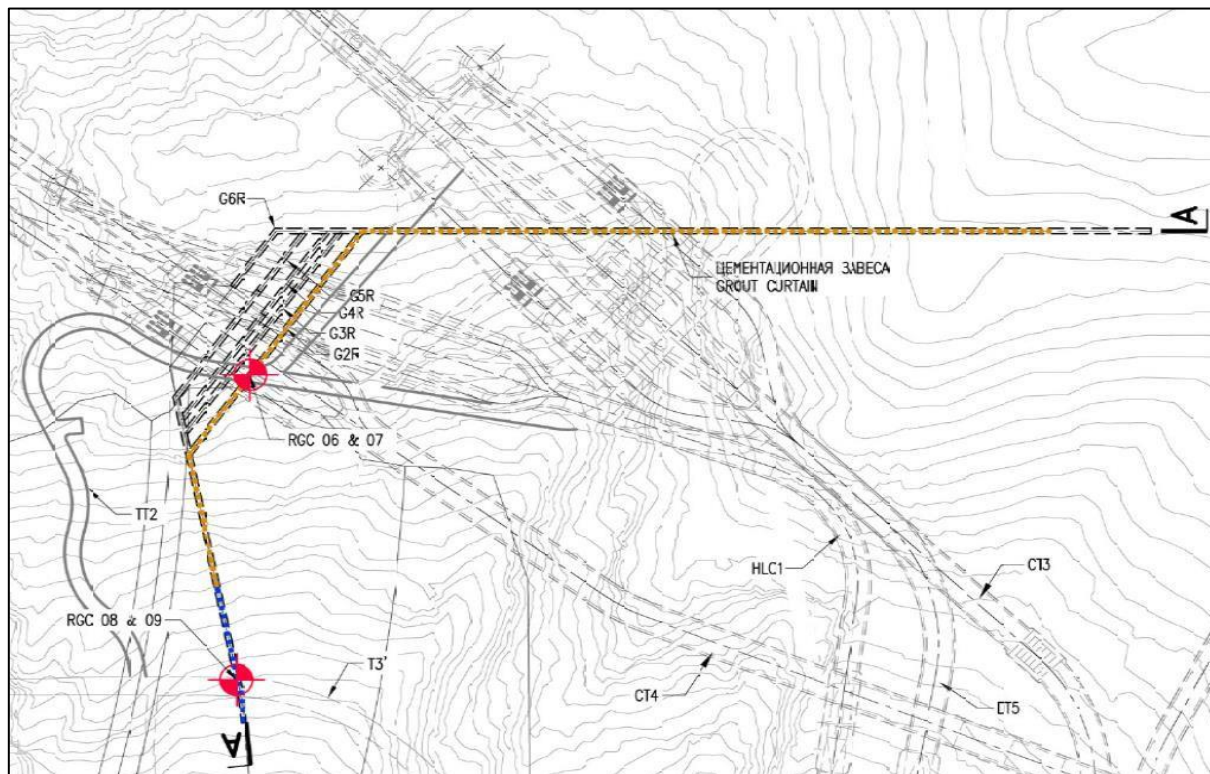


Рисунок 2.16. Скважина RE-38. Зона сдвига разлома 35 на глубине 71.30 до 74.40

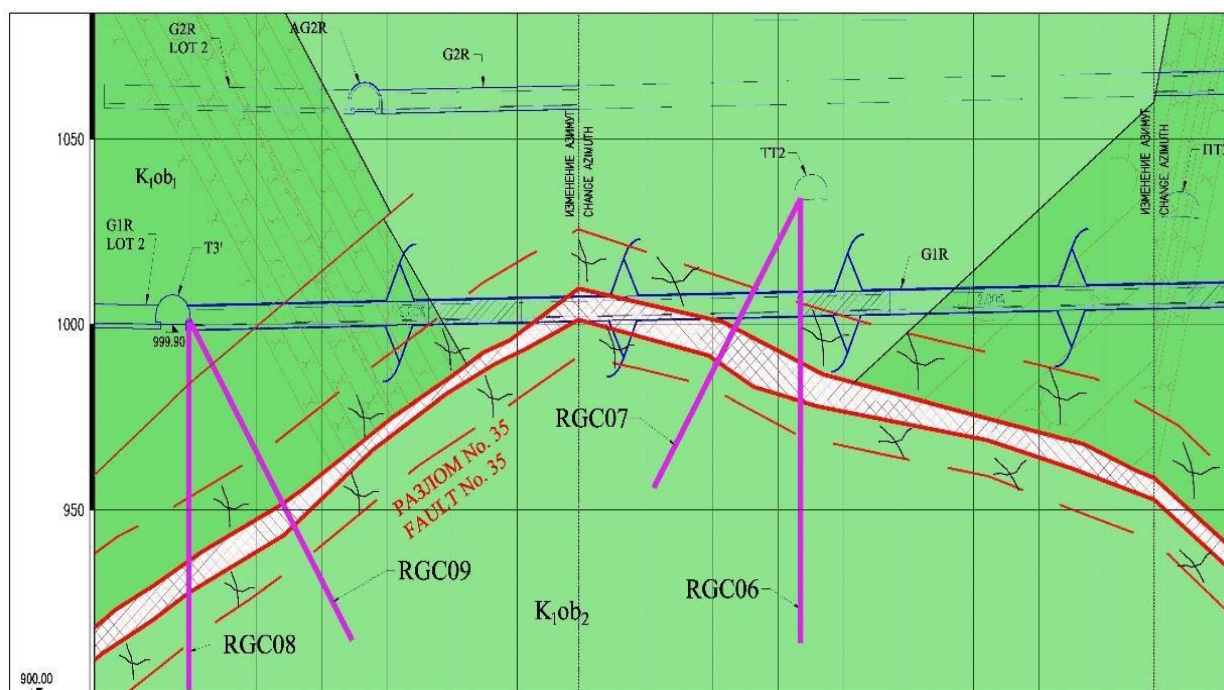


Рисунок 2.17. Скважина RE-38. Зона сдвига разлома 35 на глубине 74.40 до 75.20



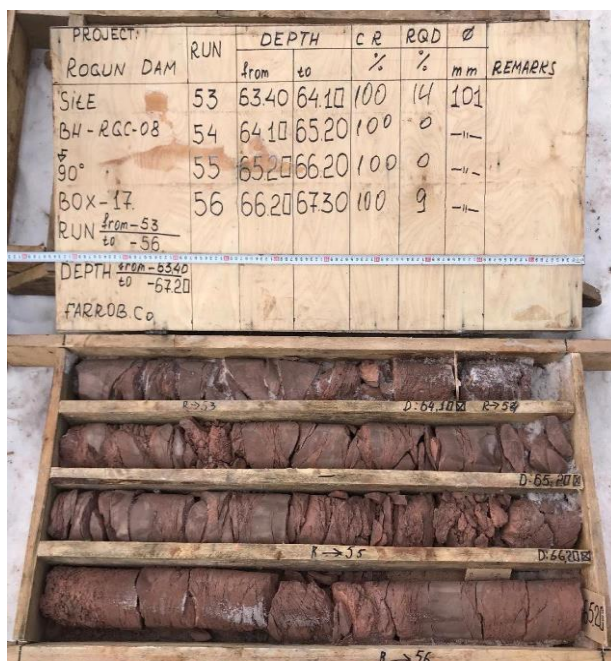


**Рисунок 2.18.** Местоположение разведывательных скважин RGC-06 - RGC-09 пробуренных для исследования разлома 35 на виде в плане цементационной галереи G1R.



**Рисунок 2.19.** Продольный геологический профиль вдоль цементационной галереи G1R с разведывательных скважин RGC-06 - RGC-09 пробуренных для исследования разлома 35.





**Рисунок 2.20.** Сквжина RGC-08 – зона сдвига разлома на глубине 63.4 до 67.2 м



**Рисунок 2.21.** Сквжина RGC-08 – зона сдвига разлома на глубине 67.2 до 71.0 м

Следует отметить, что кроме разведочных скважин, был отмечен разлом №35 в передовом забое проходки СТ4-А и СТ4-В с направлением и углом падения  $310^{\circ}$ - $320^{\circ}/45^{\circ}$ , как показано на рисунках 2.22 и 2.23



**Рисунок 2.22:** Зона разлома 35 материалы глины, алевролит и песок. Красные линии показывают границу лежащего бока разлома №35 в тоннеле СТ4-В



**Рисунок 2.23:** Разлом 35 в тоннеле СТ4-А, красной стрелкой показано направление зеркальных скольжений на плоскости разлома

Этот разлом соединен с двумя основными разломами, расположенными около или вокруг створа плотины: Ионахшским и Гулизинданским разломами. Согласно проектной документации, для разлома F35 характерны некоторые смещения ползучести, т.е. относительная скорость смещения составляет 1-2 мм в год. Согласно результатам испытаний Люжон, разлом F35 является практически водонепроницаемым.

#### **2.4.2. Гидрогеология**

В целом, на нижних отметках правого берега вокруг СТ-4 уровень грунтовых вод является ровным и ниже, чем на верховых участках правого берега, особенно в сравнении с участками, расположенными до Ионахшского разлома. Это может объясняться либо высокой проницаемостью горных массивов в низовой части правого берега, либо дренированием грунтовых вод в имеющихся подходных тоннелях и галереях в этой части правого берега.



## Интерпретация геотехнических данных

В данном разделе представлены результаты геотехнических исследований, включая изыскания ненарушенной породы и основных несплошностей, а также классификация горных массивов по методам Q и GSI. На основании результатов таких изысканий были оценены геомеханические параметры различных типов горных массивов с использованием конкретных значений GSI и критерия разрушения Хоек-Брауна [31]. Для получения более реалистичной оценки модуля деформации горных массивов были использованы две эмпирические формулы: одна из них на основании значения GSI, как предложено Хоеком и др. [32], а другая – на основании значения Q, как предложено Бартоном [33].

Для оценки параметров ненарушенной породы формаций, залегающих по трассе безнапорных тоннелей, были использованы результаты и заключения двух технических записок ЭЙФРИ по испытаниям с молотком Шмидта и UCS для песчаников верхнеобигармской (K1ob2), каракузской (K1kr) и нижнемингбатманской (K1mg1) свит, а также алевролитов нижнеобигармской свиты (K1ob1).

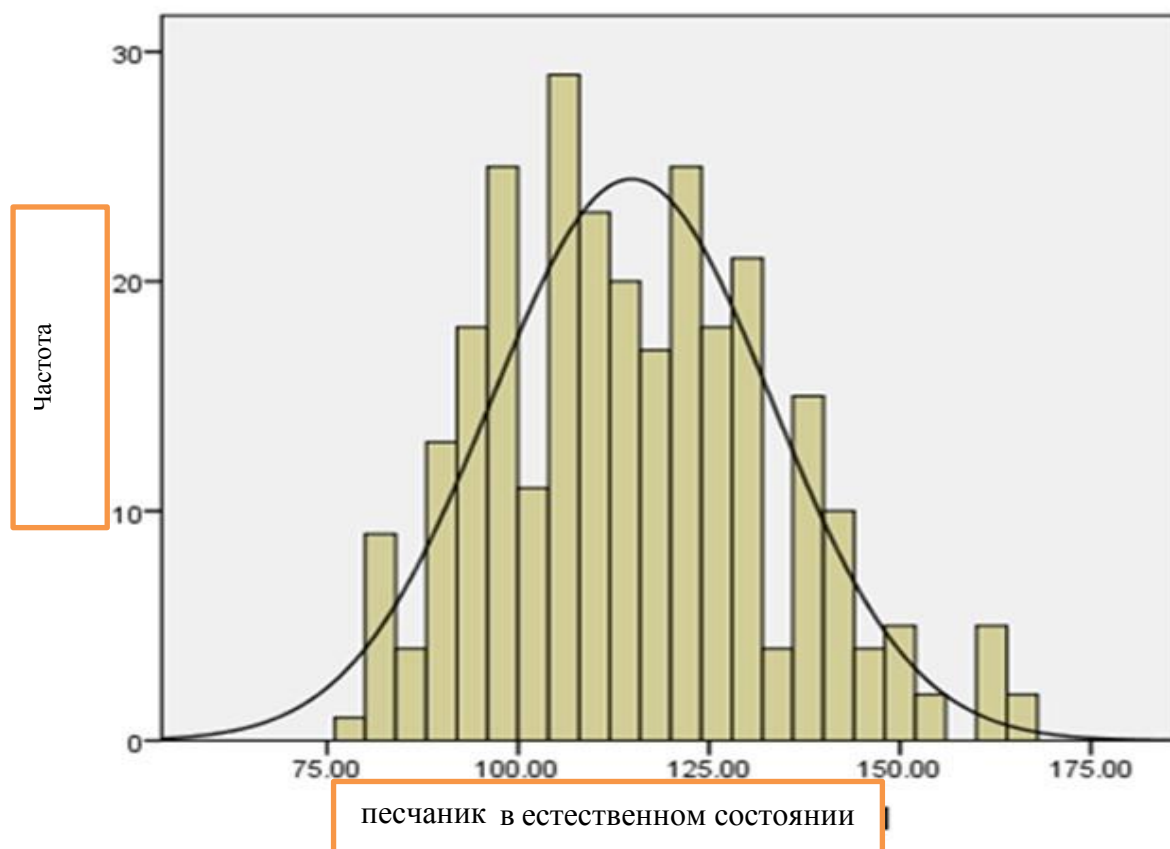
Кроме того, для разлома F35 используются результаты испытаний с молотком Шмидта и UCS для материалов жильной глины, представленные в [34].

Данные испытаний и подробные расчеты испытаний с молотком Шмидта были представлены в таблице 2.2. На рисунок 2.24 показаны гистограммы эквивалентных значений UCS для песчаников трех геологических формаций в естественном и насыщенном состоянии.

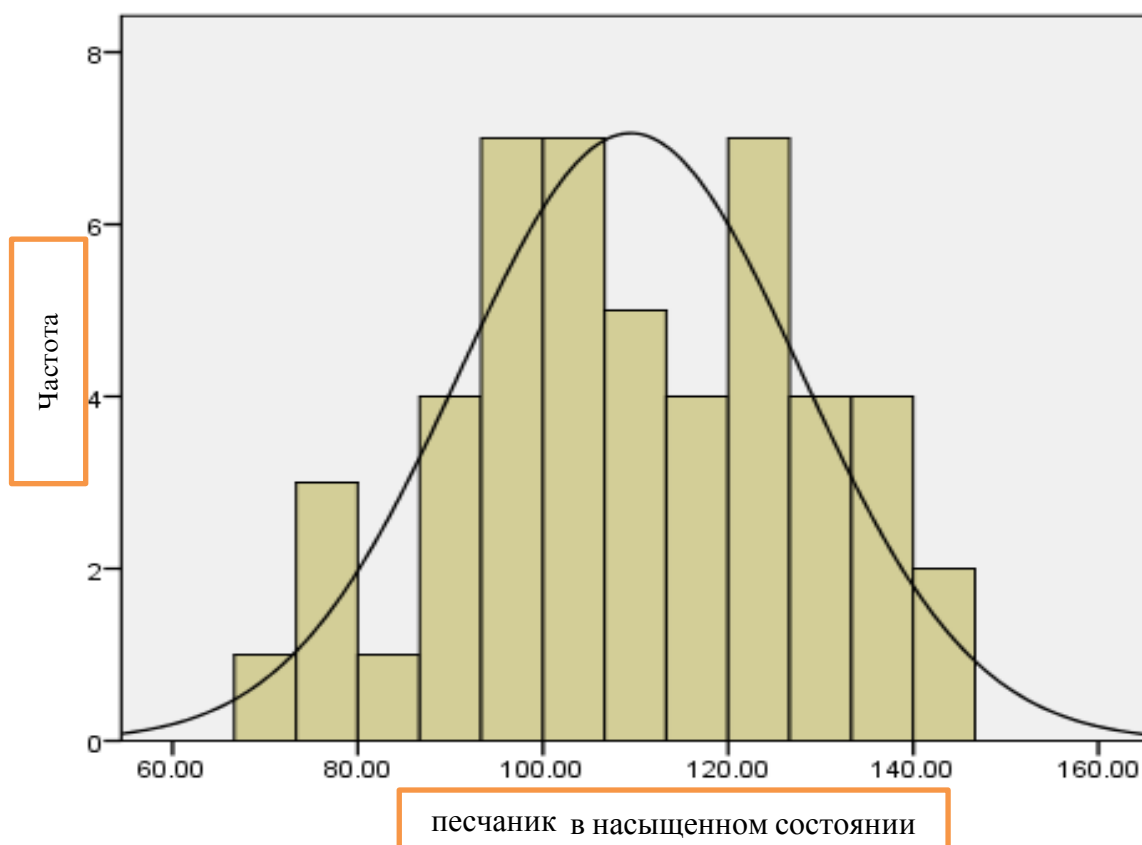
В диссертационной работе было рекомендовано принять следующие значения UCS в качестве расчетных параметров для ненарушенных песчаников в свитах K1ob2, K1kr и K1mg1, в насыщенном состоянии:

**Таблица 2.2:** Сводные результаты испытаний с молотком Шмидта для песчаников K1ob2, K1kr и K1mg1 в естественном и насыщенном состоянии

Статистический параметр	Песчаник в естественном состоянии	Песчаник в насыщенном состоянии
№	281	49
Минимум (МПа)	79	73
Максимум (МПа)	167	145
Среднее значение (МПа)	115	109
Медианное значение (МПа)	113	108
Стандартное отклонение (МПа)	18.3	18.5
Коэффициент вариации (%)	16	16.9
Среднее - стандартное отклонение (МПа)	<b>97</b>	<b>91</b>



а)



**Рисунок 2.24:** Гистограммы эквивалентных значений UCS песчаников в свитах K1ob2, K1kr и K1mg1 и кривая нормального распределения: а) песчаник в естественном состоянии, в) песчаник в насыщенном состоянии

В диссертационном работе было рекомендовано принять следующие значения UCS в качестве расчетных параметров для ненарушенных песчаников в свитах K1ob2, K1kr и K1mg1, в насыщенном состоянии:

Ненарушенные песчаники свит K1ob2, K1kr и K1mg1 в насыщенном состоянии:

$$UCS_{design} = 91 \text{ МПа.}$$

В данном работе вышеуказанные значения UCS использованы в качестве расчетного параметра для UCS песчаников в насыщенном состоянии верхнеобигармской (K1ob2) формации.

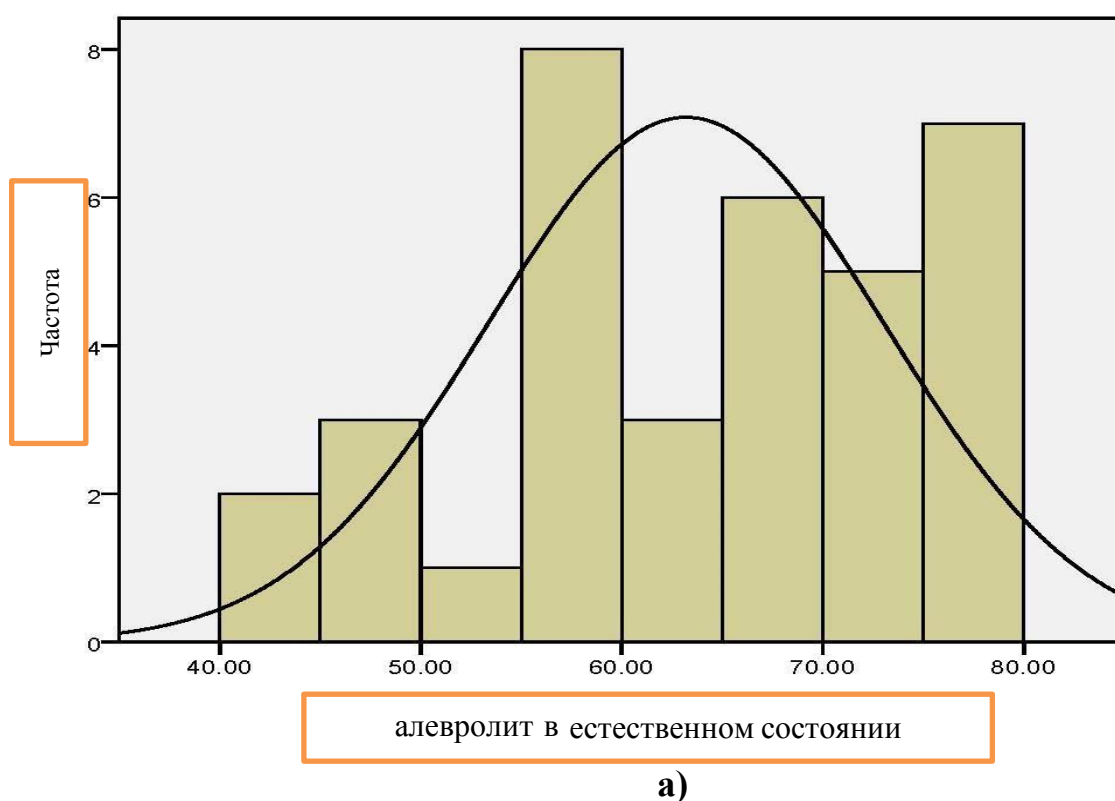
*Значение UCS для алевролитов K1ob1*

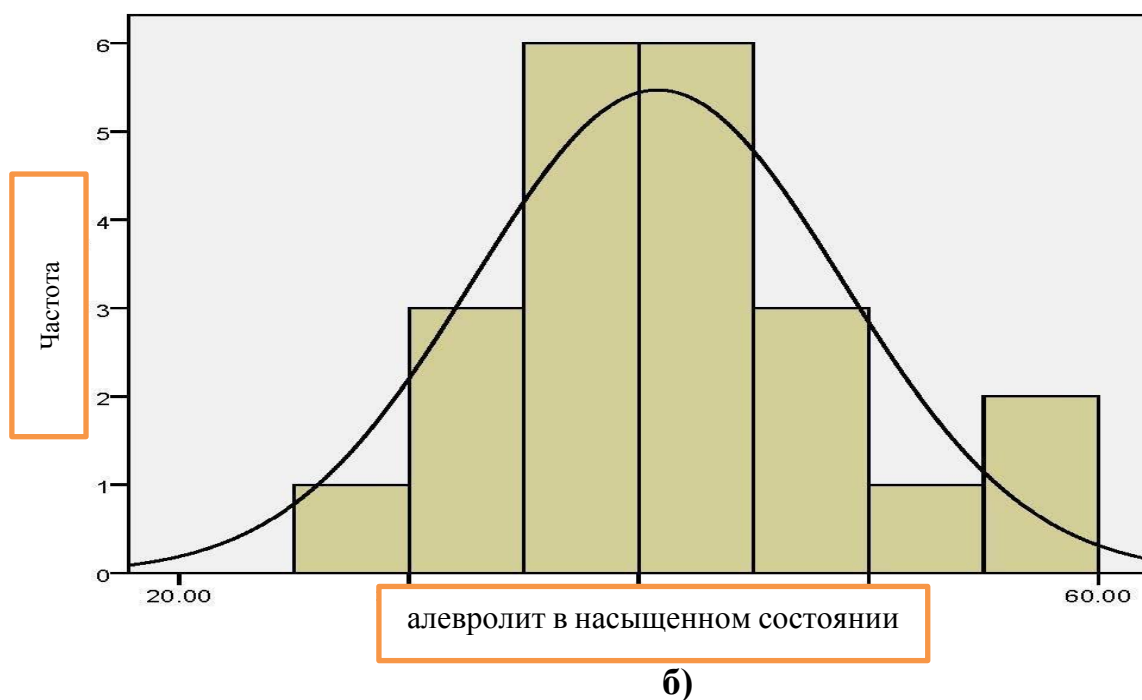
В технической записке AFRY, представленной в документе № PO/LOT 4/ER/DT/096 от 10.07.2019, были представлены результаты испытаний с молотком Шмидта для алевролитов нижнеобигармской свиты как в

естественном, так и в насыщенном состоянии. Результаты статистических расчетов, а также кривая нормального распределения показаны на гистограммах на рисунок 2.25. Согласно этой технической записке, эквивалентное значение UCS для алевролитов K1ob1 в насыщенном состоянии рекомендовано принять равным **30 МПа**. Такое же значение использовано в качестве расчетного параметра для UCS прослоев алевролитов верхнеобигармской свиты в насыщенном состоянии.

*Значение UCS для материалов заполнения трещин разлома F35*

Испытания с молотком Шмидта были выполнены для материалов заполнения трещин зоны Ионахшского разлома внутри туннеля СТ4 в естественном состоянии, а их результаты и эквивалентное значение UCS было использовано для зон Ионахшского разлома и разлома F35. Данные испытаний и детали расчетов испытаний с молотком Шмидта для материалов заполнения трещин в Ионахшском разломе представлены, а результаты обобщены в таблица 2.3. На рисунок 2.26. показана гистограмма эквивалентных значений UCS для глинки трения в зоне Ионахшского разлома в естественном состоянии.

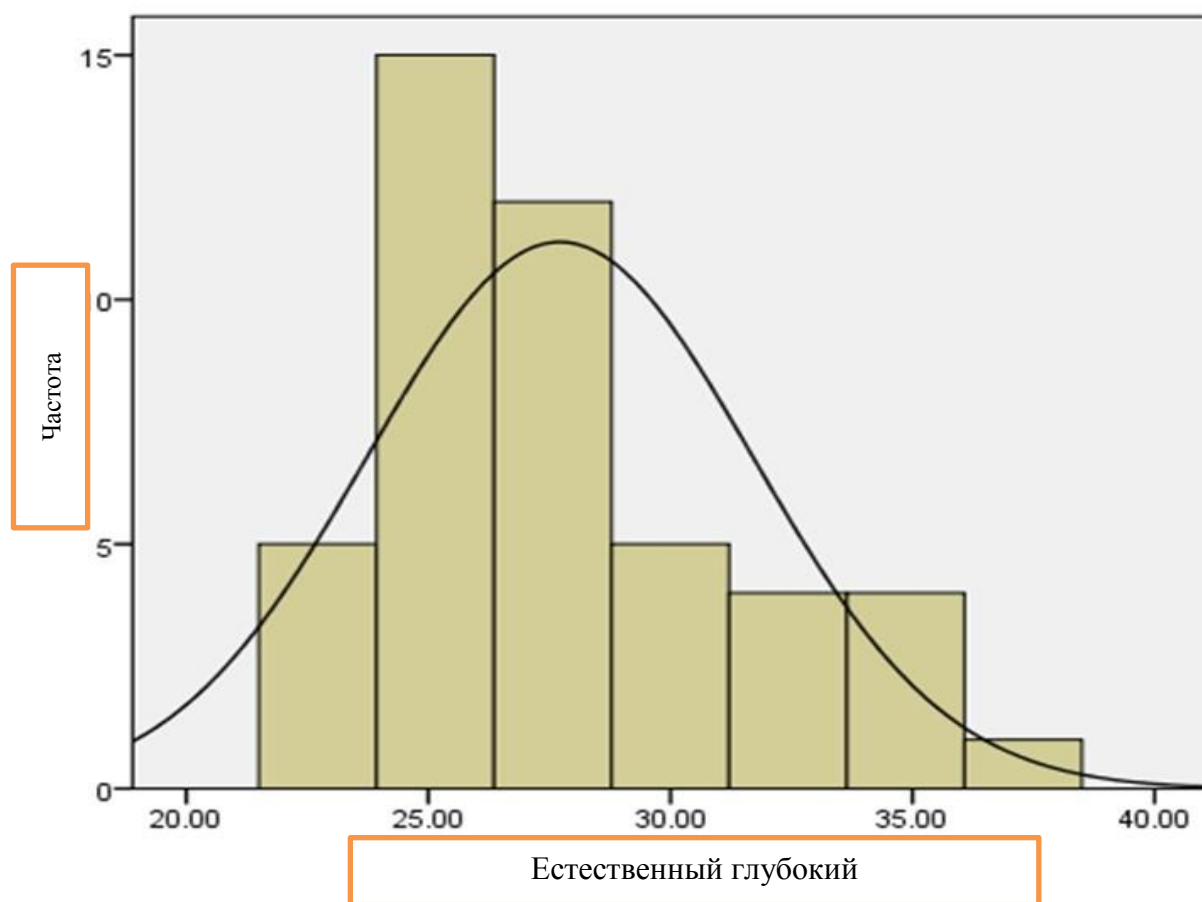




**Рисунок 2.25.** Гистограммы эквивалентных значений UCS алевролитов в свите K1ob1 и кривая нормального распределения: а) алевролит в естественном состоянии и б) алевролит в насыщенном состоянии

**Таблица 2.3.** Сводные результаты испытаний с молотком Шмидта для материалов заполнения трещин в зонах Ионахшского разлома и разлома F35 в естественном состоянии .

Статистический параметр	Материал заполнения трещин в зонах разлома в естественном состоянии
№	46
Минимум (МПа)	22
Максимум (МПа)	38
Среднее значение (МПа)	27.7
Медианное значение (МПа)	27
Стандартное отклонение (МПа)	4.0
Коэффициент вариации (%)	14.4
Среднее – стандартное отклонение (МПа)	23.7



**Рисунок 2.26.** Гистограммы эквивалентных значений UCS материала заполнения трещин в зоне разлома по кривой нормального распределения

### Взвешенные значения UCS и $m_i$ для формации K1ob2

На основании указанного процентного содержания горных пород различных типов [36] в каждой геологической формации по трассе безнапорных тоннелей, средневзвешенные значения UCS и  $m_i$  для имеющихся горных массивов были рассчитаны и представлены в 3.4, они же приняты в качестве расчетных параметров.

№	Геологическая единица	Литология	Процентное значение различных типов пород [36]				Взвешенное значение UCS (МПа)	Взвешенное значение $m_i$
			Песчаники K1mg, K1ob2 и k1kr	Песчаники – слегка выветрелые разгруженные	Алевролиты и аргиллиты	Глинка трения в разломе F35		
			UCS=91 МПа	UCS=70 МПа	UCS=30 МПа	UCS=15 МПа		
			$m_i = 17$	$m_i = 13$	$m_i = 7$	$m_i = 7$		
1	K1ob2	Песчаник с прослоями алевролита и аргиллита	88%		12%		84	16
2	K1ob2 (разрушенная зона разлома 35)	Выветрелый разгруженный песчаник с прослоями алевролита и аргиллита		88%	12%		65	12
3	Разлом 35	Жильная глина				100%	15	7
4	K1kr (разрушенная зона разлома 35)	Выветрелый разгруженный чередование песчаника, алевролита и аргиллита		69%	31%		58	11

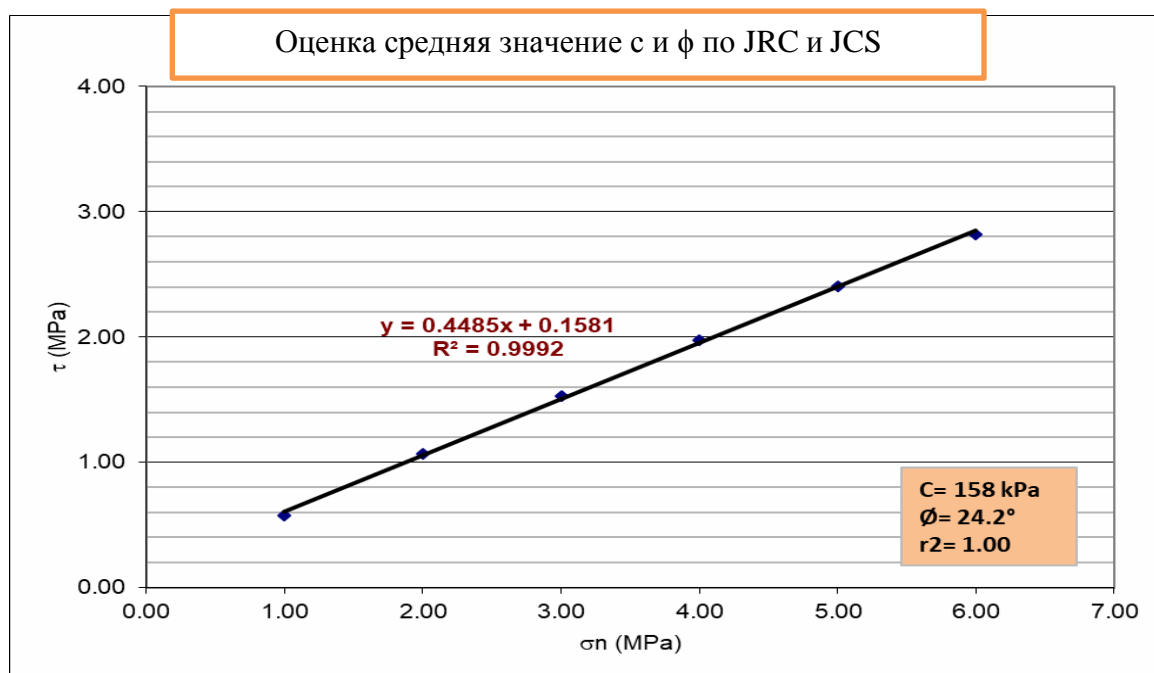


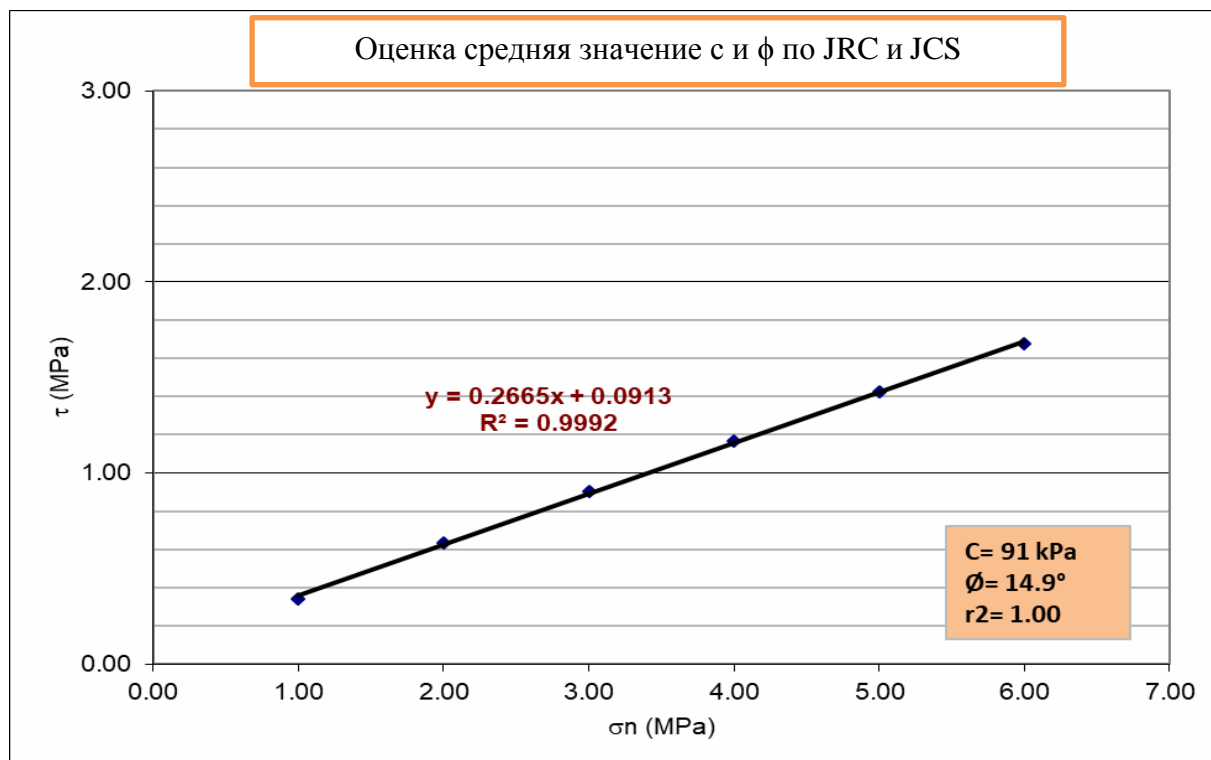
5	K1kr	Песчаник с прослоями алевролита и аргиллита	69%		31%		72	14
6	K1mg1	Песчаник с прослоями алевролита и аргиллита	80%		20%		79	15
7	K1mg1 и второстеп разломы	Выветрелый разгруженный песчаник с прослоями алевролита и аргиллита		80%	20%		62	12
8	K1mg2	Чередование песчаника, алевролита и аргиллита	45%		55%		57	12
9	K1mg2 и второстеп разломы	Выветрелый разгруженный чередование песчаника, алевролита и аргиллита		45%	55%		48	10
10	K1mg3	Песчаник с прослоями алевролита и аргиллита	87%		13%		83	16
11	K1mg3 и второстеп разломы	Выветрелый разгруженный песчаник с прослоями алевролита и аргиллита		87%	13%		65	12

## Параметры прочности на сдвиг для несплошностей

В данном разделе сначала даются пояснения по процедуре оценки параметров прочности несплошностей на сдвиг, которые используются в анализе устойчивости подземных клиньев в СТ-4, а затем представлены расчетные значения силы сцепления и угла трения несплошностей в различных горных массивах.

В ходе исследования трещин в различных литологических комплексах в подходных и транспортных туннелях на правом берегу и кернов недавно пробуренных скважин, которые пересекают разлом F35, фиксировались коэффициент шероховатости стенок трещин (JC) и прочность на сжатие стенок трещин (JCS). Согласно данным исследованиям, показатель JRC несплошностей, включая плоскости напластования и крупные трещины, в основном, находится в диапазоне между 4 и 8, со средним значением 6, а минимальные значения JCS равны 30 МПа, что равно значению UCS для самых слабых горных массивов (алевролиты). Для зон разломов были приняты значения  $JRC = 4$  и  $JCS = 15$  МПа (для материала заполнения трещин в зоне разлома № 35).





**Рисунок 2.27:** Линейная регрессия выбранных значений  $\sigma_n$  и рассчитанных значений  $\tau$  для несплошностей и разломов с использованием формулы Бартона (средние значения JRC и JCS)

С учетом критериев проектирования правобережных сооружений уровня 1 [37], к значениям сцепления и угла трения был применен частичный коэффициент, равный 1.25 для нормальных условий нагрузки, 1.10 для необычных условий нагрузки. Проектные параметры прочности на сдвиг для несплошностей и разломов по трассе безнапорных тоннелей приведены в таблица 2.5.

**Таблица 2.5.** Проектные значения сцепления и угла трения несплошностей с учетом частичного коэффициента

Тип	Средние значения сцепления и угла		Частичный коэффициент	Проектные значения сцепления и угла	
	c [МПа]	φ [град.]		c [МПа]	φ [град.]
Трещины и напластование	0.158	24.2	1.25	0.13	23
			1.10	0.14	22
Разломы	0.091	14.9	1.25	0.07	12
			1.10	0.08	14

## **Классификация горных массивов для оценки геомеханических параметров**

Основной целью применения систем классификации горных массивов является разбивка породных массивов, присутствующих в зоне безнапорных тоннелей по классам, с учетом их основных геотехнических характеристик. Кроме того, эти системы используются для того, чтобы рассчитать геотехнические параметры данных породных массивов, используя обширные базы данных классификационных систем. Соответственно, классификация горных массивов, залегающих вокруг безнапорных тоннелей, проводилась независимо по методикам определения показателя качества породного массива (Q), и индекса геологической прочности (GSI).

### **Качество горного массива (Q)**

Система определения качества горного массива (Q) была первоначально разработана Бартоном и другими (1974) [38], в основном, для цели прокладки тоннелей. Согласно данной классификационной системе, значения Q горных массивов, проходящих вдоль тоннелей, оцениваются по шести параметрам, после чего для каждого массива назначается необходимая система крепи.

### **Геомеханические параметры горных массивов**

#### *Критерии разрушения Хоека-Брауна*

С целью оценки параметров прочности и деформируемости горных массивов вдоль безнапорных тоннелей необходимо знать три качественных характеристики горных массивов, а именно: показатели GSI,  $m_i$  и прочность при одноосном сжатии (UCS) ненарушенных пород.

Обобщенный коэффициент критерия разрушения Хоека-Брауна[31] для трещиноватых горных массивов определяется следующим образом.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

где:  $\sigma_1$  – максимальное основное напряжение;  $\sigma_3$  – минимальное основное напряжение;  $\sigma_{ci}$  – прочность ненарушенной породы при одноосном сжатии;  $m_b$ ,  $s$

и  $a$ - константы критерия разрушения Хоека и Брауна, которые зависят от характеристики горного массива.

Для расчета геомеханических характеристик горных массивов использовалось программное обеспечение RocLab (RocScience).

Для расчета геомеханических параметров горных массивов использовались различные входные параметры, такие как взвешенные средние значения  $m_i$  и UCS породных материалов, а также значения GSI для определенных горных массивов в различных пикетах безнапорных тоннелей СТ-4. Кроме того, в расчет брался максимальный покрывающий пласт над этой частью тоннеля СТ-4. В Приложении А приводятся входные параметры, а также результаты расчетов геомеханических параметров, включая параметры прочности на сдвиг ( $C$  and  $\phi$ ) для ненарушенных горных массивов ( $D=0$ ) и для нарушенной буровзрывными работами зоны ( $D=0.5$ ) вокруг безнапорных тоннелей. Для расчета модуля деформации ( $E_m$ ) принималось в расчет ненарушенное состояние породы с тем, чтобы это значение было сопоставимым с аналогичным параметром, рассчитанным по методике Q.

Несмотря на то, что предлагался план проведения дополнительных геологических изысканий по правому и левому берегам, в течение последних двух лет никакие изыскания для измерения напряжения породы по месту в створе плотины Рогунской ГЭС производить не было возможности. В связи с этим использовались данные, имеющиеся в отчете ТЭО, которые, по всей вероятности, были составлены по результатам комплексного анализа предыдущих исследований и натурных измерений напряжения в створе плотины ГЭС. Совершенно очевидно, что после выполнения испытаний напряжения грунта по месту в рамках работ по проектированию, существующие исследования будут проверены и при необходимости откорректированы.



## **Выводы по главе 2.**

**1.** Определены основные геологические формации вдоль безнапорных тоннелей СТ-4: Мингбатманская, Каракузская и Верхнеобигармская.

**2.** Произведены данные геотехнические исследование, включая инженерно-геологических изысканий по неразрушенной породы и основные несплошности, также классификация горных пород и методы Q и GSI. На основании полученных результатов были оценены геотехнических параметров различных виды горных пород с использованием реальных значений GSI и критерия разрушения Ноек-Brown.

**3.** Произведена оценка параметров ненарушенной породы формаций, залегающих по трассе безнапорных тоннелей, с использованием результатов и заключения двух технических записок ЭЙФРИ испытанием молотком Шмидта и UCS для песчаников верхнеобигармской ( $K_{1ob2}$ ), каракузской ( $K_{1kr}$ ) и нижнемингбатманской ( $K_{1mg1}$ ) свит, а также алевролитов нижнеобигармской свиты ( $K_{1ob1}$ ).

**4.** По результатам геологических изысканий, выполненных для разлома F35, включая пробуренные скважины RGC-06 - RGC-09, что материалы заполнения трещин в разломе F35 являются очень слабыми, и их значения UCS должны быть намного меньше параметров, определенных для материалов заполнения трещин в Ионахшском разломе. В этой связи для UCS материалов заполнения трещин в разломе F35 принимается, “среднее из – 3-х стандартное отклонение”, т.е. степень достоверности составляет 99.7%.

## **Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СТ-4 РОГУНСКОЙ ГЭС**

### **3.1. Зависимость минимальной глубины заложения напорных необлицованных тоннелей**

В современной практике исследований и проектирования подземных напорных водоводов в скальных породах большая роль отводится деформативным свойствам пород, характеризующим полную упругую и пластическую деформацию под действием давления воды в водоводе. Эти свойства зависят от особенностей породы в реальных условиях залегания, отличающих её от идеально упругой среды, т.е. трещиноватости разнородности, аннизотропности, неравномерности величины и распределение естественных внутренних напряжений и др.

Деформативные свойства горных пород определяется модулем её деформации её естественном залегании, использование в расчетах модуля упругости  $E$ , деформаций массивных однородных плотных и прочных пород. Значение деформативных свойств позволяет достаточно близко подойти к оценке фактического распределения усилий от внутреннего давления воды между обделкой напорного водовода и окружающей породой, а это позволяет возможность принимать наиболее экономичные решения конструкции напорных водоводов, максимально используя несущую способность скалы.

Расчет обделок гидротехнических тоннелей всех типов (включая фасонные части скальных оболочек) на любые сочетания нагрузок производить с учетом отпора породы.

При заложении напорного тоннеля на глубине менее трёх его диаметров принимаемая величина отпора породы должны быть специально обосновано[2].

При расчете обделок напорных тоннелей на внутреннее давление с учетом величины отбора породы необходимо, чтобы принимаемая величина давления, передаваемого на породу не превышала веса толщины пород над тоннелем.

Необходимость учету отбора породы при несоблюдении этого условия, а также при расположении напорного тоннеля вблизи склона должна быть специально обосновано.

При определении минимальной необходимой толщи  $H$  скальных пород над необлицованным напорным тоннелем с внутренним давлением  $\rho$  часто принимают:

$$\gamma_c = H 2R = k_3 \cdot \rho \cdot 2R, \quad (3.1)$$

где:  $\gamma_c$  – объемный вес скалы, т/м<sup>3</sup>;  $R$  – радиус выработки;  $k_3$  – коэффициент запаса.

Отсюда предельно допустимое давление

$$\rho = \frac{\gamma_c}{k_3} \cdot H = \lambda H, \quad (3.2)$$

где:  $H$  – в м,  $\rho$  – в т/м<sup>3</sup>. при  $\gamma_c = 2.5$  т/м<sup>3</sup> и  $k_3 = 5$ ,  $\rho = \frac{1}{2} \cdot H$  и  $H = 2\rho$

На основании опытов, проведенных на строительстве плотины Олт-Ней-Леридж, было доказано, что весь скальный массив может быть приподнят только в том случае, если скалывающие напряжения превышают предельные не только в какой-либо точке, а повсеместно. Опыты также показали, что упругие деформации скалы оказываются превзойденными и мелкие трещины в скале начинают появляться задолго до полного нарушения массива [5].

$$\text{вертикальные} \quad \sigma_g = \gamma_c \cdot (H - x); \quad (3.3)$$

$$\text{горизонтальные} \quad \sigma_h = k \cdot \gamma_c \cdot (H - x),$$

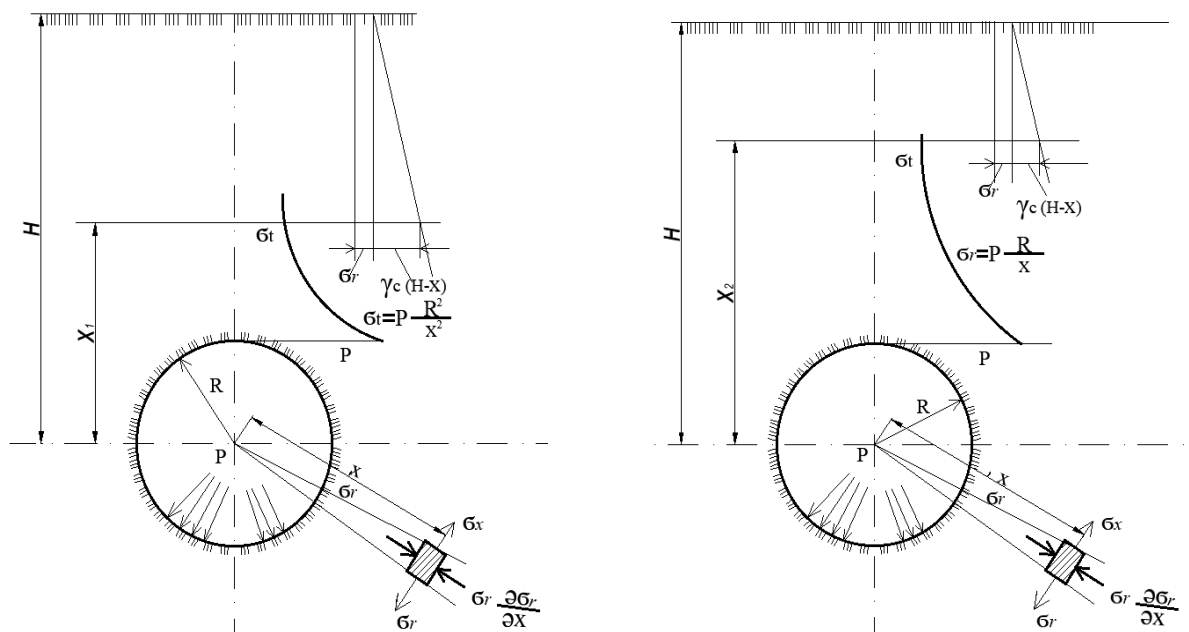
Растягивающие тангенциальные  $\sigma_t$  и сжимающие радиальные  $\sigma_r$  напряжения в скале на расстоянии  $x$  от центра напорного тоннеля, вызванные внутренним давлением воды в нем  $\rho$ , равны:

$$\sigma_t = -\sigma_r = \rho \cdot \left( \frac{R}{x} \right)^2 \quad (3.4)$$

Если на какой-то глубине  $(H - x_1)$  то  $\sigma_t \leq \sigma_h$ ,

$$\text{то есть} \quad \rho \left( \frac{R}{x_1} \right)^2 \leq k \gamma_c \cdot (H - x_1), \quad (3.5)$$

Сжимающие напряжения в массиве (рисунок 3.1) на глубине  $(H - x)$  равны:



**Рисунок 3.1.** Определение минимальной глубины заложения необлицованного тоннеля;  
а)- в прочной скале; б) – в трещиноватой скале

то в скале не появятся вертикальные трещины. Обозначим:

$$\frac{H}{x_1} = n; \quad \rho = \lambda \cdot H,$$

где:  $\lambda$  – искомый коэффициент.

$$\text{Тогда, очевидно,} \quad \lambda \leq \frac{H^2}{R^2} \cdot k \cdot \gamma_c \cdot \frac{n-1}{n^2}, \quad (3.6)$$

где все линейные размеры – в метр, а  $\gamma_c$  – в т/м<sup>3</sup>.

Если учесть допускаемое напряжение горной породы на растяжение  $\sigma_1$ , то формула (3.6) для  $\lambda$  получит вид:

$$\lambda \leq \frac{H^2}{R^2} \cdot k \cdot \gamma_c \cdot \frac{n-1}{n^3} + \frac{\sigma_1 \cdot H}{R^2 \cdot n^2}, \quad (3.7)$$

Для случая  $n=3$ ;  $x_1 = H/3$ ;  $\gamma_c = 2.5 \text{ т/м}^3$ ;  $k=0.7$ ;  $\sigma_1=0$  имеем:

$$\lambda \leq 0.13 \left( \frac{H^2}{R^2} \right).$$

**Таблица 3.1.** Для различных соотношений  $H/R$  имеем:

$H/R$	$\lambda$
5	3.2
10	13
20	52

В трещиноватой скале с радиальными трещинами напряжения уменьшаются пропорционально первой степени первой степени  $x$ .

В этом случае аналогично можно получить:

$$\lambda' \leq \frac{H}{R} \cdot k \cdot \gamma_c \cdot \frac{n-1}{n^2} + \frac{\sigma_1}{R \cdot n} \quad (3.8)$$

Определяем, на какой глубину, на которой прекращается влияние поверхность земли, на напорный тоннель, испытывающий внутреннее давление воды, т.е. начиная с какой глубины, выработку можно считать заглубленной [4].

В заглубленной выработке тангенциальные напряжения на контуре сечения находим согласно формуле.

$$\sigma_{\theta m} = -\left[ \rho_{o(0)} - (\rho_{o(0)} - 2q_{2(0)}) \cdot \cos 2\theta \right], \quad (3.9)$$

составляет  $\sigma_{\theta} = -\rho_o$ .

В незаглубленной выработке максимальные тангенциальные напряжения на контуре сечения определяется по формуле.

$$\sigma_{\theta t} = -\rho_o \cdot \frac{\bar{H}^2 + 1}{\bar{H}^2 - 1} \quad (3.10)$$

Зададимся допустимой погрешностью в определении напряжений  $\Delta$ , тогда

$$\Delta = \left| \frac{\sigma_{\theta t} - \sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}} \right| \quad (3.11)$$

Подставив в эту формулу выражения для  $\sigma_{\theta} = -\rho_o$  и  $\sigma_{\theta t} = -\rho_o \cdot \frac{\bar{H}^2 + 1}{\bar{H}^2 - 1}$ , получим

$$\Delta = \frac{\bar{H}^2 + 1}{\bar{H}^2 - 1} - 1$$

$$\text{Отсюда} \quad \bar{H} = \sqrt{\frac{2 - \Delta}{\Delta}} \quad (3.12)$$

При допустимой погрешности  $\Delta = 10\% = 0.1$  получаем

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{2 - 0.1}{0.1}} = 4.4$$



т. е. при глубине заложения тоннеля  $H > 4.4$  м он может рассматриваться как заглубленный. Также можно определить растягивающие напряжения на земной поверхности над напорным тоннелем при глубине заложения  $H > 4.4 \cdot r_0$ .

Подставляя значение  $H > 4.4 \cdot r_0$  в формулу  $[\sigma_{y \max}] = \frac{4\rho_o}{\bar{H}^2 - 1}$ , получаем

$$\sigma_{y \max} = \frac{4}{4.4^2 - 1} \cdot \rho_o = 0.22 \rho_o \quad (3.14)$$

Определяем влияние земной поверхности на напорный тоннель по критерию перемещений контура сечения тоннеля, когда при какой глубине тоннель можно считать заглубленным.

Примем допустимую погрешность в определении перемещений  $\Delta$ . Поскольку заглубленный тоннель отличается от незаглубленного наличием вертикальных составляющих перемещений, определяемых формулой (3.11) из [4],

$$\text{где } \bar{U}_x = 2U_\theta \frac{1-\nu}{\bar{H} - \cos \theta},$$

На основании изложенного имеем следующие условие:

$$U_{x \max} / U_0 = \Delta \quad (3.15)$$

Подставляя выражение 3.11 из [4] при  $\theta = 0$ , получаем  $2 \frac{1-\nu}{\Delta} = \Delta$ .

$$\text{Откуда} \quad \bar{H} = 2 \frac{1-\nu}{\Delta} \quad (3.16)$$

При  $\Delta = 0.1$ ;  $\nu = 0.4$  получаем  $\bar{H} = 12$ , т. е.  $H = 12r_0$ .

Таким образом, по критерию перемещений граница влияния земной поверхности находится значительно глубже, чем по напряжениям.

Отсюда можно сделать вывод, что при рассмотрении тоннеля с облицовкой в расчет напряжений в скале следует вместо внутреннего давления воды  $\rho$  вводить давление, передаваемое облицовкой на скалу.

Поскольку величина  $\lambda$ , а следовательно и минимальная глубина заложения тоннеля в большой степени зависят от допускаемого напряжения на расстояние  $\sigma_1$  в скальном массиве, необходима консолидация скалы путем её цементации.

Глубина заложения напорных необлицованных тоннелей и напорных тоннелей с бетонной неармированной обделкой в массивных прочных и практически водонепроницаемых скальных породах должна быть не меньше половины величины внутреннего напора воды в метрах.

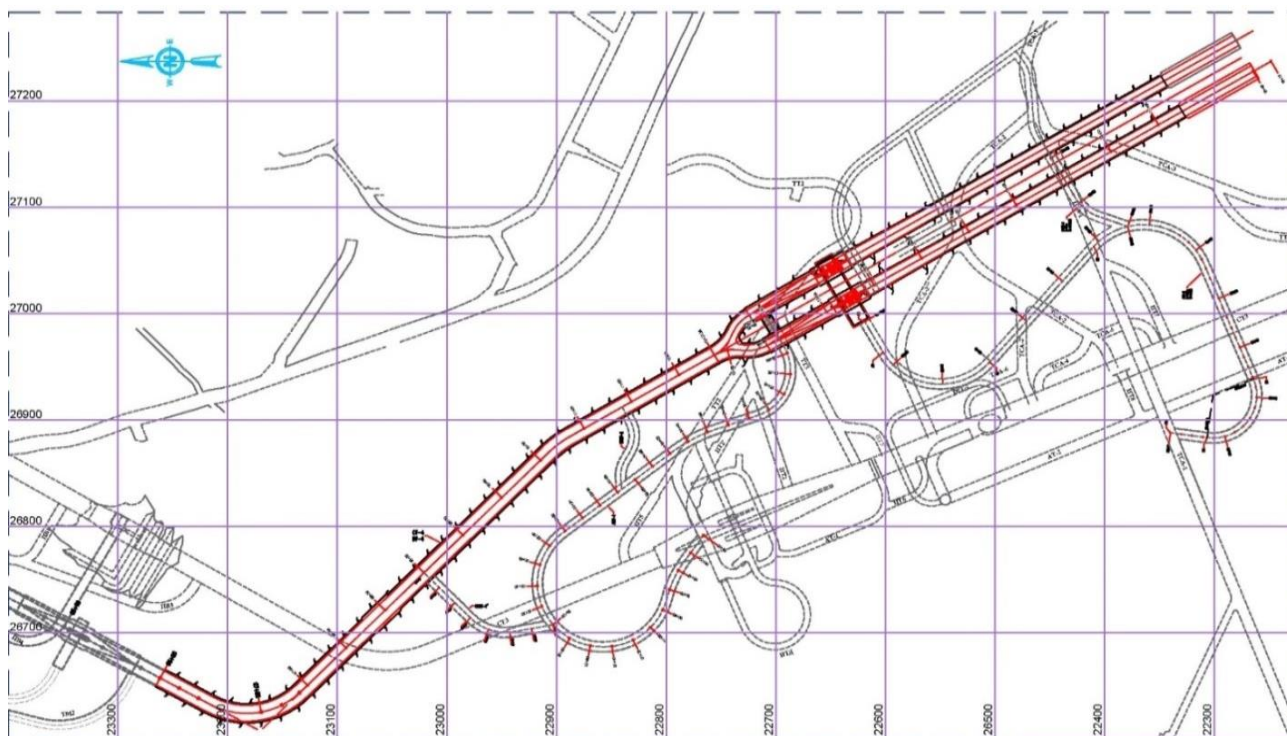
### **3.2. Выбор конструктивной обделки и цементационные работы строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС**

Строительный тоннель СТ-4 по протяженности составляет 1760м. Отметка лотка на входном портале 1090,00м, на выходном портале около 1055,00м. Пропускная способность строительного тоннеля при максимальном напоре составляет 3500м<sup>3</sup>/сек. В напорной части сечение тоннеля круглое с диаметром 15,0м с длиной до участка разветвления тоннеля, также начинается с ПК12+37,30 на точке Т-20. Следует отметить, что безнапорная часть тоннеля из двух ветвей с подковообразным поперечным сечением, берет начало после камеры затворов и в дальнейшем, при поднятии уровня ВБ (верхнего бьефа) используется для подключения ТВВУ-1 (НЛО-1) через шахты, который обеспечивает на период постоянной эксплуатации Рогунского гидроузла (рисунке 3.2).

В период строительства строительного тоннеля СТ-4 используются все подъездные пути, ведущие к входному и выходному порталам сооружения, а также транспортные тоннели близлежащие к отвалам и производственным площадям. При перевозке грузов будут максимально использованы специализированные виды автотранспорте. Автохозяйство на стройплощадке является общим для всего строительства гидроэнергетического узла. В автохозяйстве предусматривается техническое обслуживание и текущий ремонт транспортных средств [43-45].

В период строительства строительного тоннеля СТ-4 используются все подъездные пути, ведущие к входному и выходному порталам сооружения, а также транспортные тоннели близлежащие к отвалам и производственным площадям. При перевозке грузов будут максимально использованы специализированные виды автотранспорте. Автохозяйство на стройплощадке является общим для всего строительства гидроэнергетического узла. В

автохозяйстве предусматривается техническое обслуживание и текущий ремонт транспортных средств.

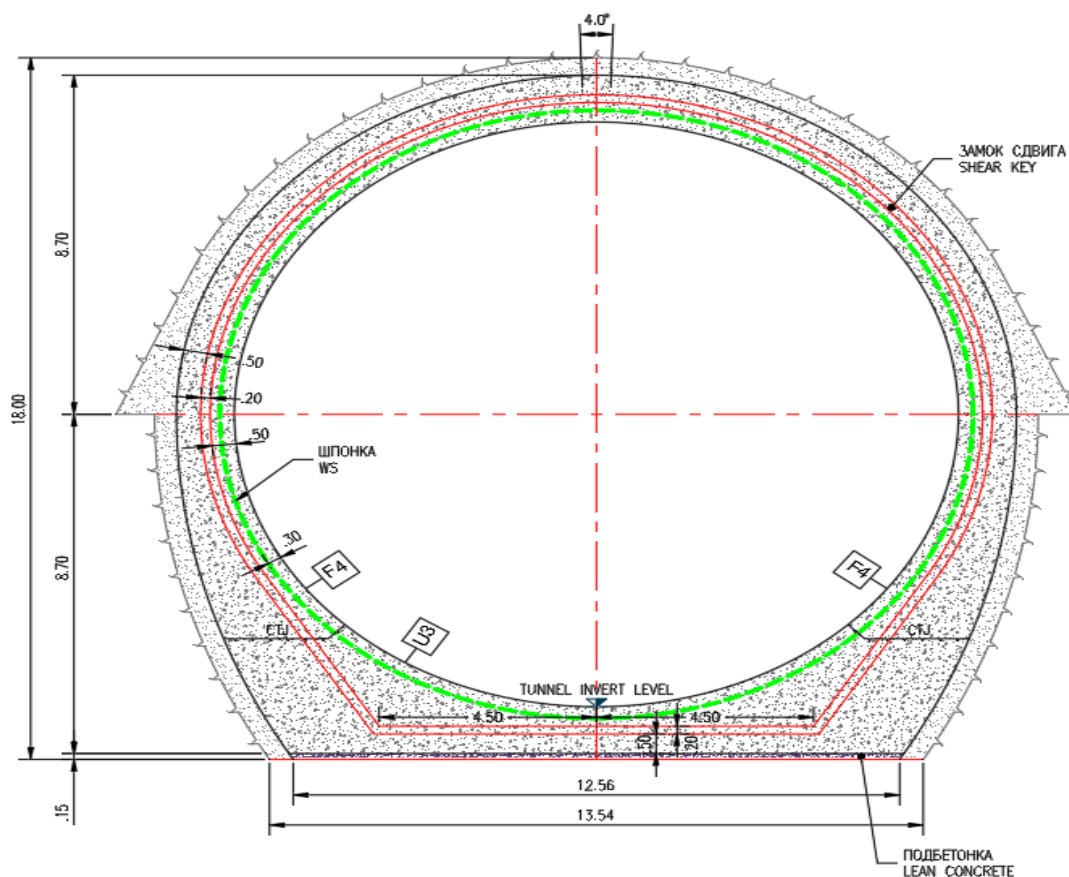


**Рисунок 3.2.** План строительного тоннеля СТ-4

Конструкции монолитных и железобетонных обделок тоннеля, материалы для конструкций обделок, формы поперечных сечений тоннеля приведены в проектной документации (рисунке 3.3).

Монолитная железобетонная обделка тоннеля сооружается отдельными участками с применением тоннельной инвентарной передвижной опалубки и комплекса механизмов и оборудования (бетононасосы, механические перестановщики опалубки, краны). Длина участка бетонирования должно устанавливаться проектной документацией.

Металлической опалубки по конструкции выбирается в зависимости от размеров поперечного сечения, пролетов выработки, очередности бетонирования по сечению, длины тоннеля, последовательности бетонных и проходческих работ, продолжительности выдержки бетона в опалубке с учетом необходимости тридцатикратной оборачиваемости.



**Рисунок 3.3. Конструкция напорная часть туннеля СТ-4**

Бетонирование монолитной обделки туннелей, сооружаемых горным способом производится по частям, с соблюдением следующих требований:

- укладка бетона в свод должна вестись одновременно с двух сторон, от пят к замку и при этом замок должен бетонироваться вдоль шельги свода;
- бетонирование стен должно вестись горизонтальными слоями;
- при подведении стен под готовый свод перед окончанием бетонирования стен в месте примыкания их к пяте свода следует оставлять пространство на величину до 400 мм, заполняемое тщательно уплотняемой жесткой бетонной смесью, в которую закладываются трубки для последующего нагнетания цементного раствора.

При возведении монолитных обделок на полное сечение бетонирование должно осуществляться от подошвы выработки к замку свода с перестановкой бетоновода по высоте через каждые 2 м. Замок следует бетонировать вдоль шельги свода сразу на два участка опалубки.

Бетонирование конструктивных элементов обделки туннеля производится без перерывов укладки бетонной смеси. Исключение составляют перерывы

необходимые перерывов, устраиваемых для осадки бетонной смеси и не требующие выполнения рабочих швов. В случае вынужденного перерыва, необходимые для бетонирования свода, следует придавать плоскости шва радиальное, а при бетонировании стен - горизонтальное направление.

Технологический комплекс для возведения монолитных бетонных и железобетонных обделок, включает (рисунки 3.4.-3.6):

- бетоноукладчики с загрузочными приспособлениями и механизмами;
- транспортные средства для доставки бетонной смеси от бетонных заводов;
- опалубки с механизмами перестановки;
- вибраторы для уплотнения бетонной смеси;
- бетоноводы.

Оборудование и механизмы должны быть увязаны с расчетом обеспечения максимальной их производительности в едином комплексе, а также непрерывности ведения бетонирования в каждом цикле. В качестве бетоноукладочных механизмов в туннеле применяется бетононасос.

Бетонная смесь после укладки каждого слоя толщиной 30-50см уплотняется вибраторами.

Интенсивность бетонирования должна быть такой, чтобы нижележащий слой при его перекрытии следующим, сохранял способность разжижаться при вибрировании.

Во время перерыве в бетонировании укладка бетонной смеси на ранее уложенный бетон допускается при достижении им прочности не менее  $15 \text{ кг/см}^2$ .

#### *Работы по заполнительной и укрепительной цементации*

Цемент должен иметь минимальную удельную поверхность  $3500 \text{ см}^2$  на грамм, как определено по методу воздухопроницаемости по Блейну (ASTM C 204). Никаких частиц цемента не должно оставаться на сите 0.08 мм (100% пропускаемость) и не менее 98% любого образца должно проходить через сито 0.04 мм.



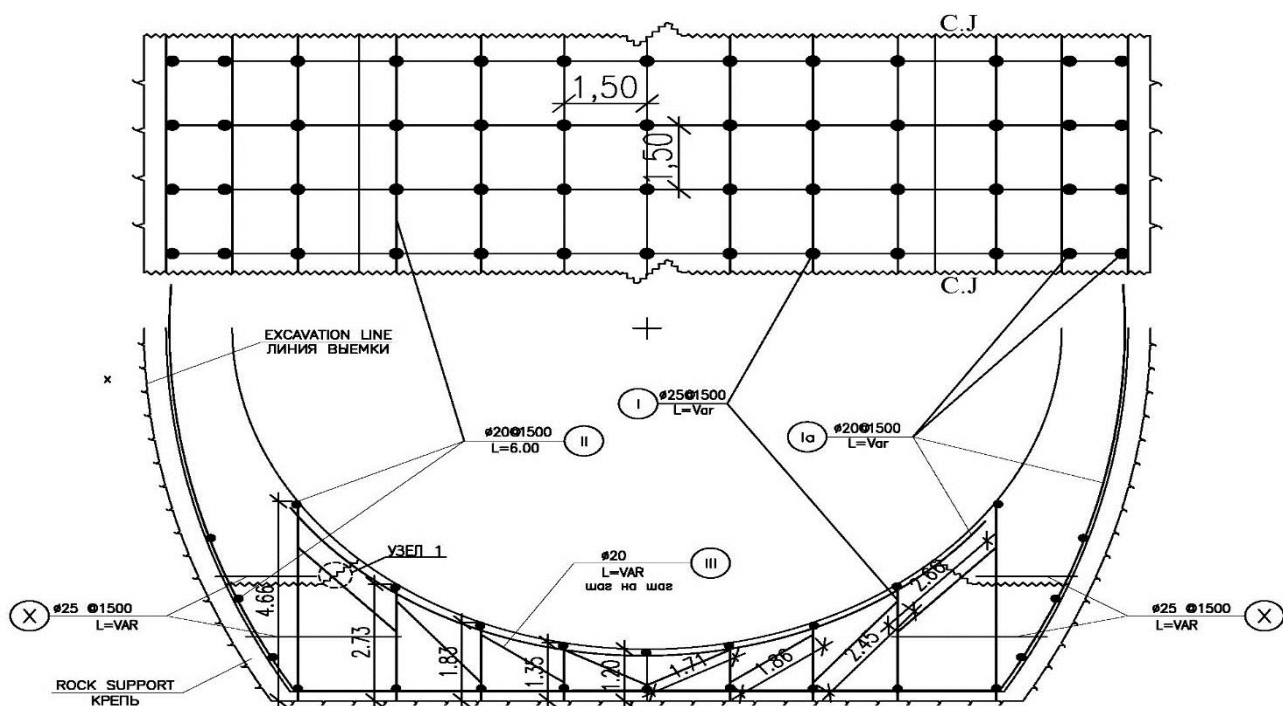


Рисунок 3.4. Схема расположение монтажной арматуры

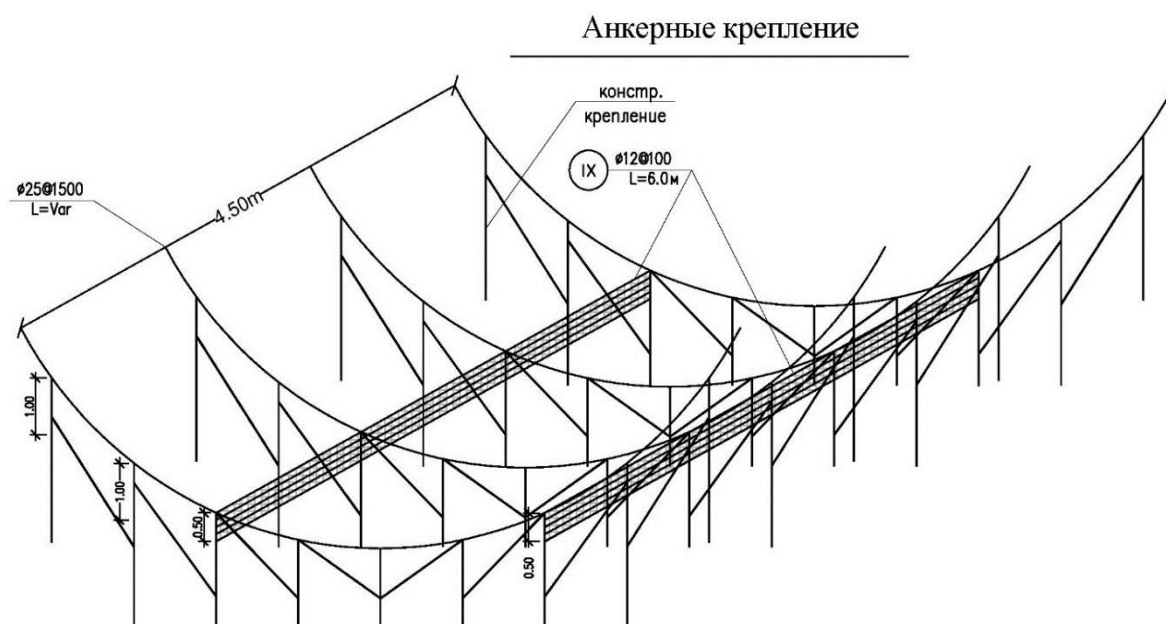
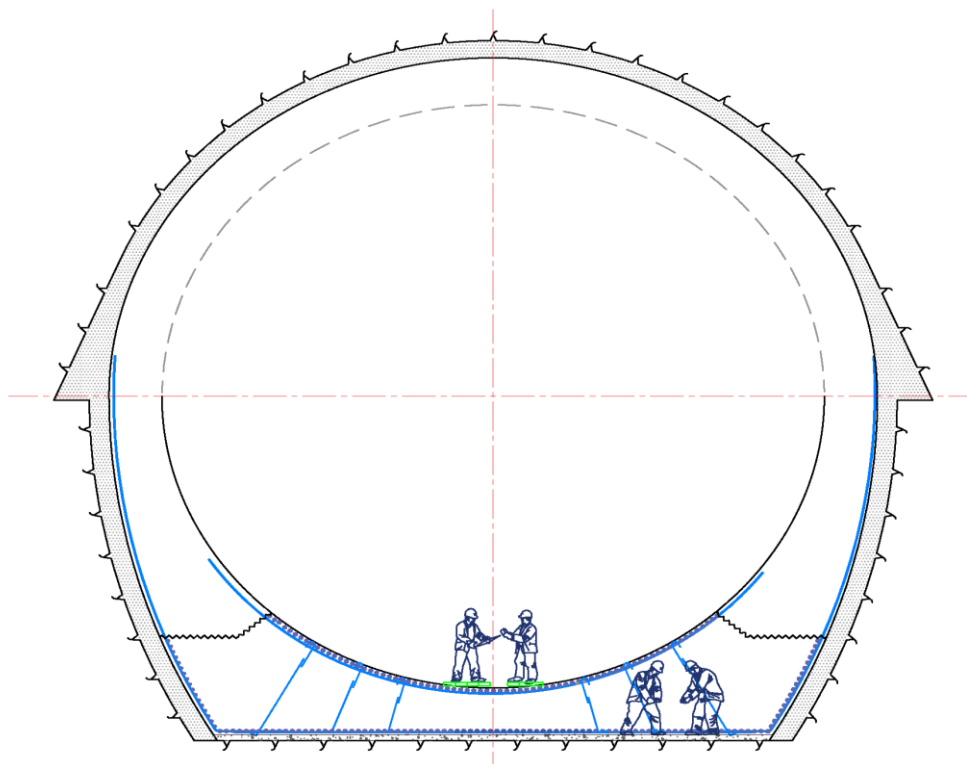


Рисунок 3.5. Анкерные крепление СТ-4 Рогунской ГЭС

### Работы по дополнительной и укрепительной цементации

Цемент должен иметь минимальную удельную поверхность  $3500 \text{ см}^2$  на грамм, как определено по методу воздухопроницаемости по Блейну (ASTM C 204). Никаких частиц цемента не должно оставаться на сите  $0.08 \text{ мм}$  (100%

пропускаемость) и не менее 98% любого образца должно проходить через сито 0.04 мм.



**Рисунок 3.6.** Армирование тоннеля

Цемент должен быть устойчивым к кислой воде.

Заполнительная цементация является обязательной в тоннелях при всех видах обделок, кроме набрызг-бетонных, в любых условиях залегания пород.

Общим требованием к заполнительной цементации является необходимость заполнения зазоров и пустот между обделкой сооружения и грунтом, между слоями многослойных обделок (например, между обделкой и временной крепью, сооружаемой в процессе проходки тоннеля) с целью обеспечения совместной работы обделки и грунта, недопущения осадок подземных и надземных сооружений и просадок поверхности грунта.

Заполнительная цементация выполняется в два этапа: сначала выполняется первичное нагнетание стабильных растворов через скважины(отверстия) рядов первой очереди, затем контрольное (повторное) нагнетание через скважины рядов второй очереди расположенных между рядами скважин первой очереди с целью ликвидации оставшихся пустот и усадочных трещин в затвердевшем

растворе первичного нагнетания.

Материал заполнительной цементации для первичного нагнетания за сводовую часть сооружения должен отвечать следующим требованиям:

а) марка материала по прочности на сжатие для напорных тоннелей должна быть не менее удвоенной величины расчетного внутреннего давления (в МПа) воды в тоннеле и не менее 32,5;

б) марка материала по прочности на сжатие для безнапорных сооружений должна быть не менее VI;

в) модуль упругости материала для напорных тоннелей с несущей обделкой и внутренним расчетным давлением воды в тоннеле свыше I МПа должен быть, как правило, равен величине модуля деформации грунтов, принятой в расчете обделки.

г) раствор, закачиваемый за монолитную обделку, должен схватываться до начала передвижки проходческого комплекса. В проектах необходимо предусматривать выполнение первичного нагнетания непосредственно за сооружением обделки при достижении бетоном 75% проектной прочности. Для монолитных обделок отставание по длине сооружения допускается не более 60 м.

Заполнительная цементация выполняется с помощью цементационного агрегата марки PNT 80.50.30 или марки ZBYSB (рисунки 3.7.-3.10).



**Рисунок 3.7.** Цементационный агрегат марки PNT 80.50.30

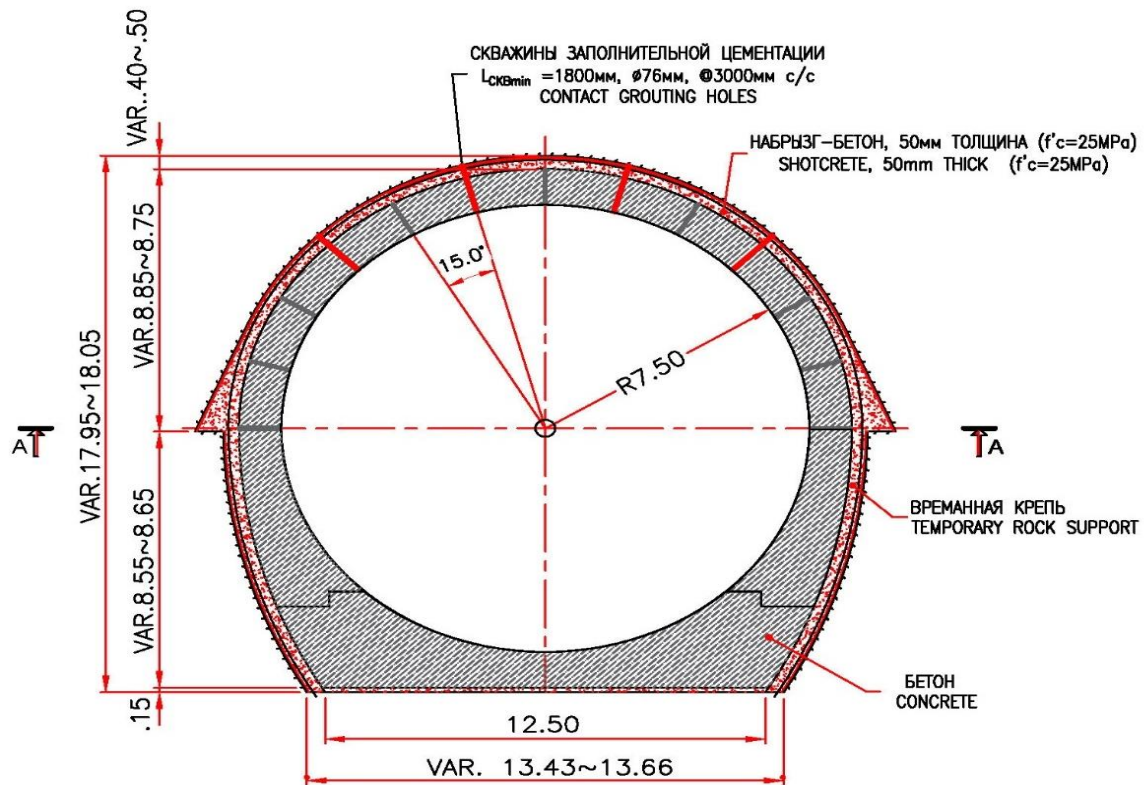
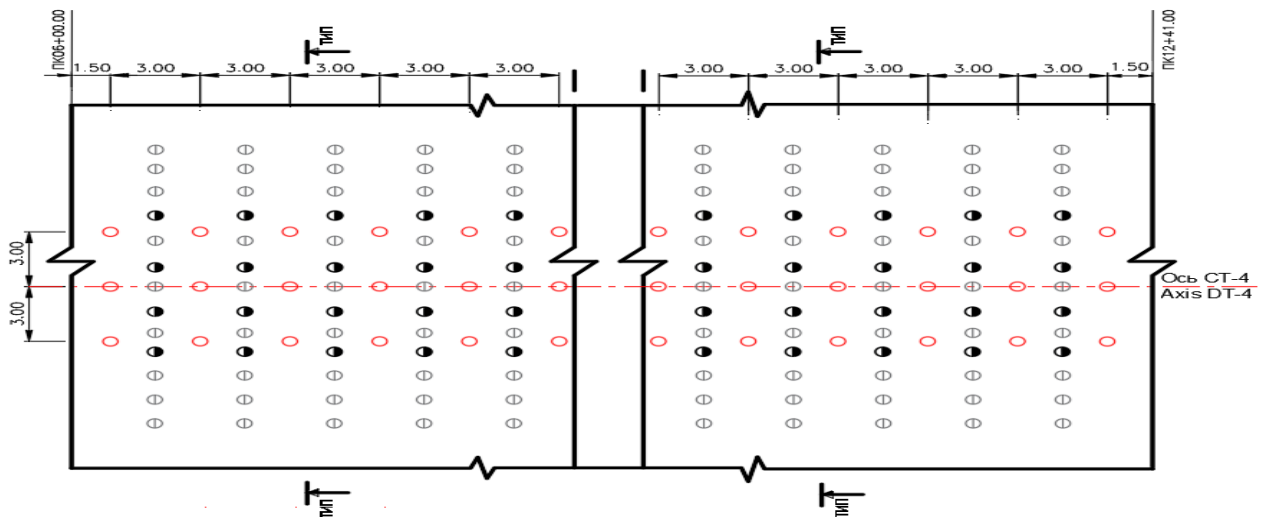


Рисунок 3.8. Типовое сечение заполнительной цементации тоннеля СТ-4



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ/LEGEND:

- ⊖ РЯДЫ КОНДУКТОРОВ ДЛЯ УКРЕПИТЕЛЬНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ/  
CONDUCTOR ROWS OF CONSOLIDATION GROUTING.
- РЯДЫ СКВАЖИН ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ (ДЛЯ ПЕРВИЧНОГО НАГНЕТАНИЯ)  
ROWS OF WELLS FIRST ORDER (FOR PRIMARY INJECTION)
- РЯДЫ СКВАЖИН ВТОРОЙ ОЧЕРЕДИ (ДЛЯ КОНТРОЛЬНОГО НАГНЕТАНИЯ)  
ROWS OF WELLS OF THE SECOND LINE (FOR CONTROL INJECTION)

Рисунок 3.9. Расположение скважин для заполнительной цементации

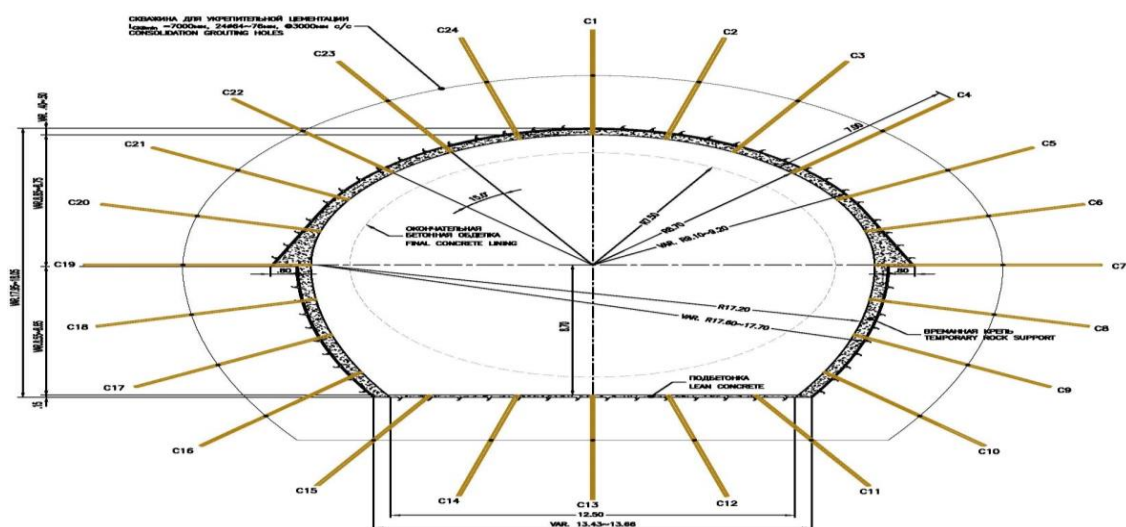
## Укрепительная цементация

В гидротехнических тоннелях укрепительная цементация грунтов должна производиться после окончания работ по заполнительной цементации.

Укрепительную цементацию скальных грунтов вокруг обделок подземных сооружений следует предусматривать с целью улучшения деформативных и противofiltrационных свойств грунтов при технической возможности ее осуществления и экономической эффективности [46,47]

В проекте необходимо учитывать положительное влияние укрепительной цементации на обделку сооружения вследствие: увеличения модуля деформации грунтов; уменьшения проницаемости грунта и утечек из туннеля или притока воды в безнапорное сооружение; уменьшения деформативной и фильтрационной неоднородности и анизотропии грунтов; увеличения устойчивости грунтов против химической и механической суффозии; создания предварительного напряжения в обделке и грунте; ослабление воздействия на обделку агрессивных грунтовых вод. Цементационные работы должны быть закончены до устройства дренажа основания сооружения или должны проводиться мероприятия, учитывающие возможность засорения дренажа цементационными растворами.

Размещение и последовательность опробования контрольных геофизических скважин, методы опробования и необходимые ресурсы для проведения контроля должны быть определены проектом (рисунке 3.10).



**Рисунок 3.10.** Расположение скважин для укрепительной цементации



Цементационные работы по укрепительной цементации следует считать достаточными, если в результате контрольных работ установлено соответствие физико-механических свойств зацементированных, грунтов проектным требованиям.

### **3.3. Геотехнический мониторинг контрольной измерительной аппаратурой для СТ-4 Рогунской ГЭС**

В Республики Таджикистан сегодня возведение строительство гидроэлектростанции Рогун является одним из уникальным и основным проектами. Строительства гидроэлектростанции в нашей республике сегодня имеет важные и основные направления, которые способствуют экономическому и социальному развитию республики. На ряду с этим, особую актуальность приобретают проблемы проектирования и строительства подземных сооружений, в частности, водоотводных, водосбросных и гидротехнических тоннелей, которые в свою очередь служат основными частями гидроэлектростанции в высокогорных условиях[43,48].

Строительный тоннель СТ-4 Рогунской ГЭС является водосбросным тоннелем среднего уровня. Его эксплуатация предусмотрена между отметками водохранилища 1100 м.н.у.м. и 1215 м.н.у.м., т.е. до ввода в эксплуатацию водосбросов высокого уровня (ВТВУ №1 и ВТВУ №2).

Строительный тоннель СТ-4 расположен на правом берегу и имеет длину 1716 м. В объем работ по контракту ЛОТ-3 входит часть тоннеля между пикетами 06+00 и 17+16. В данной статье описаны контрольно-измерительные аппаратуры для геотехнического мониторинга, которые будут установлены в СТ-4 в рамках контракта ЛОТ-3.

Меры контроля, определенные в ходе оценки рисков должны, как минимум, соответствовать всем требованиям ТБ и ОС ТГЭМ, так как они определены в настоящем ППР, оценка рисков в области ТБ и ОС и анализе воздействия на окружающую среду, а также в соответствующих разделах руководства ТБ и ОС ТГЭМ. Меры по контролю выявленных рисков должны быть приоритетными в соответствии со следующей иерархией контроля:



-устранение; например, устранение риска падения с высоты путем работы на уровне земли.

-замена; например, замена опасного химического вещества на менее опасное;

-инженерный контроль; например, вентиляция замкнутого пространства или установка барьеров вокруг вращающегося оборудования, при этом приоритет отдается мерам, обеспечивающим коллективную защиту, а не индивидуальную.

-административный контроль; например, выдача наряда-допуска или размещения знаков безопасности. Оценка риска должна определить соответствующий уровень контроля, необходимый для выполнения работ.

-использование средствами индивидуальной защиты (СИЗ); например, защита органов слуха при выполнении шумных работ.

Все лица, задействованные в работах, должны пройти обучение и вводный инструктаж в зависимости от своих конкретных обязанностей. Назначенный Мастер или Инженер ТБ (либо сотрудник, ответственный за охрану труда) должны проводить посменный вводный инструктаж в целях проведения оценки риска на стройплощадке перед началом каждой смены.

В ходе выполнения работ будет разработан и соблюдаться особый контроль. Планируемое наблюдение за ходом работ должно проводиться по необходимости или по указанию. Невзирая на вышесказанное, каждый сотрудник, находясь на стройплощадке должен:

-пройти соответствующую подготовку и обучение для выполнения конкретной работы;

-быть обеспеченным всеми средствами индивидуальной защиты (СИЗ), которые определены в оценке рисков при выполнении работы как необходимые для выполнения самой работы;

-принимать меры по охране своего здоровья и безопасности;

-проявлять осторожность для защиты здоровья и безопасности других лиц, на которых может повлиять любое действие или бездействие данного работника.

Каждый оператор машины или станка может быть принят на работу только в том случае, если:

-он или она уже является обладателем профессионального сертификата, действительного для должности оператора, на которую он или она претендует;

-на основании предыдущего опыта работы, при отсутствии специальной сертификации, его/ее квалификация была оценена компетентным органом по поручению Подрядчика, который должен выдать действительный профессиональный сертификат.

Перед началом любой деятельности каждый оператор машины или станка должен:

- осмотреть состояние машины или станка;
- заполнить соответствующий контрольный список.

Система мониторинга строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС включает в себя 9 измерительных створов - участки с контрольно-измерительной аппаратурой (рисунки 3.11).

Створ КИА №1 (ПК 06+70.00); Створ КИА №2 (ПК 08+40.00); Створ КИА №3 (ПК 12+60.00); Створ КИА №4 (ПК 13+40.00); Створ КИА №5 (ПК 13+65.00); Створ КИА №6 (ПК 13+80.00); Створ КИА №7 (ПК 14+20.00); Створ КИА №8 (ПК 14+35.00); Створ КИА №9 (ПК 17+00.00);

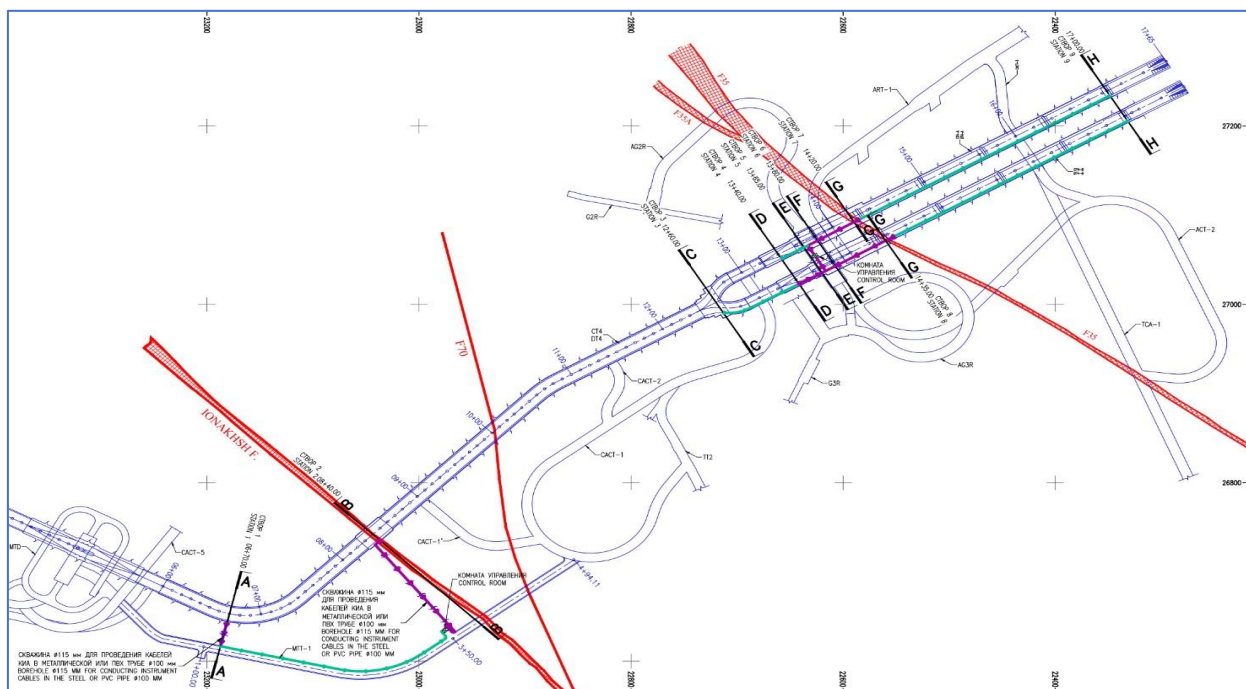


Рисунок 3.11. План строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС

Строительный тоннель СТ-4 Рогунской ГЭС будет оснащен геотехническим КИА, приведенными ниже:

24 шт. DT4-XX-MP-XX – Многоточечный скважинный экстензометр;

40 шт. DT4-XX-PZ-XX – Пьезометры;

4 шт. DT4-XX-LS-XX – Водомерная рейка;

4 шт. DT4-XX-VC-XX – Видео-камера.

Систему мониторинга ЛОТ-3 можно разделить на 5 основных областей (см. рисунки 3.14.и 3.15):

1.Мониторинг Атипичной Зоны.

2.Мониторинг гидравлических сооружений (водосбросных сооружений).

3.Мониторинг склонов на всей территории ЛОТ-3 (естественных и раскопанных склонов).

4.Мониторинг цементной завесы и дренажной завесы (и соответствующих цементных галерей).

5.Мониторинг других сооружений.

Система мониторинга СТ-4 является частью системы мониторинга гидравлических сооружений.

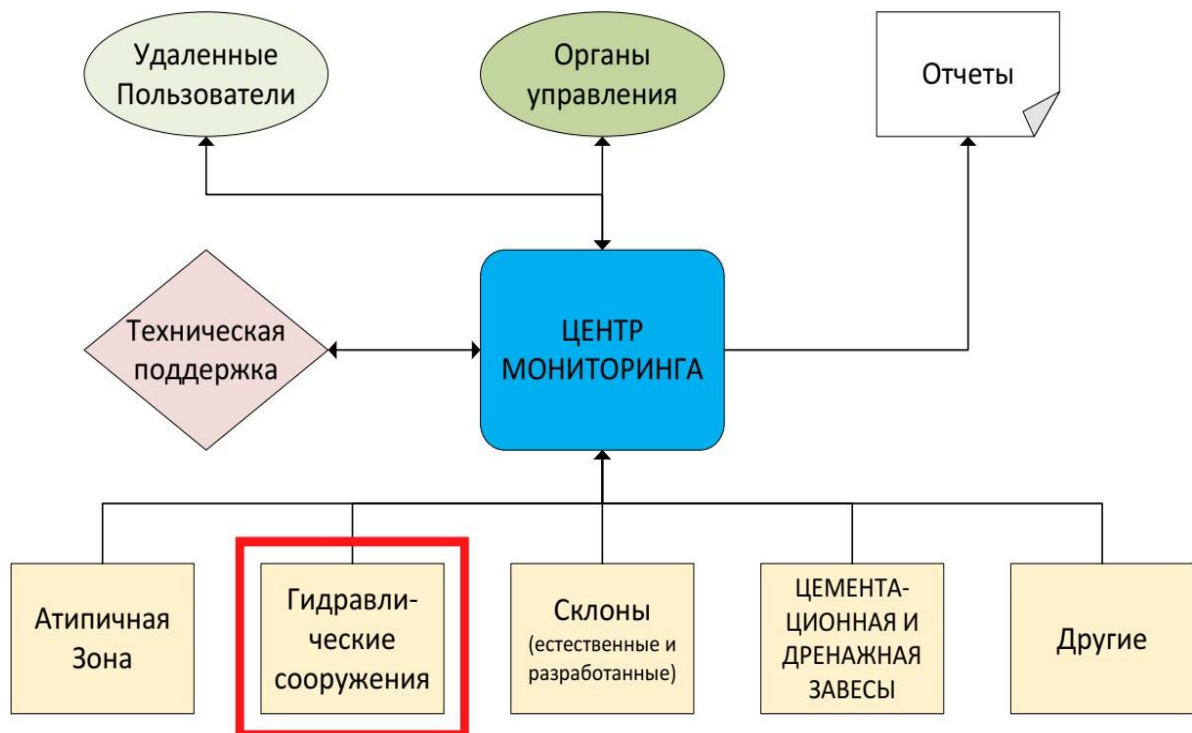


Рисунок 3.12. Архитектура системы мониторинга ЛОТ-3

Схема системы геотехнического мониторинга СТ-4 должны включать следующие элементы:

- геотехническая КИА;
- локальная сеть связи по кабелям;
- местные, считывающие и коммутационный коробки;
- система сбора данных;
- сеть удаленной связи.

Данная система должна работать в "автономном режиме" до момента появления сети удаленной связи, после чего она будет подключены к Центральному процессору через сеть удаленной связи.

Связь между КИА и системой сбора данных осуществляется с помощью электрических кабелей. Соединения между одножильными и многожильными кабелями осуществляются с помощью соединительных коробок.

Системы сбора данных, обозначенные как «Комната управления» ниже, должны быть установлены в помещении затворов СТ-4 и в подходной галерее МТТ-1, как указано на рисунках ниже и должны быть запрограммированы на сбор и хранение данных. Снятие данных будет осуществляться вручную или автоматически при наличии сети удаленной связи.

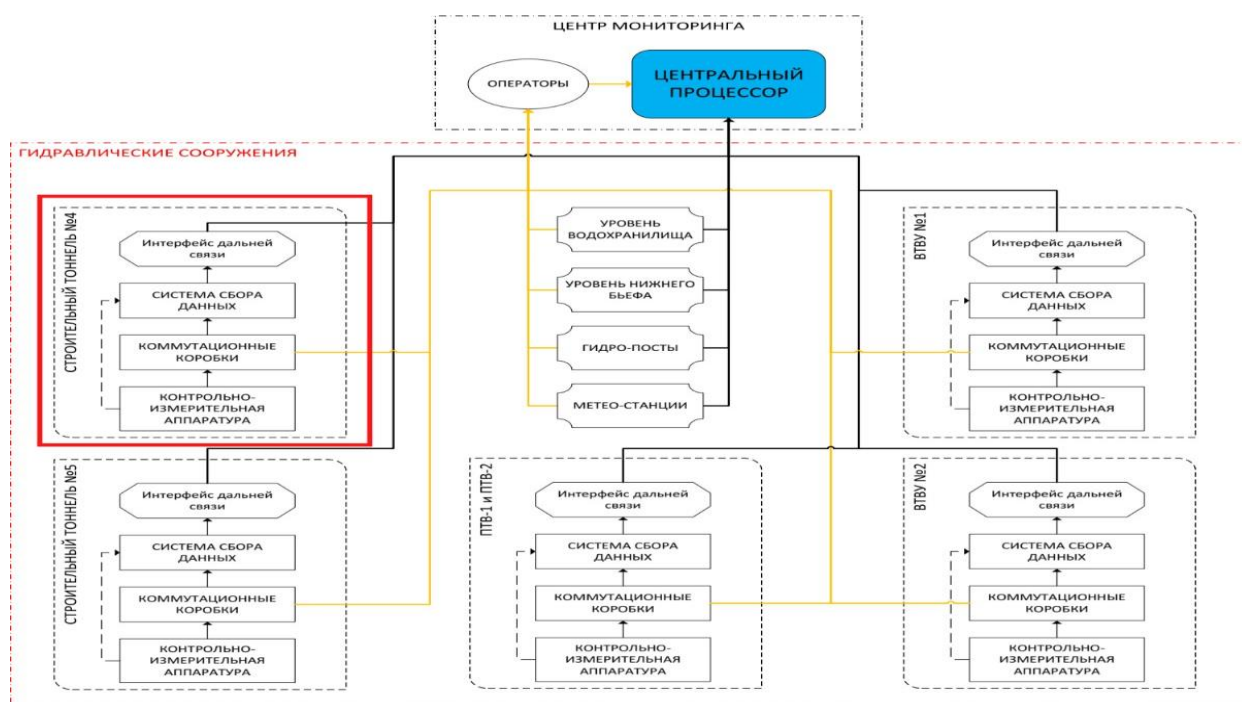
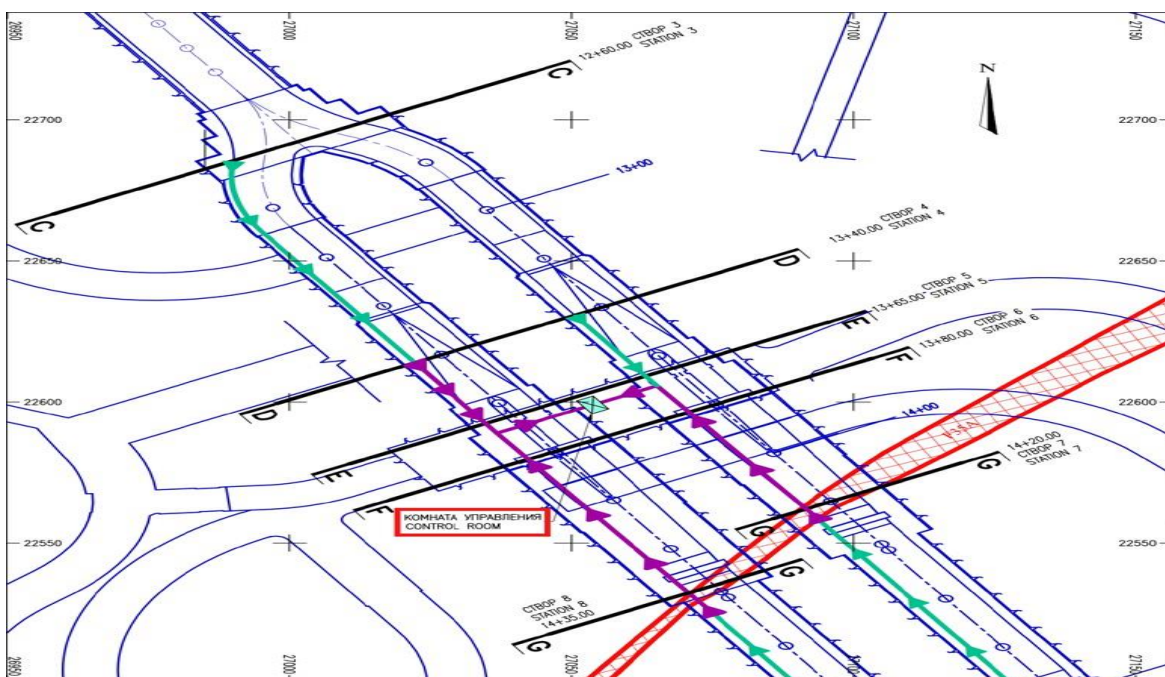
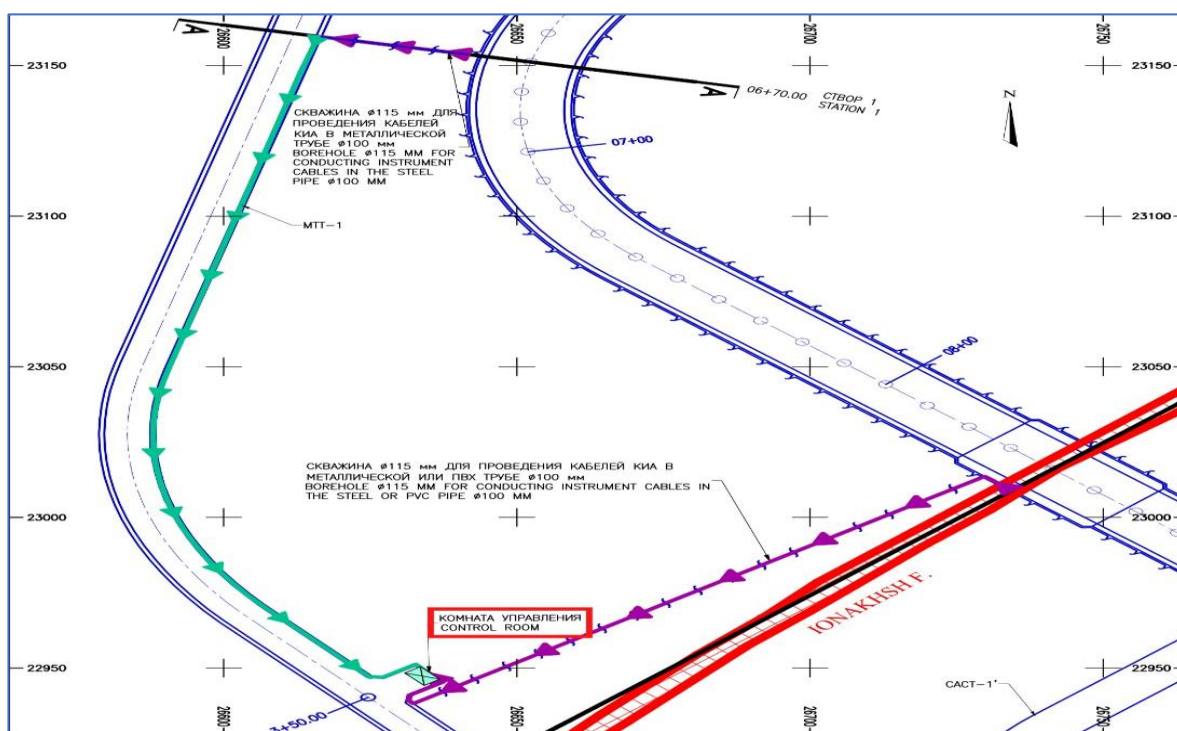


Рисунок 3.13. Архитектура области «гидравлических сооружений» ЛОТ-3



**Рисунок 3.14.** Система сбора данных в помещении затворов СТ-4 на ПК 13+65.00



**Рисунок 3.15.** Система сбора данных в подходной галерее МТТ-1 на ПК 3+50.00

Измеряемыми параметрами являются:

-мониторинг осадок сводной части СТ-4 ;

-мониторинг порового давления воды в грунте вокруг СТ-4. Техническая

записка по геотехническому оборудованию и мониторингу в СТ-4.

В соответствии технической записи по геотехническому оборудованию и мониторингу в СТ-4 - P3-ROG-B-IN-DT4-00-DT-MN-0001-A0, КИА и их характеристики будут следующими:

**DT4-XX-MP-XX – Многоточечный скважинный экстензометр**

Кол-во точек измерений	4 (4м + 8м + 15м + 30м) или 4 (3м + 6м + 9м + 18м)
------------------------	---

Диапазон измерений	100мм, 150мм или 200мм.
--------------------	-------------------------

**DT4-XX-PZ-XX – Пьезометр**

Диапазон измерений	0-2 МПа
--------------------	---------

**DT4-XX-LS-XX – Водомерная рейка**

Диапазон измерений	0-12 метров
--------------------	-------------

Разрешение	5 см (0.05м)
------------	--------------

**DT4-XX-VC-XX – Видео-камера**

Разрешение	4 МП
------------	------

Установка КИА будет производиться в соответствии с последовательностью строительства и ограничений на площадки. Предварительная последовательность монтажа выглядит следующим образом:

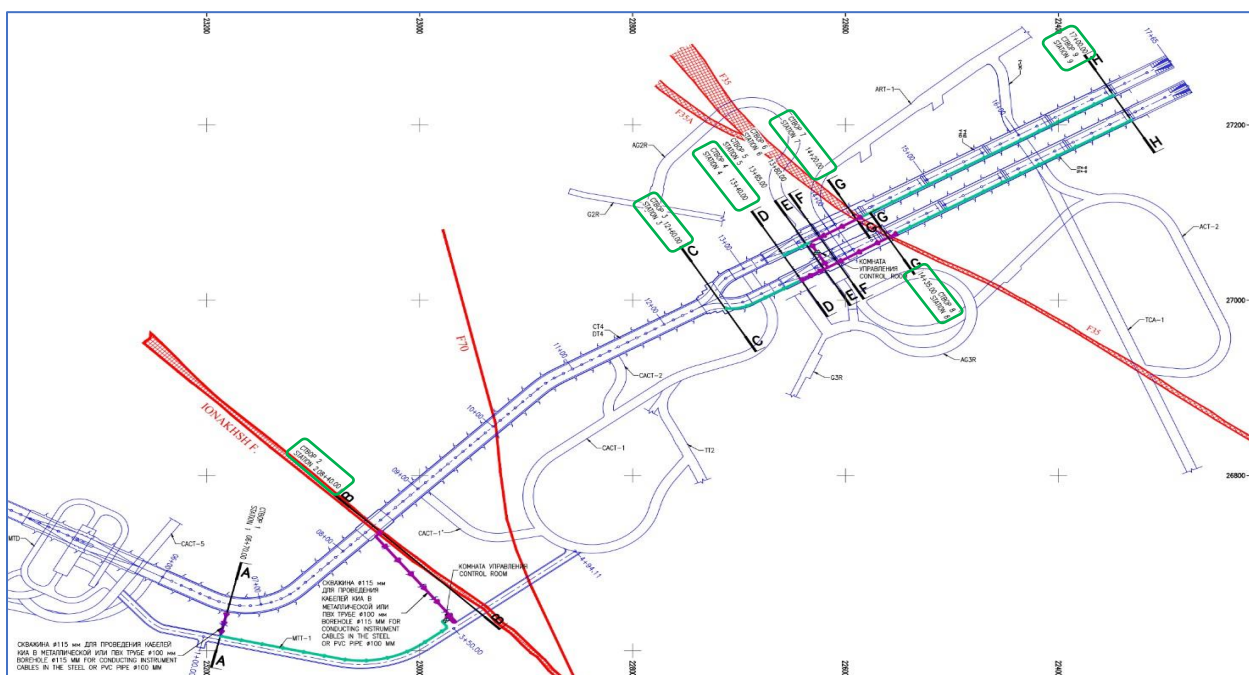
Створ 3 → Створ 2 → Створ 4 → Створ 9 → Створ 8 → Створ 7 → Створ 1  
→ Створ 5 → Створ 6

Монтаж кабелей и коммутационных коробок производится, следуя графика установки КИА и согласно схеме подключения.

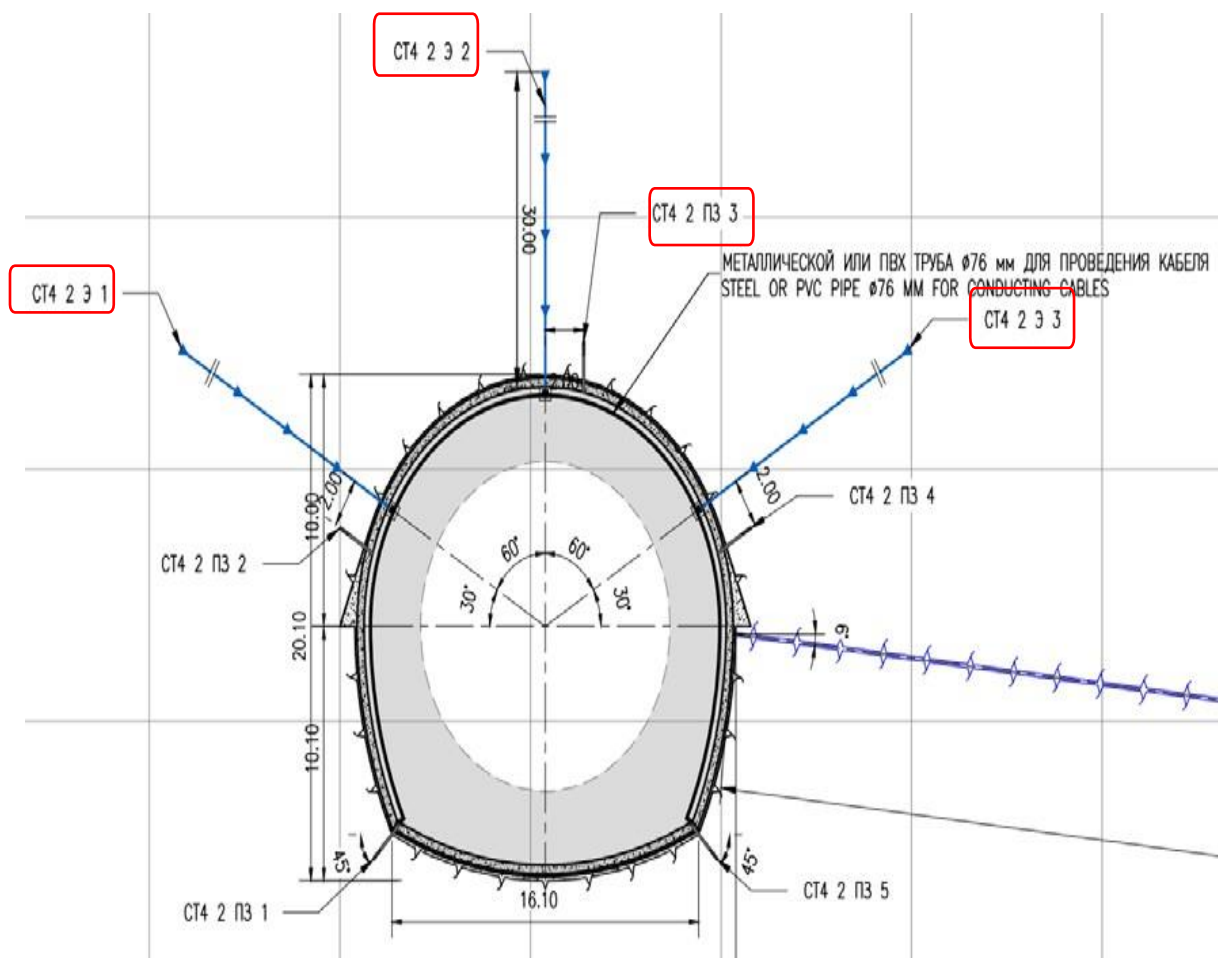
После завершения монтажа КИА и подключения кабелей к ним они будут проложены к местам установки систем сбора данных в помещении затворов и галереи доступа МТТ-1. (см.рис. 3.11).

Размещение КИА на створах мониторинга производится в соответствии с проектными требованиями. В зависимости от условий на объекте, пикетаж и глубина установки, указанные в таблицах, могут быть незначительно изменены в связи с имеющимися ограничениями.





**Рисунок 3.16.** Створы КИА, в которых будут установлены многоточечные скважинные экстензометры (выделены зеленым цветом)



**Рисунки 3.17.** Многоточечные скважинные экстензометры на створе КИА №2

### **3.4. Применение КИА для измерений гидравлических параметров в тоннеле СТ-4 Рогунской ГЭС**

Основной целью является подбор схемы размещения контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) для измерения гидравлических параметров вдоль строительного тоннеля СТ-4, определение типа и количества измерительных приборов, необходимых вдоль трассы водосброса СТ-4, и основных требований по каждому типу приборов. Также более подробный анализ гидравлической КИА, которую необходимо встроить в бетонное сооружение (обделку) и которая может оказать наибольшее влияние на проект и строительство данного сооружения. Основные рассматриваемые гидравлические измерительные приборы: датчики расхода и давления [9].

Для выполнения цели обсуждается концепция установки (включая основные требования) датчиков расхода и давления, а также методика сбора данных. Компоновка КИА выбрана на основании конкретных видов выбранных приборов, имеющихся на рынке в настоящее время. Предполагается, что можно также использовать другие аналогичные типы приборов других поставщиков, если они отвечают основным требованиям по рабочим характеристикам, т.е. соответствуют базовым спецификациям, имеют тот же диапазон точности и т.п.

Для выполнения цели обсуждается концепция установки (включая основные требования) датчиков расхода и давления, а также методика сбора данных. Компоновка КИА выбрана на основании конкретных видов выбранных приборов, имеющихся на рынке в настоящее время. Предполагается, что можно также использовать другие аналогичные типы приборов других поставщиков, если они отвечают основным требованиям по рабочим характеристикам, т.е. соответствуют базовым спецификациям, имеют тот же диапазон точности и т.п.

Принимая во внимание конкретные особенности тоннеля СТ-4, например, диаметр ( $D=15.0\text{м}$ ), максимальную скорость потока ( $20\text{м/с}$ ) и давление, отмечается, что выбор пригодных датчиков расхода на рынке довольно мал. Поэтому первой целью технической записки является предоставление больше сведений об установке необходимых датчиков. По этой причине в записке

указаны конкретные изделия. Тем не менее, можно рассмотреть и другие изделия, имеющиеся на рынке, при условии, что они соответствуют той же концепции установки и эксплуатации, отвечающие конкретными критериями, т.е. базовым спецификациям, имеют тот же диапазон точности и т.п. Остальные КИА в СТ-4 обсуждаются на концептуальном уровне, т.е. в виде определения предварительного места расположения, наиболее подходящего типа прибора и с указанием общих требований [43,45,48].

Предложенные КИА для измерения гидравлических параметров с указанием типа, основных характеристик и места расположения, представлены в таблице 3.3. и на рисунке 3.18.

Основными рассматриваемыми гидравлическими измерительными приборами являются датчики расхода и давления. Основные детали, общие требования к монтажу и концепция сбора данных обсуждаются в разделах ниже. В отношении данных приборов, в технической записке дана информация, выходящая за рамки концепции. В качестве примера приводятся возможные данные по монтажу. Поэтому в данной статье приведены конкретные приборы для гидравлических измерений. Однако заказчик или подрядчик вправе выбрать любые другие приборы, имеющиеся на рынке, которые отвечают той же концепции измерений и условиям в СТ-4 ( $d=15.0\text{м}$ ,  $V_{\text{max}}=20\text{м/с}$ ,  $P=140\text{м}$ ).

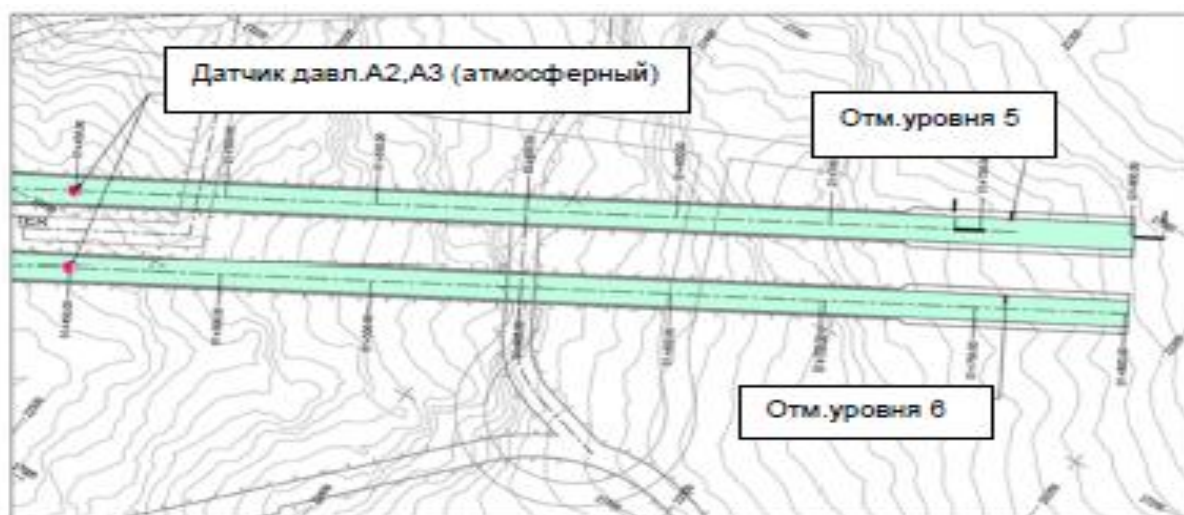
Основная цель измерений скорости в тоннеле СТ-4 заключается в оценке расхода, проходящего по данному водоводу за единицу времени. Учитывая цель измерений и параметры самого сооружения, рекомендуется установить диапазон точности измерений расхода, равный 5%. Для указанной цели достаточно наличия одного измерительного участка в напорной части тоннеля. Предварительное месторасположение такого участка определено у пикета 1+050. С точки зрения особенностей водовода СТ-4, т.е. его диаметра, максимальной скорости потока и материала обделки, огромное значение имеет правильный выбор, как пригодного метода измерения расхода, так и доступного оборудования [46,47].

**Таблица 3.2. Тоннель СТ-4 - КИА для измерения гидравлических характеристик**

/n	<b>КИА для измерения гидравлических характеристик в СТ-4</b>			
	Наименование	Спецификации	Кол-во для монтажа	Предварительное местоположение
	Датчик скорости направления ветра	Диапазон скорости: 0 - 90 м/с Диапазон направлений измерения: 0°С - 360° Пороговое значение запуска: <0.01 м/с Разрешение: <0.01 м/с Точность: ±0.3м/с	1	Аэрационный тоннель
	Датчик температуры воздуха	Диапазон: от -20°С до +60°С Разрешение: 0.1°С Точность: ±0.1°С	1	Аэрационный тоннель
	Видеокамера	Видеосенсор: 4МР Поле обзора: 100° Разрешение: до 1920x1080 Ночная съемка: ИК подсветка до 15 м	4	ДТ4: после затворов (примерно 1+380)
	Датчик атмосферного давления	Диапазон: 500-1200гПа Диапазон рабочих температур: От -30°С до +60°С Разрешение: 0.10гПа Общая точность: ± 0.25гПа Разрешение: <0.1 м/с	3	Прим. 1+400 (1 шт. – после первой шахты ТВВУ1); Прим. 1+430 (1 шт. – после второй шахты ТВВУ1); Аэрационный тоннель
	Расходомер	Тип: ультразвуковой Частота колебаний: 500Гц Макс.давление: 15 бар Диапазон длины пути звука: 5-20 м Разрешение: <0.01 м/с Точность: ±0.1м/с	10	Прим. 1+170 до 1+170
	Датчик давления	Тип: четырехструнная система с пьезорезистивным элементом Ошибка соответствия: <±0.1 % Диапазон значений Давления: 0 - 20 бар	9	- 0+905; - 1+237.302; - 1+283.568 (2 шт.- в обеих ветвях); прим. 1+370 (4 шт. перед каждым радиальным затвором);
	Отметка уровня воды	Тип: отметки уровня Материал: прочная краска Диапазон измерений: 0-5 м Разрешение: 0.10 м	6	ДТ4: - после затворов (прим..1+380) - 4 шт. -на выходах из тоннелей (прим. 1+760)



а

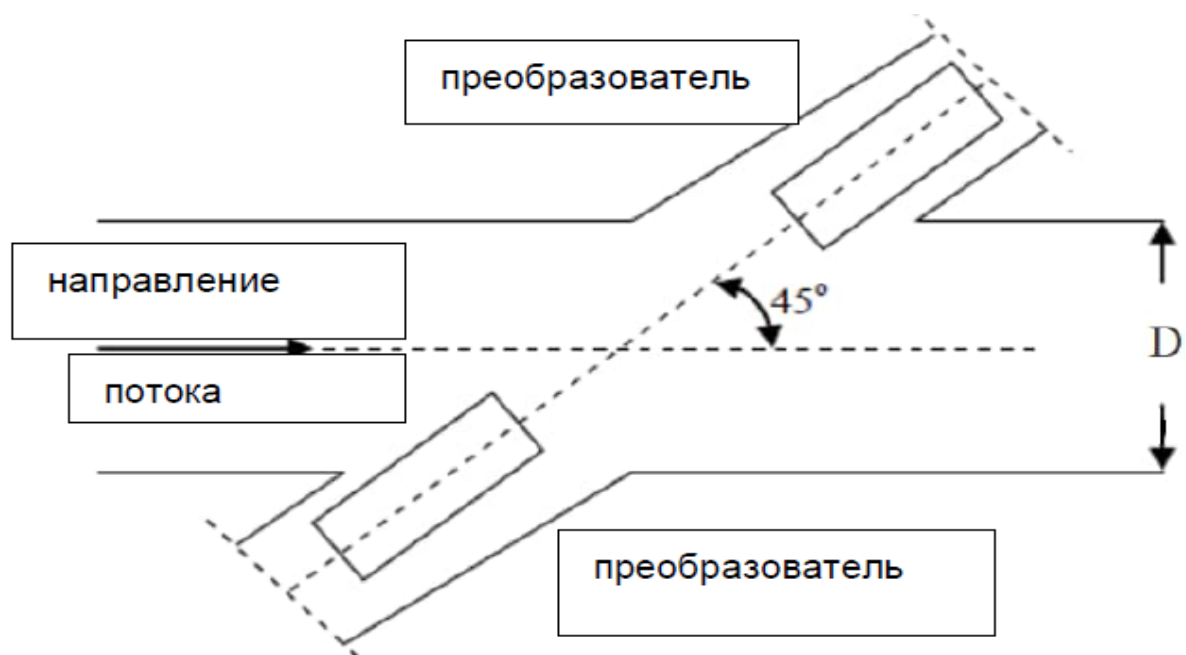


б

**Рисунок 3.18.** Расположение КИА для измерения гидравлических характеристик в тоннеле СТ-4

Учитывая, что строительный тоннель СТ-4 является полностью подземным сооружением, а указанный участок тоннеля функционирует под давлением, предлагается для измерения скорости потока использовать метод измерения времени прохождения ультразвукового импульса. Этот метод основан на измерении разницы времени прохождения ультразвуковых импульсов (волн), распространяющихся по движению и против движения потока. В этом случае звуковые волны генерируются преобразователями пьезо типа. Одна волна движется по направлению движения потока, а другая волна против движения потока. Разница во времени между их перемещением прямо пропорциональна

средней скорости жидкости на линии движения. Графическая схема описанной концепции представлена на рисунок 3.19.



**Рисунок 3.19.** Метод измерения времени прохождения ультразвукового импульса  
расположение приборов

Для понимания общих требований к монтажу приборов в качестве одного из возможных вариантов показан ультразвуковой модульный преобразователь MFATB05 производства Rittmeyer рисунок 3.20.

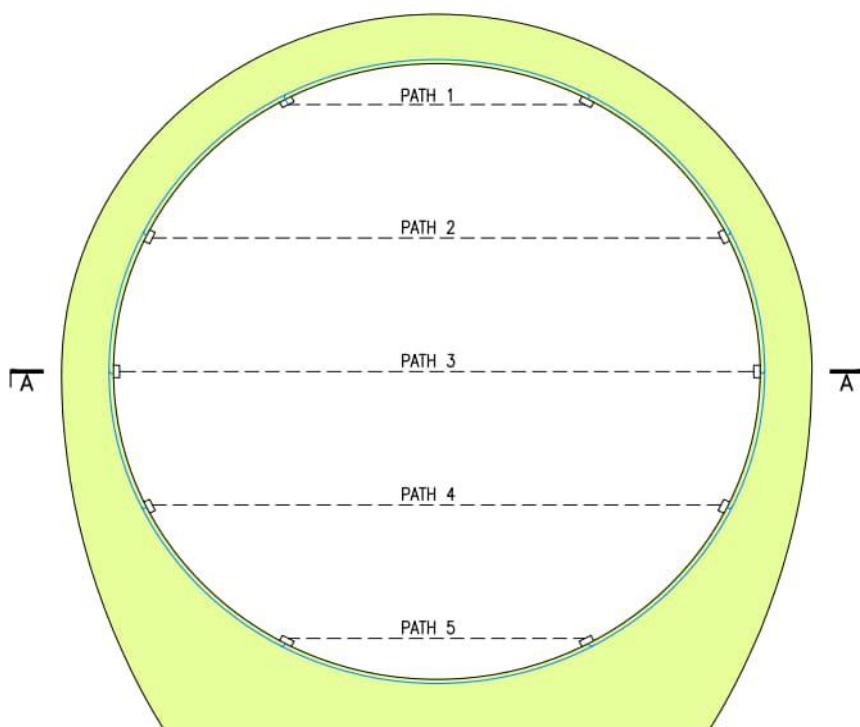


**Рисунок 3.20.** Преобразователь MFATB05



В этом случае базовая компоновка для предложенного сечения измерения потока в СТ-4 должна включать 5 путей измерения средней скорости (тип Z), включающих 10 преобразователей, как показано на рисунке выше. С этой целью предусмотрены 2 преобразователя на 1 путь для формирования горизонтальной плоскости для измерения средней скорости потока на определенной отметке внутри водовода.

Рекомендуется предусмотреть в измеряемом сечении 5 горизонтальных плоскостей и путей. Предложено именно такое количество «путей» с учетом большого диаметра тоннеля (15.0 м) и требуемой точности измерений (5%). Общая концепция расположения «путей» в сечении измерения скорости потока в СТ-4 показана на рисунке 3.21.



**Рисунок 3.21.** Тоннель СТ-4 – пути прохождения сигнала расходомера в напорном сечении

Каждый преобразователь установлен с помощью непосредственного анкерного крепления на поверхность бетонной обделки внутри тоннеля. В качестве альтернативного варианта монтажа, можно выполнить углубления в бетонной обделке глубиной около 5 см для размещения преобразователя, при этом не допуская его непосредственного погружения в поток [49-51].

Конфигурация системы измерения давления в СТ-4 соответствует размещению преобразователей давления в ключевых точках по всему пути потока. Точки размещения и основные требования для преобразователей давления приведены в таблица 3.3. и на рисунок 3.19. Несмотря на то, что участок СТ-4 в пикетах от 0+000 до 0+600 не входит в объем работ по данной технической записке, рекомендуется предусмотреть на этом участке не менее 3-х преобразователей давления: 1 шт. на входе и 2 шт. на шахте затворов.

Рекомендуется, чтобы сигналы от измерителей потока и преобразователей давления передавались по кабелям. Всю систему кабельных каналов необходимо расположить внутри бетонной обделки или между обделкой и породой. Для защиты от механических повреждений все кабели следует размещать внутри защитных обсадных труб.

Предлагается следующая концепция эксплуатации, централизованного сбора и анализа данных, где сигналы от приборов обоих типов передаются на главный контроллер данных, рисунок 3.22.

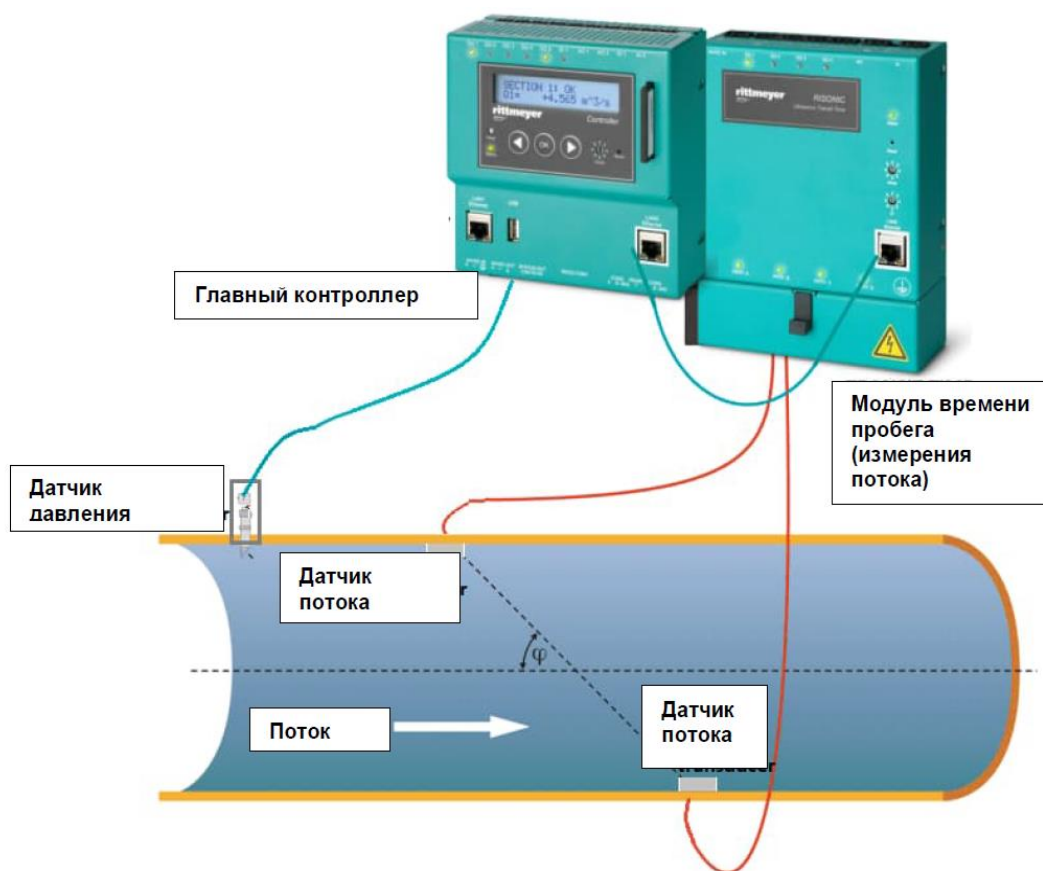


Рисунок 3.22. Приборы для измерения гидравлических параметров

Для простоты эксплуатации предлагается использовать ультразвуковой датчик скорости ветра в аэрационном тоннеле ART-1. Такой датчик может передавать данные в режиме реального времени о направлении и скорости ветра. В то же самое время датчики такого типа лишены механических проблем, присущих датчикам лопастного типа, что уменьшает объем технического обслуживания (рисунке 3.23).



**Рисунок 3.23.** Пример ультразвукового датчика ветра

*Основные требования для ультразвукового датчика ветра:*

*Диапазон скорости: от 0 до 60 м/с*

*Диапазон направления: от 0° до 360°*

*Пороговое значение запуска: <0.01 м/с*

*Разрешение: <0.01 м/с*

*Точность:  $\pm 0.3$  м/с*

*Предложенные датчики атмосферного давления должны иметь функцию удаленной передачи данных в систему сбора данных.*

*Предлагаемые спецификации для датчиков атмосферного давления:*

*Диапазон рабочих параметров: от 500 гПа до 1200 гПа (примерно)*

*Рабочие температуры: от -40°C до +60°C*

*Энергоснабжение: 5 - 24 В DC*

*Разрешение: 0.10 гПа*

Общая точность:  $\pm 0.25 \text{ ГПа}$

Разрешение:  $< 0.1 \text{ м/с}$

### **3.5. Расположение геотехнических контрольно-измерительных приборов и системы мониторинга**

Рогунская ГЭС является судьбоносным объектом, важным источником жизненных благ для народа Таджикистана. Начало деятельности электростанции является важнейшим событием в истории государственности, и оно золотыми буквами будет вписано в историческую летопись. Ибо производимое здесь экологически чистое электричество полностью удовлетворит запросы Таджикистана и даст серьезный толчок развитию национальной экономики страны [55-59].

Подземные гидротехнические сооружения широко распространены при строительстве гидроузлов. Гидротехнические тоннели различного назначения, шахтные турбинные водоводы, уравнильные шахты и резервуары, подземные машинные залы, камеры затворов и трансформаторные помещения входят в состав многих построенных и запроектированных ГЭС. Крупнейшие подземные комплексы Нурекской и Рогунской ГЭС и других являются уникальными в отечественной практике [54,55].

Геотехническое оборудование и мониторинг строительного тоннеля СТ-4 на правом берегу створа плотины Рогунской ГЭС, входят в состав напорной части тоннеля, камеру затворов и безнапорные тоннели. Анализ порядка организации приборов приводится только для той части СТ-4, которая входит в объем работ, т.е. между пикетами 06+00 м и 17+16 м. В основном, геотехническое оборудование в СТ-4 включают многоточечные экстензометры и вибрационные струнные (ВС) пьезометры.

Схема организации наблюдений составлена с учетом конкретных датчиков выбранных типов, представленных в настоящее время на рынке. В то же время, предполагается, что прочие аналогичные типы датчиков от других поставщиков также могут быть использованы, если они удовлетворяют основным требованиям

к функциональности, т.е. отвечают базовым спецификациям, обеспечивают тот же диапазон точности и т.п.

Контрольно-измерительное оборудование, предназначенное для измерения некоторых геотехнических характеристик, например, порового давления воды и смещений вокруг тоннеля приведены в 3.3.

**Таблица 3.3.** Геотехническое оборудование в СТ-4 – Местоположение измерительных створов в тоннеле с указанием типа и количества приборов

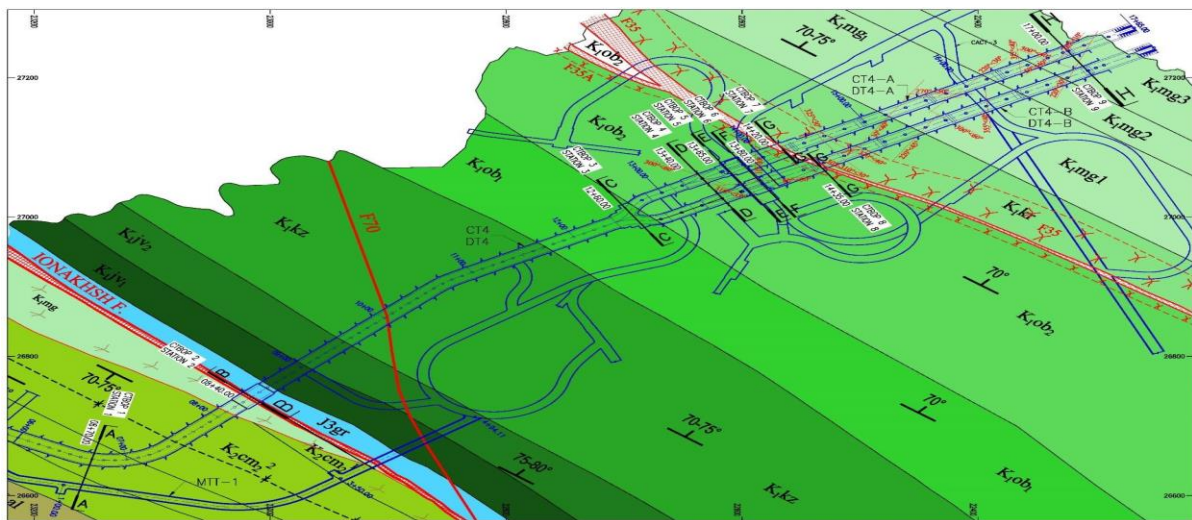
№ створа	Местоположение	Прибор		Сбор данных
		Тип	Кол-во	
Створ 1	Пк. 06+70 м (Изгиб тоннеля)	Пьезометр ВС (L=5 м)	2	Пульт управления в МТТ-1 на Пк. 03+50 м
Створ 2	Пк. 08+40 м (Ионахский разлом)	Пьезометр ВС (L=5 м)	5	
		многоточечный экстензометр (4 м, 8 м, 15 м и 30 м)	3	
Створ 3	Пк. 12+60 м (участок разветвления)	Пьезометр ВС (L=5 м)	3	ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ЗАТВОРОВ СТ4
		многоточечный экстензометр (4 м, 8 м, 15 м и 30 м)	3	
Створ 4	Пк. 13+40 м (до разветвления, в обеих ветвях тоннеля)	Пьезометр ВС (L=5 м)	10	
		Многоточечный экстензометр (3 м, 6 м, 9 м и 18 м)	6	
Створ 5	Пк. 13+65 м (до затворов, в обеих ветвях тоннеля)	Нивелировочные рейки	4	
Створ 6	Пк. 13+80 м (до затворов, в обеих ветвях тоннеля)	Видеокамера	4	
Створ 7	Пк. 14+20 м (разлом 35 в СТ4-А)	многоточечный экстензометр (3 м, 6 м, 9 м и 18 м)	3	
Створ 8	Пк. 14+35 м (разлом 35 в СТ4-Б)	Пьезометр ВСs (L=5 м)	5	
		многоточечный экстензометры (3 м, 6 м, 9 м и 18 м)	3	
Створ 9	Пк. 17+00 м (Near the tunnel outlet, in both bran Pkes of the tunnel)	Пьезометр ВСs (L=5 м)	10	
		многоточечный экстензометры (3 м, 6m, 9 м, 18 м)	6	

Строительный тоннель СТ-4 Рогунской ГЭС расположен на правом берегу и имеет длину 1716 м. В объем работ по контракту ЛОТ-3 входит часть тоннеля между пикетами 06+00 и 17+16.

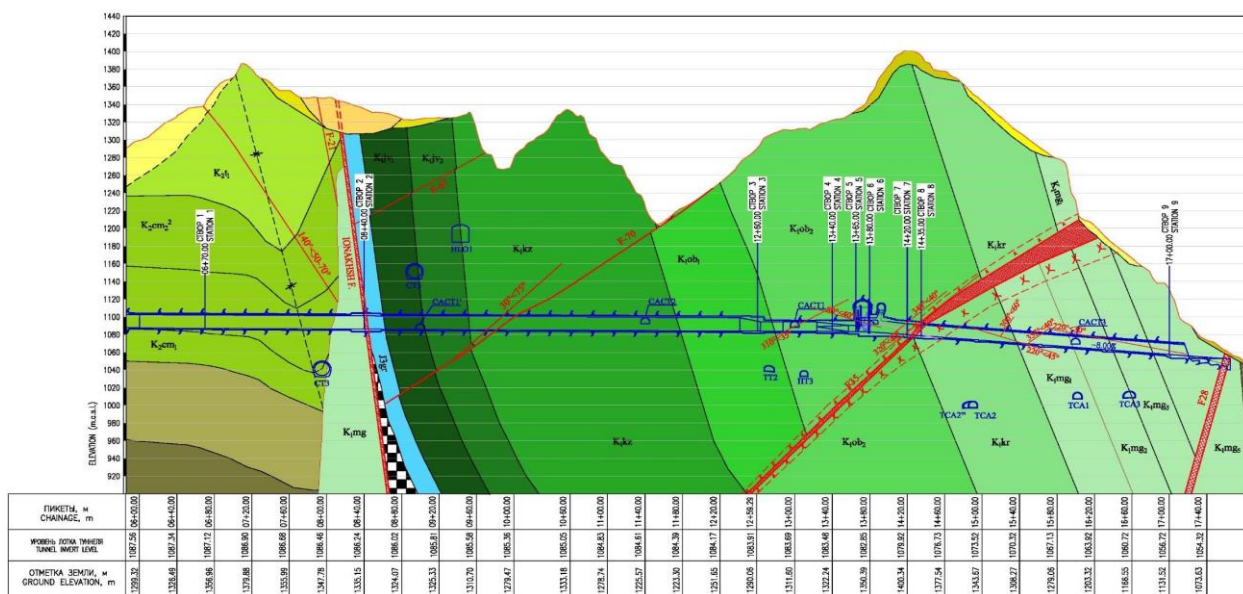
Геотехническое оборудование в строительного тоннеля СТ-4 установлено в девяти измерительных створах. Геологический план и продольный профиль СТ-4 между пикетами 06+00 м и 17+16 м показаны на рисунки 3.24. и 3.25, в которых показано расположение девяти измерительных створов.

Кроме того, на рисунке 3.26. представлен план СТ-4 с маршрутом соединительного кабеля, ведущего к двум пультам управления по створам 1 и 2, а на рисунке 3.27 – по створам с 3 по 9.

Это схема размещения пьезометров и экстензометров приведена на рисунке 3.28.

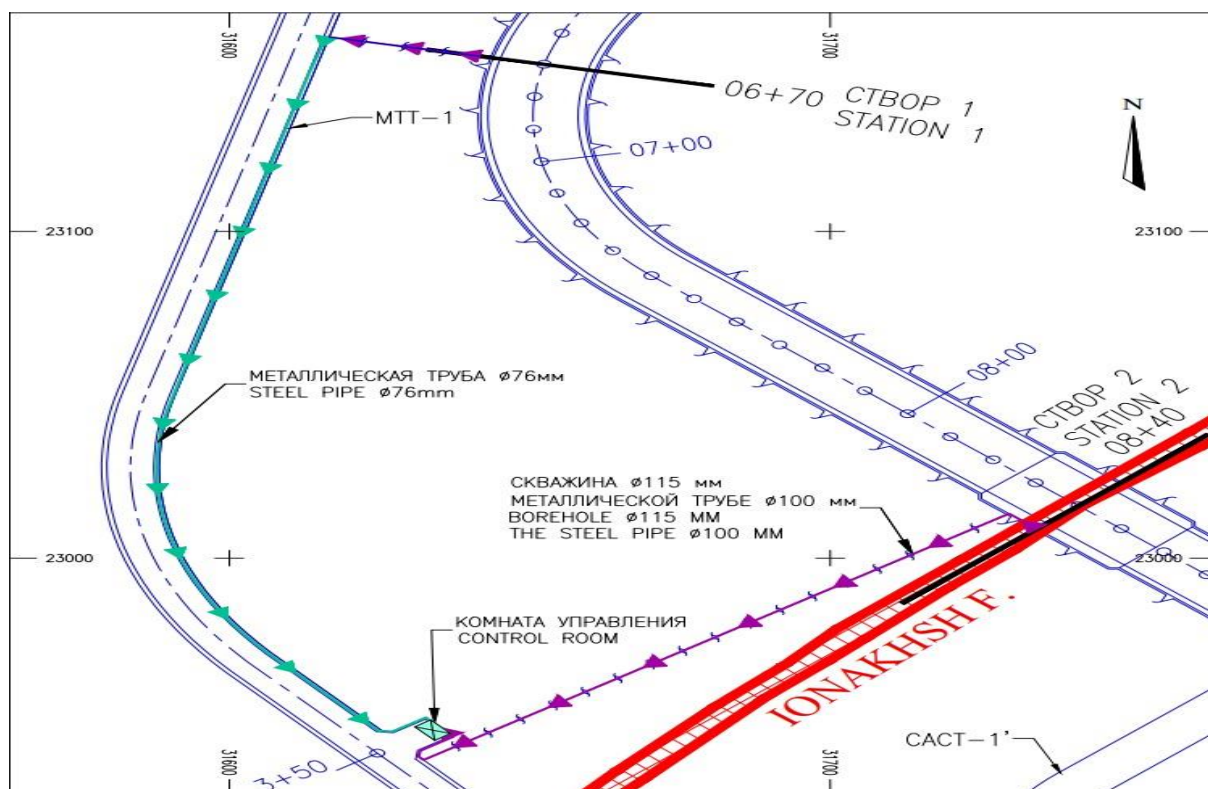


**Рисунки 3.24.** Геологический продольный профиль СТ-4 между пикетами 06+00м и 17+16 с расположением 9 створов

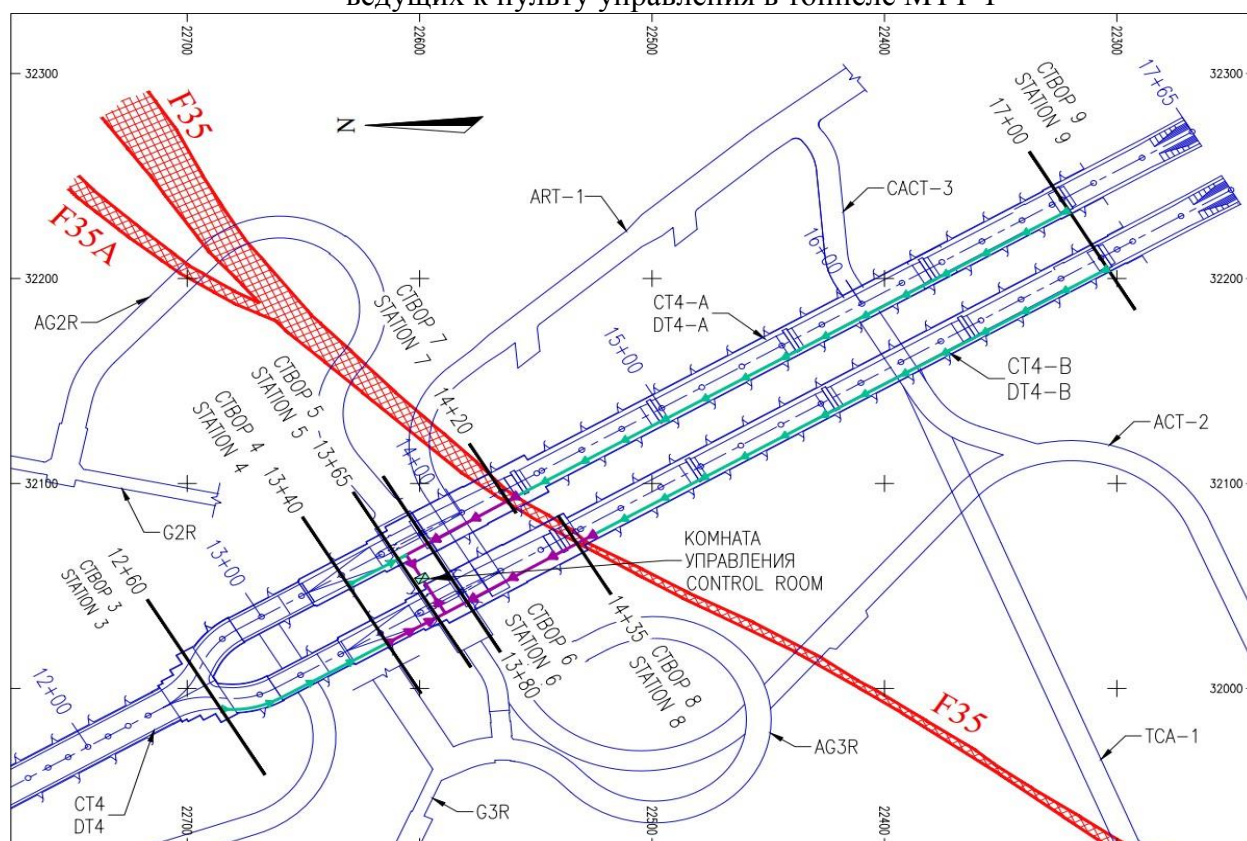


**Рисунки 3.25.** Геологический продольный профиль СТ-4 между пикетами 06+00 м и 17+16 м с расположением 9 створов

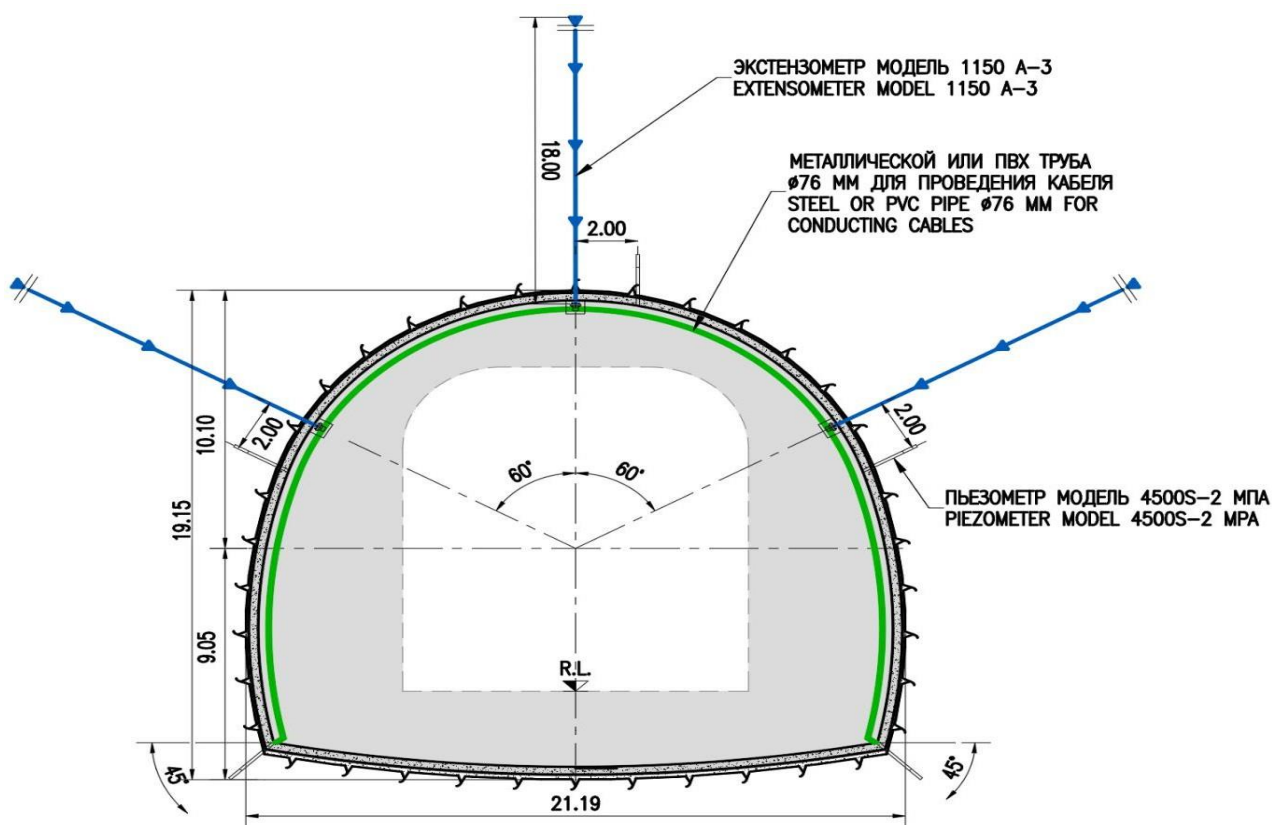




**Рисунки 3.26.** Расположение створов 1 и 2, а также маршрутов соединительных кабелей, ведущих к пульту управления в тоннеле МТТ-1



**Рисунки 3.27.** Расположение створов 3 – 9, а также маршрутов соединительных кабелей, ведущих к пульту управления в камере затворов СТ-4



**Рисунки 3.28.** Типовая схема размещения пьезометров и экстензометров с створах 7 и 8

Система мониторинга строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС включает в себя 9 измерительных створов - участки с контрольно-измерительной аппаратурой (рисунки 3.24).

К основным геотехническим датчикам, предусмотренным для установки в СТ4 между пикетами 06+00 м и 17+16 м, относятся вибрационные струнные (ВС) пьезометры и экстензометры.

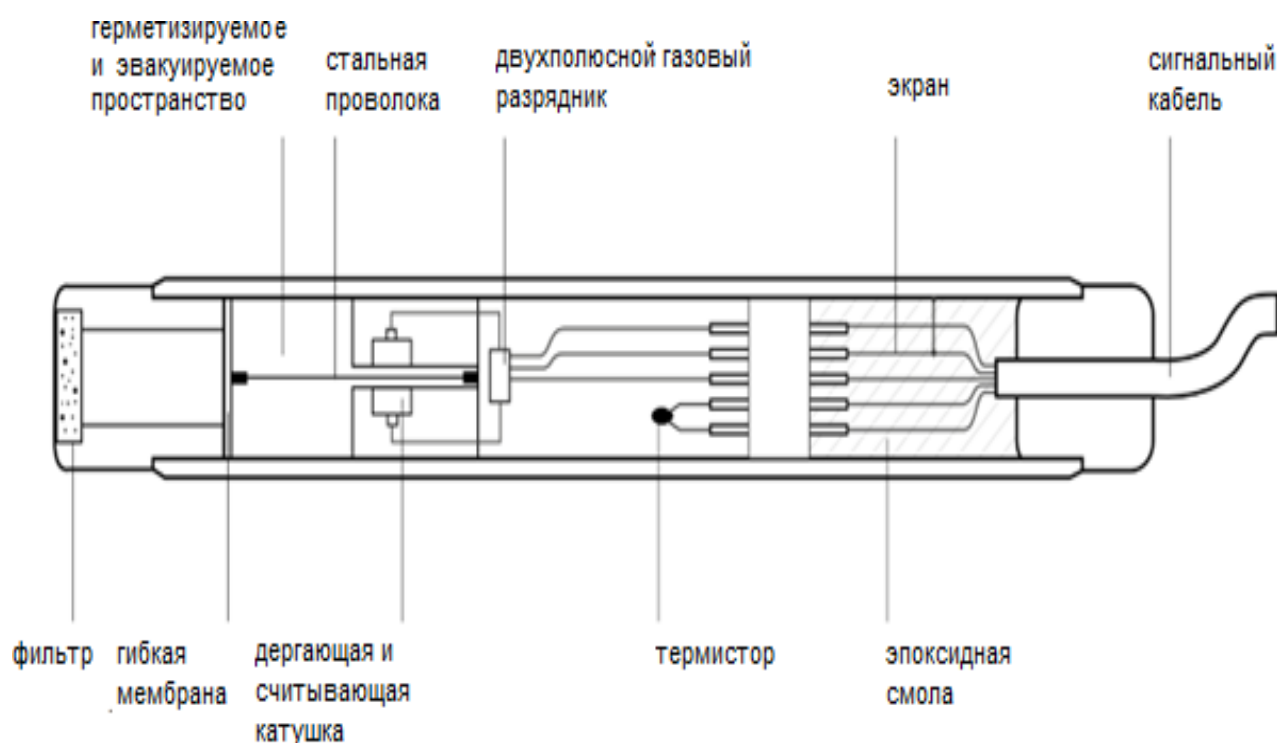
Вибрационные струнные пьезометры используются для наблюдения за поровым давлением воды за бетонной обделкой СТ-4. Такие пьезометры, как правило, герметично заделываются в шпурах, но могут быть также подвешены в скважине, которые показаны на рисунке 6 ВС пьезометры стандартных видов.

В пьезометре ВС имеется стальная проволока, удерживаемая в натянутом состоянии между гибкой внешней мембраной и жесткой внутренней перегородкой. Датчик устроен таким образом, что давление воды, действующее на мембрану, изменяет натяжение проволоки. При увеличении давления натяжение проволоки уменьшается, и наоборот. Натяжение проволоки измеряется

путем приведения ее в колебательное состояние с помощью серии электромагнитных импульсов от катушки. При этом проволока вибрирует преимущественно на своей собственной резонансной частоте. По окончании возбуждения проволока продолжает вибрировать, и в катушке индуцируется синусоидальный сигнал на резонансной частоте, который передается на блок считывания. Встроенная двухполюсная газоразрядная трубка защищает датчик от переходных процессов напряжения. Встроенный термистор обеспечивает получение данных о температуре и может быть использован также для тепловой коррекции. Пьезометры ВС имеют фильтрующий наконечник, который предотвращает попадание мелких частиц грунта в камеру перед мембраной. Поры в фильтре позволяют проникать воде, но не частицам грунта. Конструктивные элементы пьезометра ВС приведены на рисунки 3.29.



**Рисунки 3.29.** Пьезометры ВС стандартных типов



**Рисунки 3.30.** Схема составных элементов пьезометра ВС

Скважинные экстензометры стержневого типа используются для измерения смещений или деформаций в грунте, скальных породах и бетонных конструкциях. Обычно они применяются для измерения перемещений грунта вокруг тоннелей. На рисунке 3.31 показан экстензометр с многоточечными стержнями.



**Рисунки 3.31.** Схематическое изображение экстензометра с многоточечными стержнями



Экстензометр измеряет смещение, происходящее с течением времени в скважине в массиве горных пород. Он состоит из одного или нескольких анкеров и одной контрольной точки. Движение стержней, закрепленных на анкерах, измеряется относительно головки экстензометра, закрепленной на устье скважины, и может быть применено для определения величины деформации между анкерами [52,53].

Многоточечный экстензометр предназначен для контроля изменения расстояния между скважинными анкерами, установленными на заданной глубине в скважине и измерительной головкой, расположенной на поверхности. Измерения производятся с помощью глубинного микрометра или преобразователей перемещений.

Головки экстензометров рассчитаны на диапазон измерений до 100 или 200 мм в зависимости от количества контролируемых анкеров и типа используемых стержней. В комплект поставки головки входят цементируемые анкера. Пакерные анкера поставляются в качестве опции. Стержни экстензометров изготавливаются из стекловолокна или нержавеющей стали. Оба типа имеют нейлоновую трубку, которая уменьшает трение между стержнями и окружающим грунтом или цементным раствором.

### **Выводы по главе 3.**

1. Выявлены особенности напряженного состояния массива на участке машинного зала Рогунской ГЭС и произведена количественная оценка действующих на этом участке напряжений. Было установлено, что максимальные и минимальные главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  являются горизонтальными, а напряжение  $\sigma_2$  является вертикальными;

2. Получены результаты геотехнического мониторинга контрольно-измерительной аппаратурой (КИА) строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС.

3. Принятая схема размещения КИА, и система мониторинга строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС включает в себя 9 измерительных створов - участки с контрольно-измерительной аппаратурой. К основным

геотехническим датчикам, предусмотренным для установки в СТ-4 между пикетами 06+00 м и 17+16 м, относятся вибрационные струнные (ВС) пьезометры и экстензометры.



## **Глава 4. РАСЧЕТ НДС СТ-4 МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИИ КРЕПИ**

### **4.1. Крепь и материалы крепи**

Проект крепи породы для безнапорных тоннелей СТ-4 осуществлялся с учетом характеристик породных массивов, включающих данные тоннели, и принимая во внимание геологическую структуру, а также условия напряжения по месту вокруг данной структуры. Проект составлялся с использованием трех различных методик расчета крепи породы: эмпирического, аналитического и математического, полученные результаты сравнивались друг с другом. В конце для различных участков данных тоннелей определялся ряд систем крепи породы. Ниже приводится описание общей процедуры расчета крепи породы.

- введение нескольких систем первичной крепи для различных классов горной породы, встреченных в СТ-4, с использованием хорошо известных систем классификации породных массивов;

- выявление потенциально неустойчивых клиньев вокруг безнапорных тоннелей СТ4 и расчет коэффициентов устойчивости после применения мер крепи породы, включающих торкрет-бетон и анкерные болты;

- математический анализ СТ-4 и вмещающих их породных массивов с учетом большого количества этапов проходки и применения мер крепи породы, предписанных в соответствии с указанными выше двумя методами.

Свойства и технические характеристики материалов крепи пород, использованные при проектировании безнапорных тоннелей СТ-4. Материалы были предложены ЭЙФРИ в своем проекте [37].

#### ***Характеристики стальных стержней и анкерных болтов***

Для проекта и расчетов СТ-4 были использованы следующие характеристики и свойства железобетонных анкеров:

$D = 32 \text{ мм}$

длина = 5.85 м и 7.80 м

марка стали (по российским стандартам) = А-III

$\sigma_y$ - (устойчивость к деформации) = 390 Мпа

$\tau_y$ - (предел текучести) для анкера диаметром 32 мм -314 кН и для анкеров 40 мм-400кН;  $\sigma_d$  (расчетная прочность) = 0,625 х  $\sigma_y$ =244 МПа;  $\tau_d$ (расчетная нагрузка)=0,625х  $\tau_y$  для анкеров диаметром 32мм -130кН и для анкеров диаметром 400мм=306 кН;  $E_s$  (модуль упругости) = 210'000 МПа

Схема установки: разная для разных классов крепи

Угол установки крепи: перпендикулярно стенам тоннеля или в соответствии с указаниями инженера-геотехника по месту

Уровень защиты от коррозии: Уровень I – постоянные сооружения нормальные условия. Полностью цементируемые анкера с соответствующим эпоксидным покрытием стержней.

В отношении цементируемых анкерных болтов, в расчетах безнапорных тоннелей СТ-4 использовались нижеследующие характеристики и механические свойства. При расчетах прочности сцепления использовались результаты двух исследовательских испытаний тросов натяжения, установленных в алевролите нижнеобигармской формации внутри подземной выемки машзала. С учетом графиков зависимости смещения от нагрузки, прочность связи между цементом и алевролитом можно консервативно рассчитать равной 0,6 МПа.

**Таблица 4.1.** Характеристики цементного раствора для анкерных болтов, используемых в расчетах.

Диаметр болта	32	40	мм
Минимальный диаметр скважины	64	76	мм
Минимальное сопротивление сжатию цементной смеси через 28 суток (f <sub>c</sub> ) (цилиндрический образец)	Отношение воды к цементу 0,4	0,4	-
	Плотность 1,96	1,96	г/см <sup>3</sup>
Прочность связи “цемент/порода”	0,6	0,6	МПа
Допустимая связующая способность цементного раствора (коэффициент запаса прочности = 1.5)	80	96	кН/м

### ***Торкрет-бетон и бетон:***

Для проекта и расчетов безнапорных тоннелей СТ-4 использованы следующие характеристики торкрет-бетона и бетона:

**Таблица 4.2.** Характеристики торкрет-бетона, использованные в расчетах

28 дней сопротивление сжатию ( $f'c$ ) (цилиндрический образец)	25	МПа
Прочность на разрыв ( $\sigma_t$ )	3.0	МПа
Модуль эластичности ( $E_c$ )	23'500	МПа
Коэффициент Пуассона	0.2	-
Удельный вес (армированный торкрет-бетон)	24	кН/м <sup>3</sup>

**Таблица 4.3.** Характеристики бетона, использованные в расчетах

Марка бетона, Еврокод (ЕС)	C25/30	-
28 дней сопротивление сжатию ( $f'c$ ) (цилиндрический образец)	25	МПа
28 дней сопротивление сжатию ( $f'c$ ) (кубический образец)	30	МПа
Прочность на разрыв ( $\sigma_t$ )	3.0	МПа
Модуль эластичности ( $E_c$ )	23'500	МПа
Коэффициент Пуассона	0.2	-
Удельный вес	24	кН/м <sup>3</sup>

### ***Армирование***

Для проекта и расчетов армирования СТ-4 использованы следующие характеристики:

**Таблица 4.4.** Характеристики арматурной сетки, использованные для расчетов безнапорных тоннелей СТ-4

Диаметр и расстояние	6@150×150 & 6@100×100	мм
Модуль упругости ( $E_s$ )	210'000	МПа
Прочность на разрыв	240	МПа
Марка стали (по российским стандартам)	A-I	-

**Таблица 4.5.** Свойства двутавровой балки для использования в  
безнапорных тоннелях СТ-4

№ профиля	IPE 240	IPE 300	-
Глубина сечения	240	300	мм
Площадь	3910	5380	мм <sup>2</sup>
Момент инерции	38.9×10 <sup>6</sup>	83.6×10 <sup>6</sup>	мм <sup>4</sup>
Модуль упругости (Es)	210'000	210'000	МПа
Прочность на растяжение	240	240	МПа
Марка стали	A-III	A-III	-
Вес	30.7	42.2	кг/м

#### **4.2. Выбор системы крепи породы с использованием эмпирических методов – $Q_{2015}$ [60]**

Учитывая характеристики и геологические структуры породных массивов, вмещающих безнапорные тоннели СТ-4, для проектирования крепи породы этих тоннелей был использован эмпирический метод, согласно которому для различных пикетов данных тоннелей было подобрано несколько систем крепи породы.

Эмпирические методы были разработаны на основе статистического анализа данных по устойчивым и неустойчивым подземным выработкам, выполненным в горных массивах различных типов в ряде стран. Одной из наиболее широко используемых в механике горных пород систем классификации породных массивов в подземных выработках является “качество горного массива” ( $Q$ ) [38]. Поэтому данная система классификации была использована для проекта необходимых систем крепи породы вдоль СТ-4. Выбранные принятые системы крепи на основании  $Q_{2015}$  для обеспечения устойчивости безнапорных тоннелей СТ-4 представлены в таблице 4.6.

Для выбора необходимой системы крепи породы в подземных выработках на основании диаграммы  $Q$ -крепи, пролет подземной выработки, диаметр или высоту (м) необходимо преобразовать в «эквивалентный размер выработки» ( $D_e$ ) путем деления на параметр, называемый «коэффициент крепи выработки» (“Excavation

Support Ratio” (ESR), который связан с предполагаемым использованием выработки и степенью безопасности, обеспечиваемой системой крепи, установленной для поддержки устойчивости выработки.

**Таблица 4.6.** Выбранные системы крепи породы для безнапорных туннелей СТ4 с использованием откорректированной диаграммы Q-Support, актуализированной в 2015

№	Геол.ед / горный массив (зона)	Пикет (м)		Q	Категори я крепи на основани и Q	Предлагаемая крепь породы		
		от	до			Ж/б анкеры	Торкрт -бетон	Усиленные ребра из торкрет-бетона (RRS)
Строительный тоннель СТ-4								
1	K <sub>10b2</sub> и главный разлом	13+82	14+03	0.28 – 0.59*	6 до 7	анкеры 6-7 м, Интервал 1.4м	120-150 мм с армирование м	RRS-I - RRS-II (торкрет- бетон толщиной 40-50 см + 2 слоя 8-10 стержней Ø16-20 мм @4 м)
2	K <sub>10b2</sub> (Разрушен ная зона Разлома 35)	14+03	14+07	0.17 – 0.44	7	анкеры 5-6 м, Интервал 1.3м	150-250 мм с армирование м	RRS-II (торкрет-бетон толщиной 50 см + 2 слоя 6-10 стержней Ø20 мм @4 м)
3	Разлом 35	14+07	14+28	0.017 – 0.028	8	анкеры 5-6 м, Интервал 1.1м	>250 мм с армирование м	RRS-III (торкрет-бетон толщиной 55 см + 2 слоя 6-10 стержней Ø20 мм @2.5 м)
4	K <sub>1kg</sub> (Разрушен ная зона Разлома 35)	14+28	14+37	0.17 – 0.44	7	анкеры 5-6 м, Интервал 1.3м	150-250 мм с армирование м	RRS-II (торкрет-бетон толщиной 50 см + 2 слоя 6-10 стержней Ø16-20 мм @4 м)
5	K <sub>1kg</sub> (Разрушен ная зона Разлома 35)	14+37	14+60	0.17 – 0.44	6 до 7	анкеры 4-5 м, Интервал 1.3м	120-150 мм с армирование м	RRS-I - RRS-II (торкрет- бетон толщиной 40-50 см + 2 слоя 8-10 стержней Ø16-20 мм @4 м)
6	K <sub>1kg</sub> и второстеп. разлом	14+60	14+88	0.25 – 0.63	6	анкеры 4-5 м, Интервал 1.4м	120-150 мм с армирование м	RRS-I (торкрет-бетон толщиной 35 см + 1 - 2 слоя 6-8 стержней Ø16- 20 мм @4 м
7	K <sub>1kg</sub> и главный разлом	14+88	15+07	0.61 – 1.33	5	анкеры 4-5 м длинной, Интервал 1.8 м	90-120 мм с армирование м	Не требуется
8	K <sub>1mg1</sub> и второстеп. разлом	15+07	15+38	0.25 – 0.63	6	анкеры 4-5 м, Интервал 1.4м	120-150 мм с армирование м	RRS-I (торкрет-бетон толщиной 35 см + 1 - 2 слоя 6-8 стержней Ø16- 20 мм @4 м
9	K <sub>1mg1</sub> и главный разлом	15+38	15+89	0.92 – 1.78	5	анкеры 4-5 м длинной, Интервал 1.7 м	90-120 мм с армирование м	Не требуется

**Продолжение таблица 4.6. Выбранные системы крепи породы для  
безнапорных туннелей СТ4 с использованием откорректированной диаграммы Q-  
Support, актуализированной в 2015**

10	K <sub>1mg1</sub> и главный разлом	15+89	16+14	0.31– 0.59	6	анкеры 4-5 м, Интервал 1.4м	120-150 мм с армирование м	RRS-I (торкрет-бетон толщиной 35 см + 1 - 2 слоя 6-8 стержней Ø16- 20 мм @4 м
11	K <sub>1mg1</sub> и главный разлом	16+14	16+21	0.92 – 1.78	5	анкеры 4-5 м длиной, Интервал 1.7 м	90-120 мм с армирование м	Не требуется
12	K <sub>1mg2</sub> и второстеп. разлом	16+21	16+70	0.22 – 0.63	6	анкеры 4-5 м, Интервал 1.4м	120-150 мм с армирование м	RRS-I (торкрет-бетон толщиной 35 см + 1 - 2 слоя 6-8 стержней Ø16- 20 мм @4 м
13	K <sub>1mg3</sub> и второстеп. разлом	16+70	17+16	0.22 – 0.63	6	анкеры 4-5 м, Интервал 1.4м	120-150 мм с армирование м	RRS-I (торкрет-бетон толщиной 35 см + 1 - 2 слоя 6-8 стержней Ø16- 20 мм @4 м

\* В ячейках таблицы, выделенных желтым цветом, показаны значения Q , при которых учитывались Jn x 3 с учетом Т-образного соединения в подземной проходке или подсоединения к другим сооружениям.

### **4.3. Проект крепи породы для потенциально неустойчивых клиньев**

В качестве второго этапа проектирования крепи породы для безнапорных тоннелей СТ-4 была проверена устойчивость потенциально нестабильных клиньев в своде и стенах этих тоннелей. К потенциально неустойчивым клиньям в ходе анализа были применены меры по их стабилизации в виде торкретбетона и использования анкерных болтов до достижения необходимого запаса прочности. Анализ проводили при помощи программного обеспечения, UNWEDGE ver. 3.0, разработанного компанией RocScience Co. (Торонто, Канада) и работающего по методу предельного равновесия. Входные данные и результаты анализа клиньев представлены в следующих абзацах.

Для анализа UNWEDGE были взяты самые крупные четырехгранные клинья, которые теоретически могут образоваться при взаимном пересечении 3 систем несплошностей с учетом протяженности трещин, указанной в таблица 2.1. Глава 2 диссертации.

Поскольку на практике нагрузку от породы воспримет торкрет-бетон первых стадий твердения (через 3-4 часа после его нанесения), то в



программе Unwedge неограниченная прочность на сжатие и сопротивление сдвигу торкрет-бетона были приняты на уровне 5 МПа и 0,7 МПа, соответственно.

Согласно критериям проектирования правобережных сооружений [37], после установки крепи породы минимальный запас прочности для потенциально неустойчивых клиньев в своде и стенах составит 1,2 для нормальных и необычных условий нагрузки, а в исключительных условиях нагрузки он должен быть равен не менее 1.1.

Анализ устойчивости потенциально нестабильных клиньев в породах, окружающих безнапорные тоннели СТ-4, в различных сечениях выполнялись как с использованием крепи породы, так и без таковой. В таблица 4.7 приведены ориентации основных несплошностей, использованных для анализа СТ-4 методом Unwedge.

**Таблица 4.7.** Ориентация основных несплошностей, использованных в расчетах UnWedge безнапорных тоннелей СТ-4

Несплошность №	Тип несплошн.	Направл угол падения (°)	Соответствующие типовые сечения безнапорных тоннелей
1	Напластование (J1)	127/70	Все типы
2	J2	056/42	Все типы
3	J3	222/45	Все типы
4	J4	322/39	Все типы
5	Разлом	010/30	Тип XX, XXI & XXII
6	Разлом	080/40	Тип XX, XXI, XXII & XXIII
7	Разлом	270/30	Тип D4-I, D4-II, D4-IIIa & D4-IV
8	Разлом	325/30	Тип D4-IIIa
9	Разлом	340/40	Тип D4-II & D4-IIIa
10	Разлом	320/40	Тип D4-II & D4-IIIa
11	Разлом	305-310/30	Тип D4-IIIa
12	Разлом	030/40	Тип D4-I & D4-II
13	Разлом	220/45	Тип D4-I, D4-II, D4-VI & D4-VII
14	Разлом	300/60	Тип D4-IV
15	Разлом	220/30	Тип D4-I, D4-II & D4-VI
16	Разлом	355/40	Тип D4-II & D4-VI
17	Разлом	220/10	Тип D4-II & D4-VII
18	Разлом	250/40	Тип D4-II
19	Разлом	300/45	Тип D4-II
20	Разлом	050/40	Тип D4-II & D4-VII

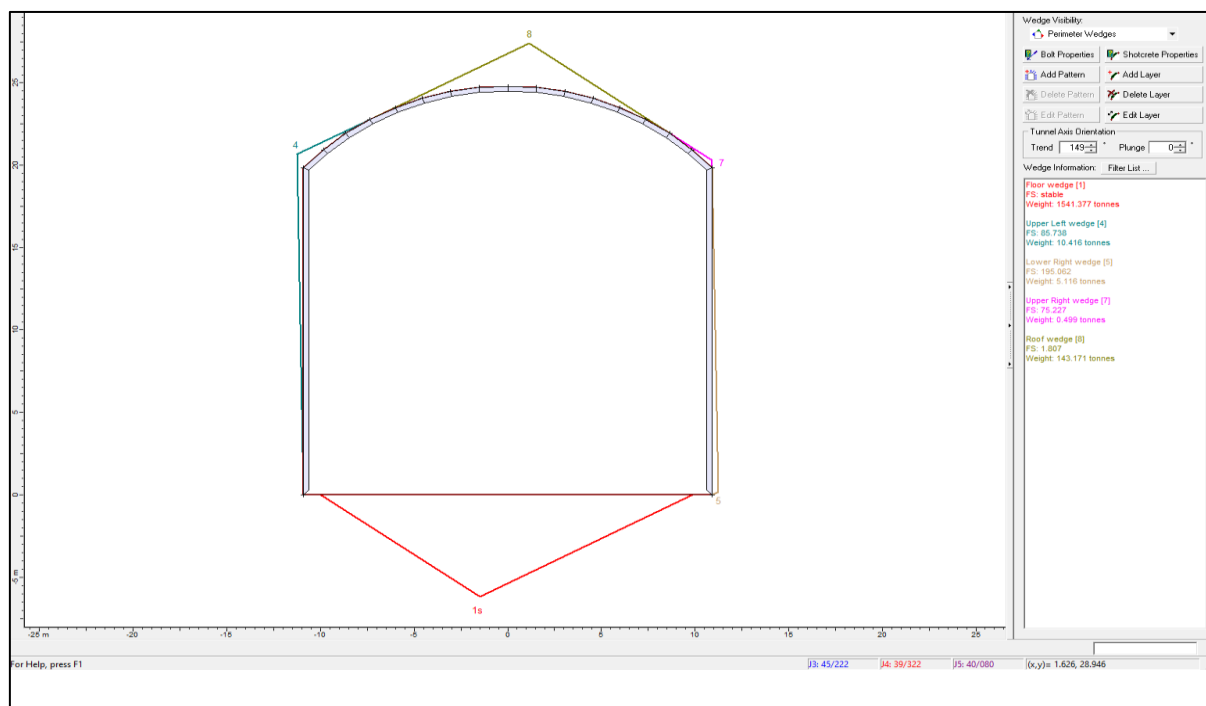
Результаты анализа клиньев в породных массивах, вмещающих безнапорные тоннели СТ-4, образующихся в результате взаимного пересечения крупных

несплошностей (плоскостей напластования, систем трещин и второстепенных разломов) сведены в таблице 4.8. Первичная система крепи для стабилизации клиньев представляет собой торкретбетон толщиной 5-10 см.

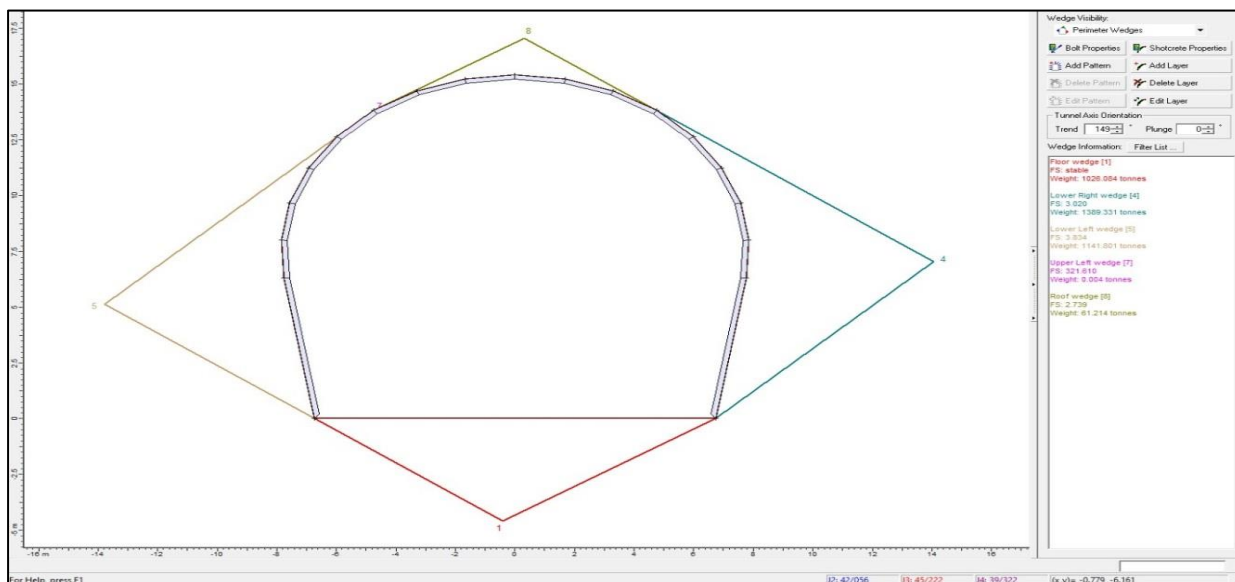
**Таблица 4.8.** Результаты расчетов Unwedge клиньев, образованных в результате пересечения основных несплошностей в массивах, вмещающих безнапорные тоннели СТ-4.

№	Сечение	Пикетаж (м)		Азимут тоннеля (°)	Комбинация трещин	Сейсм. нагрузка (PGA)	Запас прочност и без крепи	Вес клина [тонн]	Первичная крепь	Запас прочности после первичной крепи
		СТ4-А	СТ4-В							
1	Типы XX, XXI, XXII &	Пк 13+82 до 14+03	Пк 13+82 до 14+03	N149	3-4-6	0	0.00	143.17	Торкрет-бетон толщиной 10 см	2.24
						0.27g	0.00			1.81
2	Типы D4- I & D4- II	Пк 14+88 до 14+91, Пк 15+07 до 15+38 & Пк 16+05 до 16+27	Пк 15+07 - 15+59, Пк 15+75 до 15+95, Пк 16+05 до 16+27 & Пк 16+43 до 16+95	N149	2-3-4	0	0.00	61.21	Торкрет-бетон толщиной 5 см	3.41
						0.27g	0.00			2.74
3	Типы D4-I, D4- II & D4-	Пк 14+38 до 14+88, Пк 15+38 до 15+59 & Пк 15+75 до 15+95	-	N149	2-3-7	0	0.00	83.85	Торкрет-бетон толщиной 5 см	2.85
						0.27g	0.00			2.28
4	Тип D4-II	Пк 16+43 до 16+96	-	N149	1-2-18	0	0.00	148.66	Торкрет-бетон толщиной 10 см	2.45
						0.27g	0.00			1.98
5	Типы D4-II & D4-	-	Пк 14+43 до 14+91	N149	2-3-10	0	0.00	66.06	Торкрет-бетон толщиной 5 см	3.22
						0.27g	0.00			2.58
6	Типы D4- IV, D4-V &	Пк 14+91 до 15+07 & Пк 16+27 до 16+43	Пк 14+91 до 15+07, Пк 16+27 до 16+43 & Пк 16+95 до 17+07	N149	2-3-4	0	0.00	62.30	Торкрет-бетон толщиной 5 см	3.12
						0.27g	0.00			2.50
7	Тип D4- IV	Пк 15+59 до 15+75	-	N149	2-3-7	0	0.00	74.39	Торкрет-бетон толщиной 5 см	2.86
						0.27g	0.00			2.30
8		-	Пк 15+59 до 15+75	N149	2-3-14	0	0.00	92.55		2.27

Примеры потенциальных клиньев в своде и стенах безнапорных тоннелей СТ-4, которые могут образоваться в результате пересечения основных систем трещин и второстепенных разломов, а также необходимая система крепи породы для стабилизации этих клиньев показаны на рисунок 4.1.



а)



б)

**Рисунок 4.1.** Примеры потенциальных клиньев, которые могут сформироваться в своде и стенах безнапорных тоннелей СТ-4 и система крепи, необходимая для стабилизации данных клиньев: а) в связи с пересечением систем основных трещин J3 & J4 и разлома 080°/40°, б) в связи с пересечением систем основных трещин J2, J3 и J4

#### **4.4. Анализ системы крепи с использованием К-Э моделирования**

В качестве последнего этапа проектирования крепи породы для безнапорных тоннелей СТ-4 (от пикета 13+82м до 17+16м тоннеля СТ4) было выполнено математическое моделирование данных тоннелей с исследованием напряжения породы после проходки СТ-4 и после установки систем крепи породы. Для этого была использована программа для вычислений конечно-элементными методами RS2, вер. 9.0, разработанная RocScience Co. из Торонто, Канада. Данное программное обеспечение способно решать широкий спектр проблем, встречающихся в горной промышленности, а также при проектировании работ общестроительного характера. Безусловно, достоверность результатов работы любой программы зависит от методики моделирования и в особенности от точности входных данных. Чем более точные геологические параметры и параметры механики грунтов используются, тем более достоверные получаются результаты. Тем не менее, поскольку точное моделирование условий грунта, как правило, сопряжено с большими трудностями, если возможно вообще, то возникает неизбежное использование ряда упрощенных допущений.

При численном моделировании рассматриваемых безнапорных тоннелей использовались следующие общие допущения и критерии:

- породный массив представляет собой непрерывную среду и ведет себя как упруго-пластический материал;
- условие плоской деформации действительно для двумерных анализов;
- к породному массиву, вмещающему выемку, применимы критерии обрушения Хоека и Брауна;
- внешние границы моделей рассматривались на расстоянии, в пять раз превышающем диаметр выемки;
- разгрузка напряжения после проходки и перед установкой крепи рассчитывалась серией анализов конвергенции в Фазе<sup>2</sup>, как представлено в отчетах о проектировании Уровня 1 [61] и с использованием уравнения Влахопулоса и Дидерихса, 2009 [62];

-для активации сейсмической нагрузки на последнем этапе К-Э моделей использовалась процедура, предложенная проф. Г.Барла [63]. Пояснения по данной методике приводились в документе «Оценка существующих сооружений Рогунской ГЭС, анализ напряжения деривационного тоннеля 1», RP 46, Вар. А [64]. Согласно данной методике, к верхней и нижней внешним границам модели для достижения максимальных горизонтальных смещений на кромках границы прилагаются силы, действующие по горизонтальной прямой;

-в К-Э модели в качестве бетонной отделки моделируются торкрет-бетон и металлическая сетка или неармированный бетон, а также стальные ребра.

Учитывая геологические и геометрические условия породного массива в зоне безнапорных туннелей СТ-4, различные очертания и размер сечений, а также типы временных систем крепи породы, для анализа напряжения использовалось шесть К-Э моделей, как указано в таблица 4.9.

#### **4.4.1. К-Э анализ сечения 1 – Крепь породы типа D4-I на ПК. 15+50 м безнапорных тоннелей**

Для подковообразного сечения безнапорных тоннелей СТ-4 на ПК 15+50 м для СТ-4 в породном массиве класса I-a (сечение 1) была создана модель в месте, где планируется установить систему крепи породы типа D4-I, включающую торкрет-бетон толщиной 10 см с 1 слоем металлической сетки Ø6@150x150 мм, а также полностью цементируемые анкеры Ø32 мм, L=5.85 м @1.5x1.5 м. Размеры каждого безнапорного тоннеля в данной модели после проходки составляют 15,15 м в высоту и 15,20 м в ширину. Месторасположение находится в Мингбатманской формации – 1-я пачка (K1mg1), которая преимущественно представлена песчаником с переслоями алевролита и аргиллита.

Конечно-элементные расчеты безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 1 выполнялись в 11 этапов путем воспроизводства хода проходки и установки крепи породы как представлено в таблице 4.10.

В данном К-Э анализе породный массив  $K_{1mg1}$ , вмещающий СТ-4 моделировался как упруго-пластический материал, в пластическом состоянии которого его прочностные параметры снижаются.

**Таблица 4.9.** Местоположение и характеристики сечений безнапорных туннелей СТ4 для К-Э анализа

Сечение К-Э анализа	Тип крепи породы и Пикетаж	Класс крепи породы и геология	Временная крепь породы			
			Торкрет-бетон	Полностью цементируемый анкер	Стальное ребро	Неармир. бетон
1 Подкова	<b>D4-I</b> Пк 15+50м СТ4А	<b>Класс I-a</b> Песчаник в $K_{1mg1}$	10 см с WWF Ø6мм, @150×150 мм	Ø32 мм, L=5.8м @1.5×1.5 м	-	-
2 Подкова	<b>D4-II</b> Пк 15+20м СТ4А	<b>Класс III-a</b> Выветрелый песчаник $K_{1mg1}$	5 см	-	IPE 240 мм @1 м	30 см C25/30
3D- образное	D4-IV Пк 15+70м СТ4А	Класс I-a Песчаник в $K_{1mg1}$	10 см с WWF Ø6мм, @150×150 мм	Ø32 мм, L=5.85 м @1.5×1.5 м	-	-
4D- образное	<b>D4-V</b> Пк 16+40м СТ4А	<b>Класс III-b</b> Выветрелое чередование песчаника и алевролита в $K_{1mg2}$	5 см	-	IPE 240 мм @1 м	30 см C25/30
5D- образное	XX Пк 13+85м СТ4А & В	Класс I-a Песчаник в $K_{1ob2}$	5 см	Ø40 мм, L=7.80 м @1.5×1.0 м (боковые стены)	IPE 300 мм @1 м	35 см C25/30
6 Подкова	XXV Пк 14+30м СТ4А & В	Класс IV Зона разлома	5 см	Ø40 мм, L=7.80 м @1.5×1.0 м	IPE 300 мм @1 м (свод, стены и лоток)	35 см C25/30 (свод, стены и лоток)



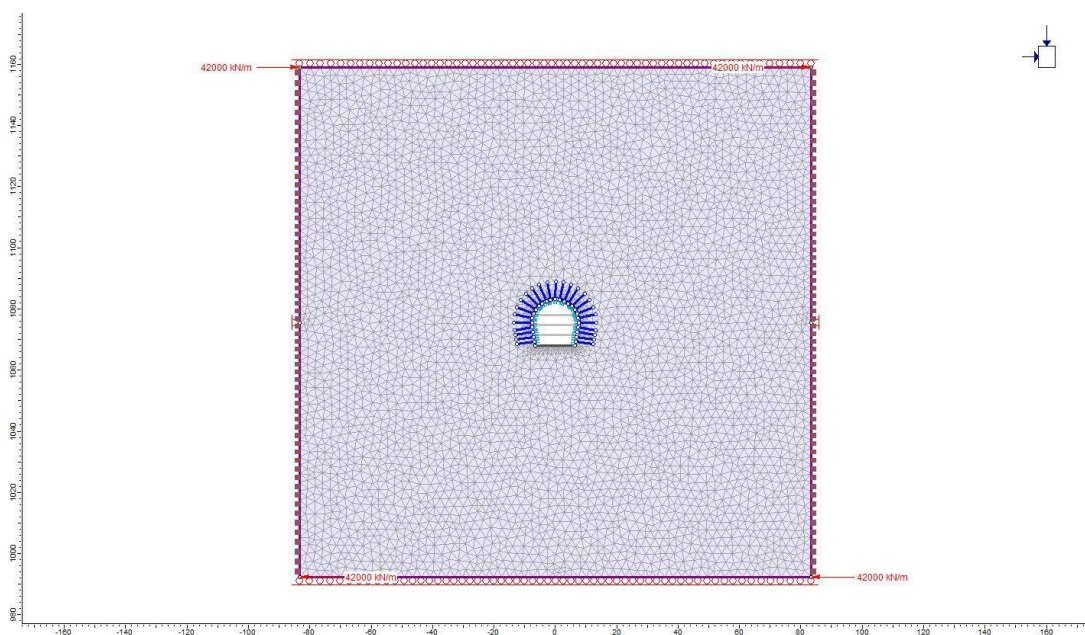
**Таблица 4.10.** Моделирования безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 1, класс крепи породы I-а (тип крепи породы D4-I) в 11 этапов, при  $PGA=0.27g$

Этапы	Description	Разгрузка напряжения при последовательных этапах проходки и установки крепи			
		Передовой забой	Уступ 1	Уступ 2	Уступ 3
Этап 1	Условие напряжения в поле с учетом упомянутых выше напряжений по месту (при мощности перекрывающего пласта 225 м), удельный вес 26 кН/м <sup>3</sup> , условия плоской деформации	-	-	-	-
Этап 2	Проходка свода	90%	-	-	-
Этап 3	Установка временной системы крепи породы в своде: 10 см армированный торкрет-бетон с 1 слоем WWF Ø6@150x150 мм и полностью цементируемые анкерные болты Ø32 мм, L=5.85 м @1.5x1.5 м	95%	-	-	-
Этап 4	Разработка грунта уступами 1	100%	90%	-	-
Этап 5	Установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 1	100%	95%	-	-
Этап 6	Разработка грунта уступами 2	100%	100%	90%	-
Этап 7	Установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 2	100%	100%	95%	-
Этап 8	Разработка грунта уступами 3	100%	100%	100%	90%
Этап 9	Установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 3	100%	100%	100%	95%
Этап 10	Завершение проходки и крепи породы	100%	100%	100%	100%
Этап 11	Активация сейсмической нагрузки эквивалентной расчетному землетрясению (ОВЕ) (ПУГ = 0.27г) путем приложения сил по горизонтальной прямой, равных 42 000 кН/м к верхней и нижней внешним границам модели	100%	100%	100%	100%

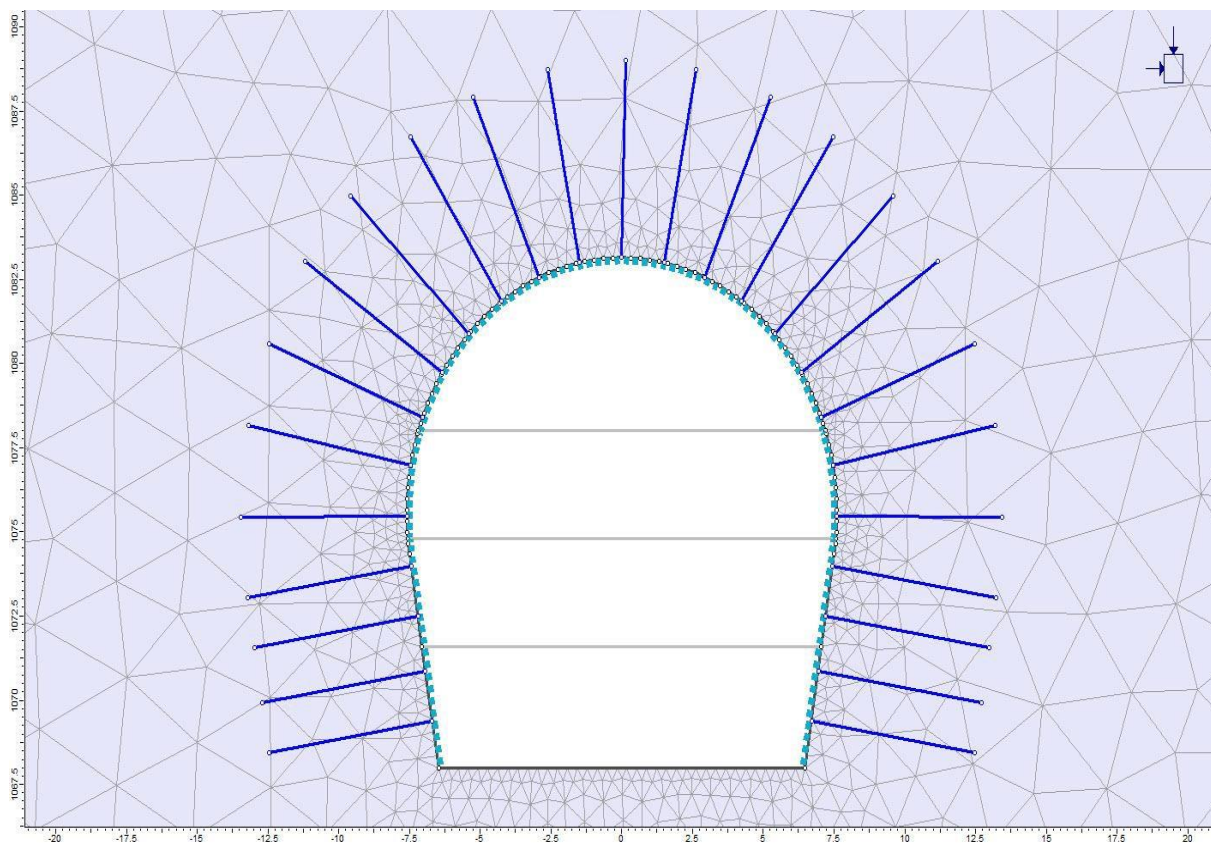
Общий вид К-Э модели СТ-4 в сечении один приведены на рисунок 4.2. при активации на этапе 11 с сейсмической нагрузкой (ПУГ=0.27г). План конечных элементов модели данного сечения на этапе 11 приведены на рисунок 4.3.

Коэффициенты прочности породного массива класса I-а, безнапорные тоннели СТ-4, и осевые усилия в обделке армированный торкретбетон на этапе 11 показаны на рисунок 4.4. На рисунок 4.5 показано общее смещение вокруг СТ-4 и осевые напряжения в анкерных болтах на этапе 11. Кроме того, на рисунок 4.6 показана несущая способность армированного бетона в обделке в данном сечении. Подробно результаты К-Э анализа, включая моделирование этапов строительства и результаты анализа в виде выходных данных программного обеспечения приведены в Приложении С.

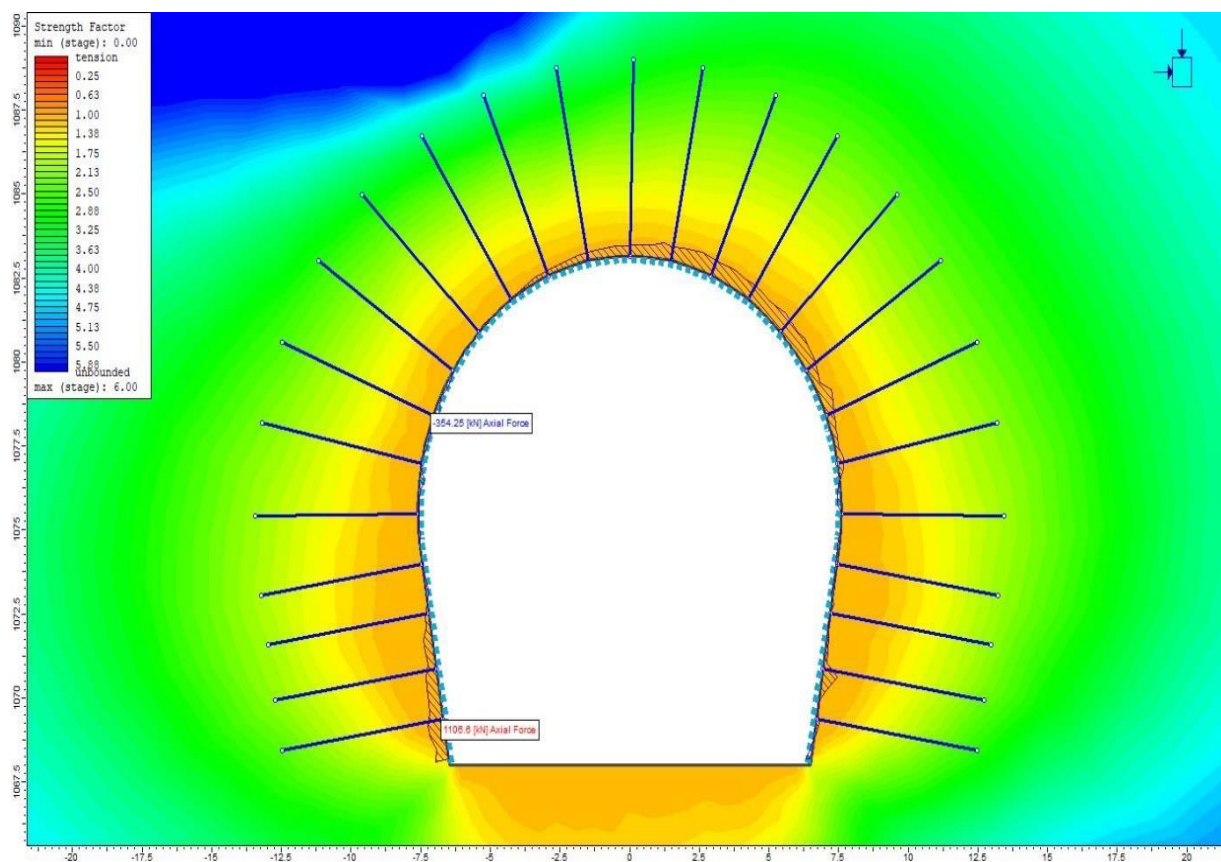
Анализ напряжения показал, что меры по временному укреплению породы, предусмотренные для данного сечения, будут сохранять свою функциональность на различных этапах ведения проходки. Необходимо отметить, что в связи с применением сейсмической нагрузки, равной землетрясению, которое может произойти во время проходки безнапорных тоннелей СТ-4 ( $OBE = 0,27g$ ), достижение устойчивости этих тоннелей в данном сечении 1 является возможным и тоннель после приложения такой нагрузки останется в работоспособном состоянии.



**Рисунок 4.2.** Общий вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 1

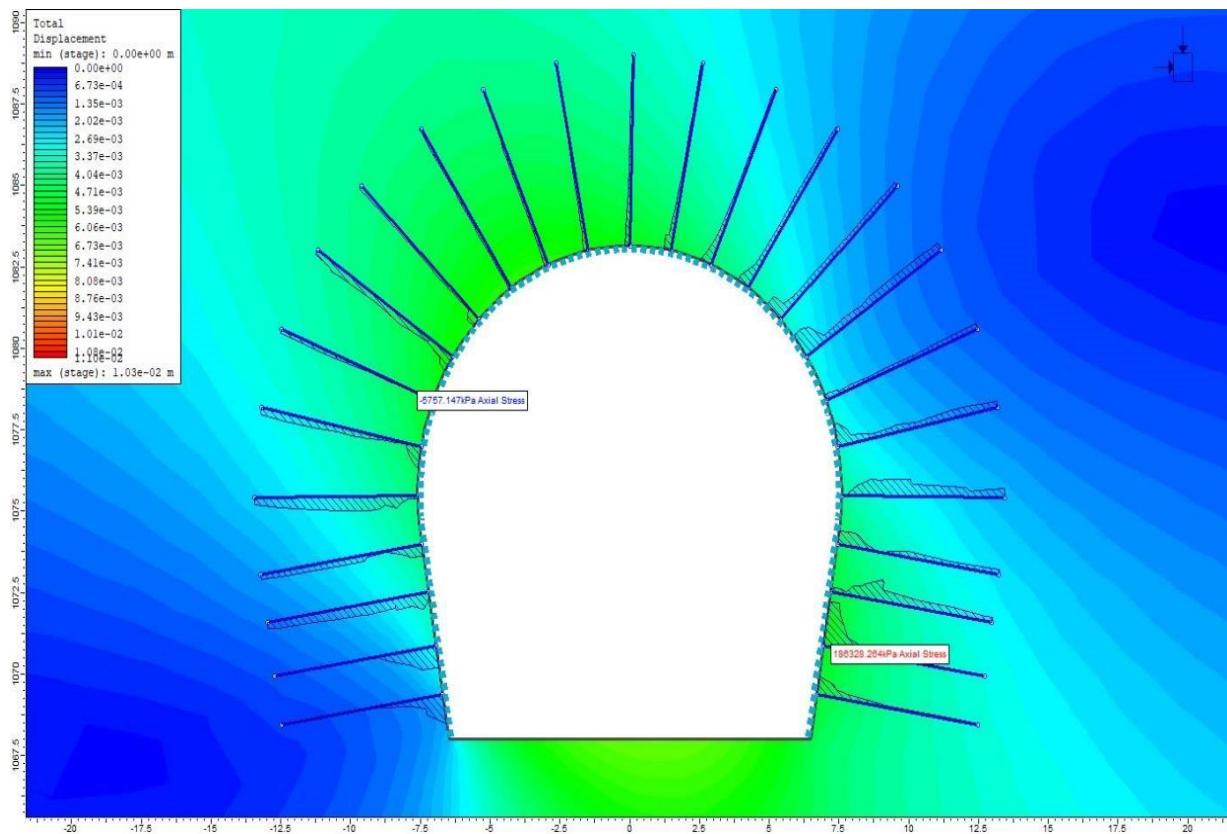


**Рисунок 4.3.** Укрупненный вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 1 - Этап 11

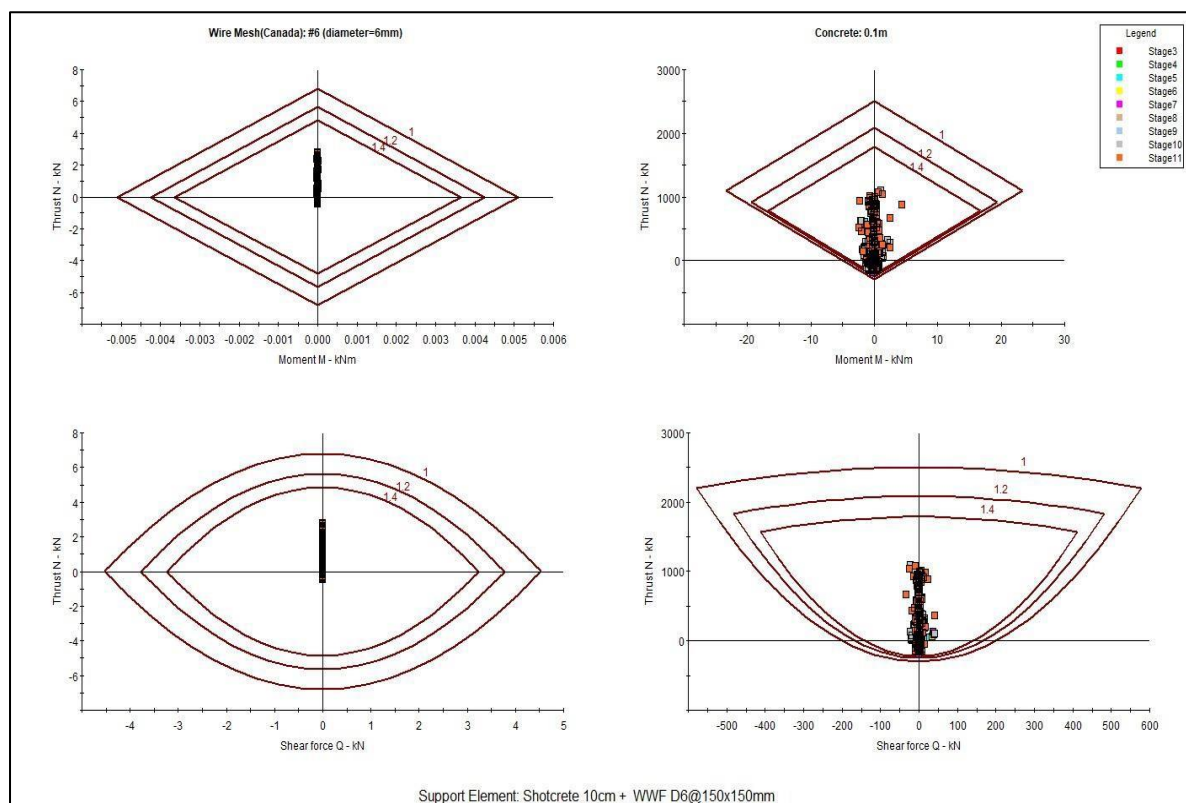


**Рисунок 4.4.** Коэффициенты прочности в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые силы в обделке в сечении 1 - Этап 11





**Рисунок 4.5.** Общие смещения в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах в сечении 1 - Этап 11



**Рисунок 4.6.** Несущая способность армированного торкрет-бетона в обделке в сечении 1 безнапорных тоннелей СТ-4

#### **4.4.2. К-Э анализ сечения 2 – Крепь породы типа D4-II на ПК. 15+20 м безнапорных тоннелей**

Для подковообразного сечения безнапорных тоннелей СТ-4 на ПК 15+20 м для СТ-4 в породном массиве класса III-а (сечение 2) была создана модель в месте, где планируется установить систему крепи породы типа D4-II включающую торкрет-бетон толщиной 5 см, неармированный бетон толщиной 30 см C25/30 и стальное ребро IPE240 мм @1.0 м. Размеры каждого безнапорного тоннеля в данной модели после проходки составляют 15.40 м в высоту и 15.70 м в ширину. Месторасположение находится в Мингбатманской формации – 1-я пачка (K1mg1), которая преимущественно представлена песчаником с переслоями алевролита и аргиллита.

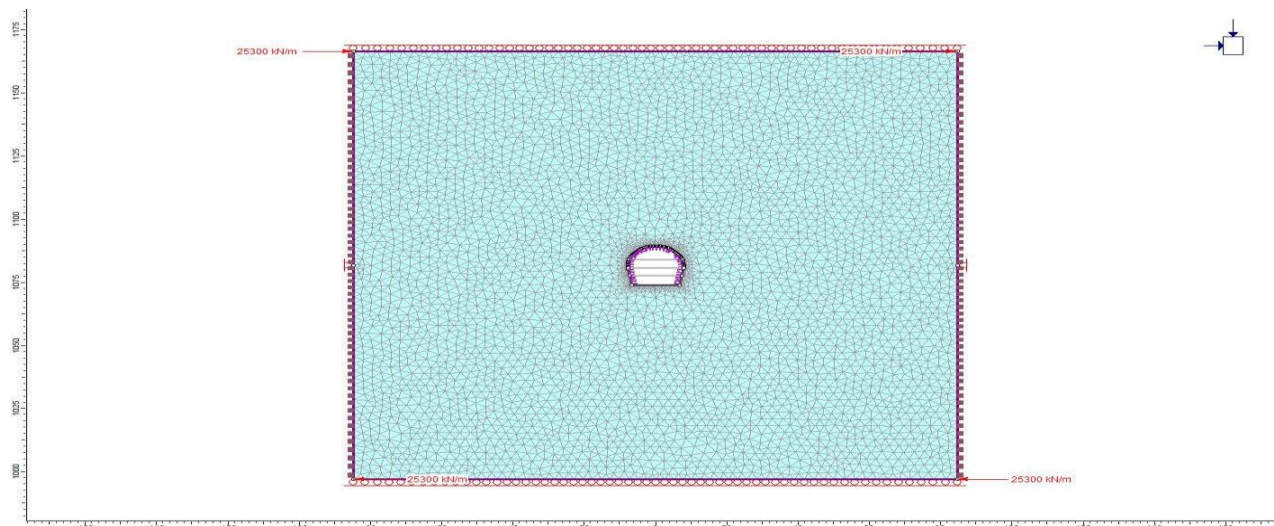
Для активации сейсмической нагрузки на 11<sup>th</sup> этапе модели, к верхней и нижней внешним границам модели были приложены силы, действующие по горизонтальной прямой и равные 25'300 кН/м, чтобы получить максимальные горизонтальные смещения в 0.0231 м на краях границ.

Рисунок 4.7 показывает общий вид К-Э модели СТ4-БНТ в сечении 2 при активации сейсмической нагрузки на этапе 11 (PGA=0.27g). Укрупненный вид К-Э модели в данном сечении на этапе 11 показан на рисунок 4.8.

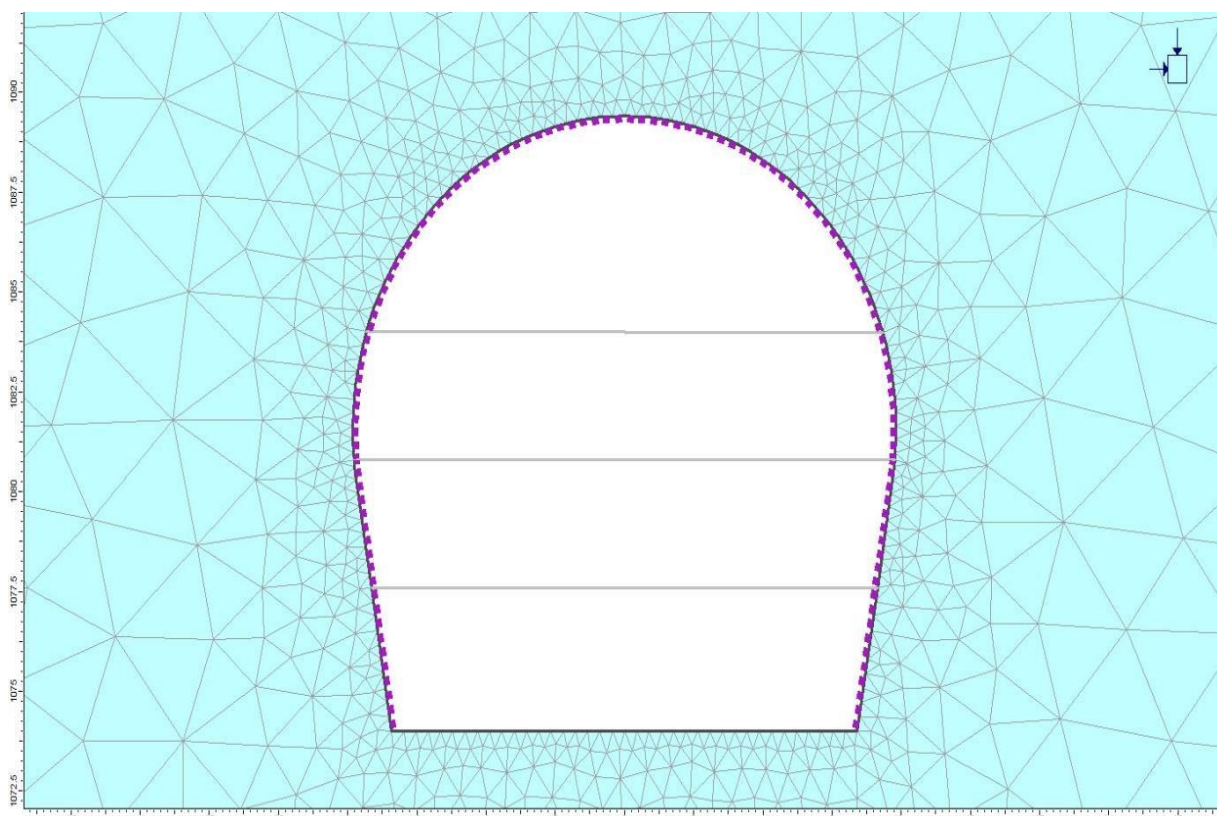
Коэффициенты устойчивости в скальном грунте класса III-а вмещающие безнапорные тоннели СТ-4 и осевые усилия в обделке (неармированный бетон и стальное ребро) на этапе 11 показаны на рисунок 4.9. Общие смещения вокруг СТ-4 на этапе 11 показаны на рисунок 4.10. Также, на рисунок 4.11 приведена несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в данном сечении. Детали К-Э анализа, включая моделирование этапов строительства и результаты в виде результатов вычислений программного обеспечения приведены в Приложении С.

Анализ напряжения показал, что меры по временному укреплению породы, предусмотренные для данного сечения, будут сохранять свою функциональность на различных этапах ведения проходки. Необходимо отметить, что в связи с применением сейсмической нагрузки, равной землетрясению,

которое может произойти во время проходки безнапорных тоннелей ( $OBE = 0.27g$ ), достижение устойчивости этих тоннелей в данном сечении 2 является возможным и тоннель после приложения такой нагрузки останется в работоспособном состоянии.

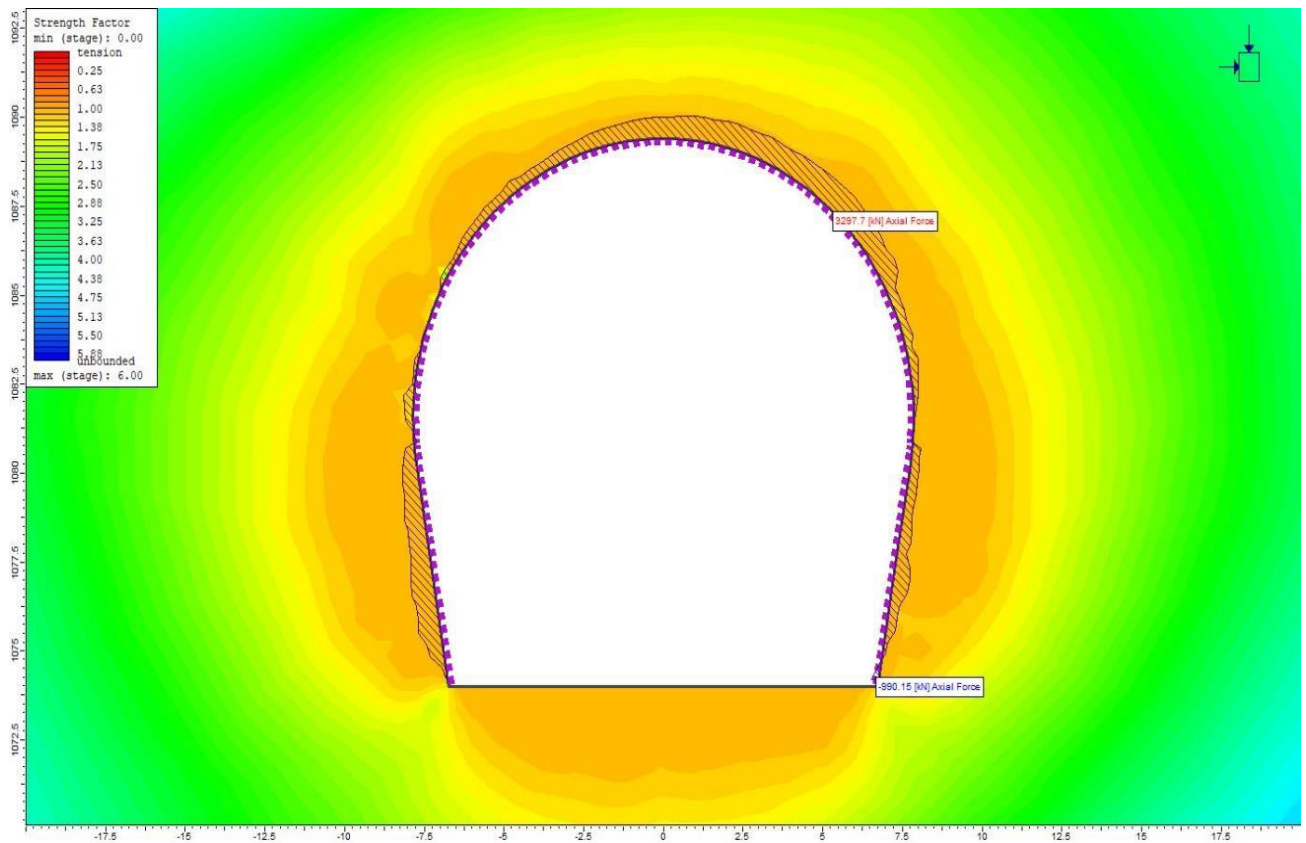


**Рисунок 4.7.** К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 2, класс породного массива III-а, тип крепи породы D4-II включая торкрет-бетон толщиной 5 см, 30 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE240 мм @1.0 м - Этап 11

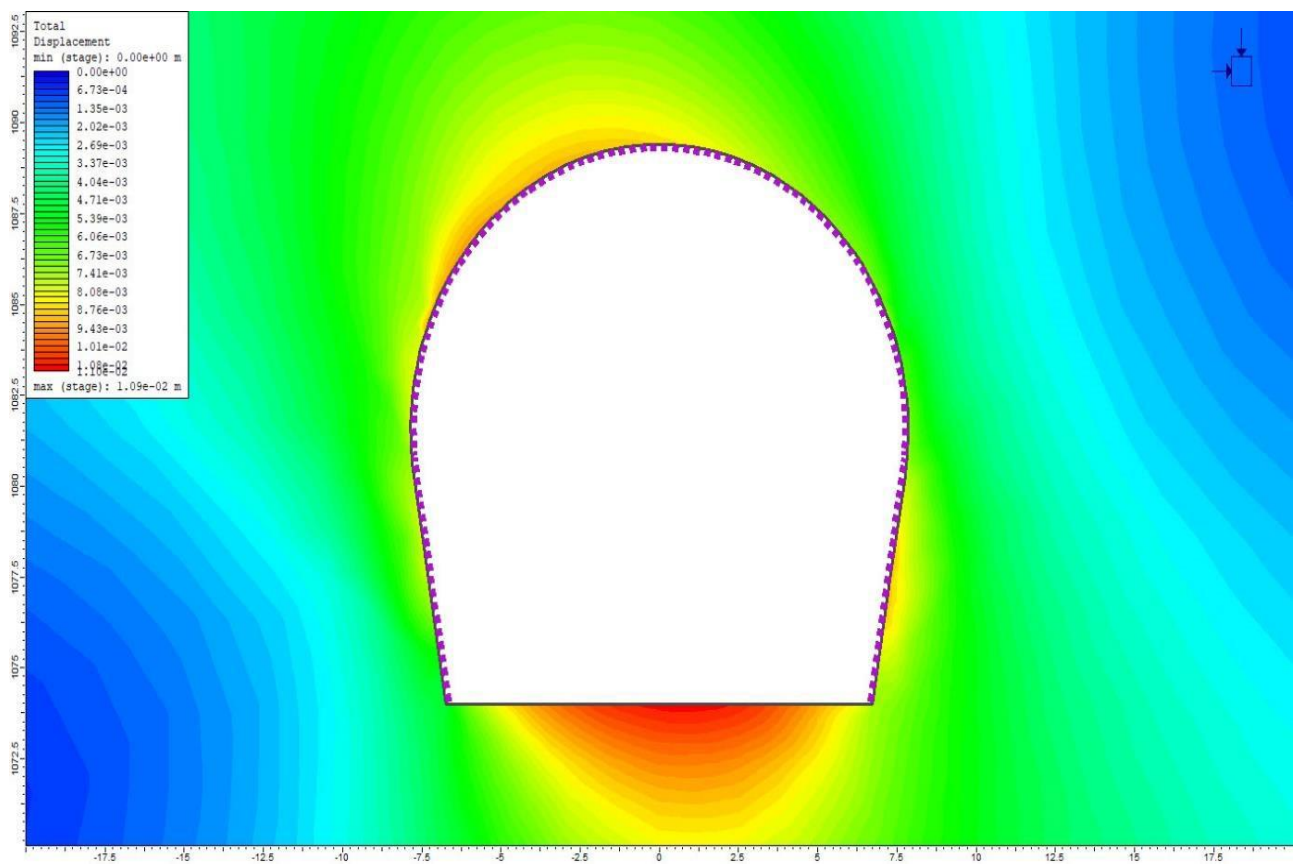


**Рисунок 4.8.** Укрупненный вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 2 - Этап 11

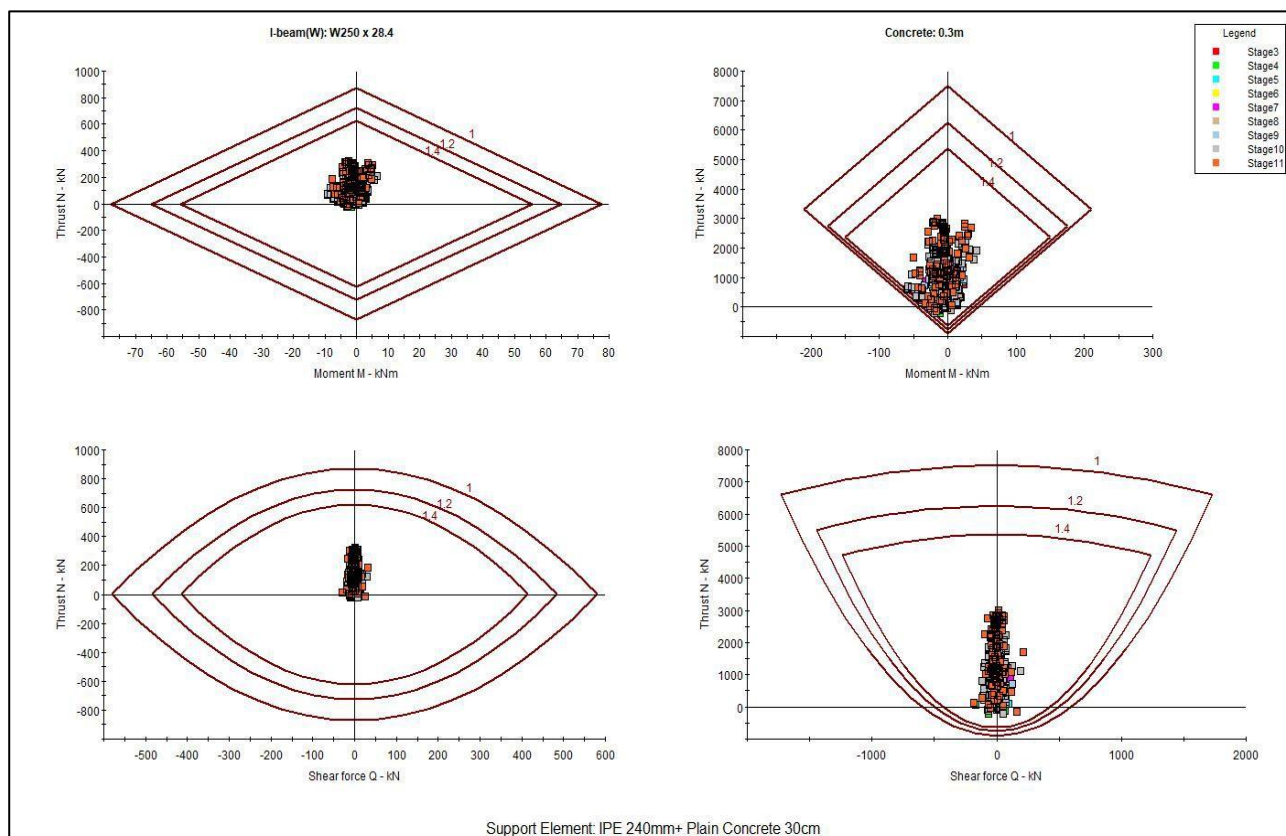




**Рисунок 4.9.** Коэффициенты прочности в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые силы в обделке в сечении 2 - Этап 11



**Рисунок 4.10.** Общие смещения в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 2 - Этап 11



**Рисунок 4.11.** Несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в сечении 2 безнапорных тоннелей СТ-4

#### 4.4.3. К-Э анализ сечения 3 – Крепь породы типа D4-IV на ПК. 15+70 м безнапорных тоннелей

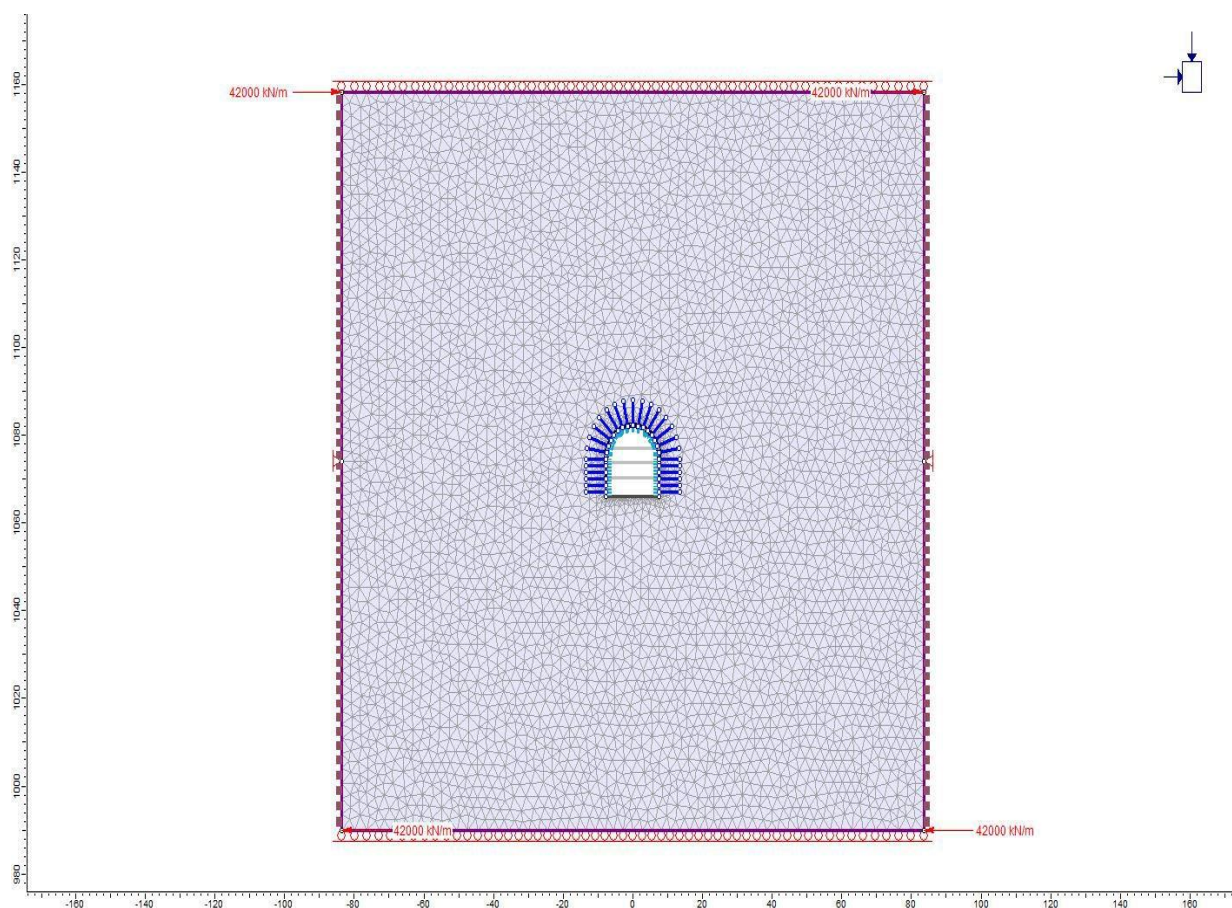
Данная модель была создана для D-образного сечения безнапорных тоннелей СТ-4 на ПК. 15+70 м для тоннеля СТ4-А и СТ4-В в породном массиве класса I-a (сечение 3), где планируется установка крепи породы D4-IV включая торкрет-бетон толщиной 10 см с 1 слоем металлической сварной сетки  $\varnothing 6@150 \times 150$  мм и полностью цементируемые анкерные болты  $\varnothing 32$  мм,  $L=5.85$  м @  $1.5 \times 1.5$  м. Размеры каждого безнапорного тоннеля в данной модели после проходки составляют 16.20 м в высоту и 15.20 м в ширину.

Рисунок 4.12 показывает общий вид К-Э модели С-Т4 в сечении 3 при активации сейсмической нагрузки на этапе 11 ( $PGA=0.27g$ ). Укрупненный вид К-Э модели в данном сечении на этапе 11 показан на рисунок 4.13.

Коэффициенты устойчивости в скальном грунте класса I-a, залегающем вокруг безнапорных тоннелей, и осевые силы в обделке (армированный торкрет-бетон) на этапе 11 показаны на рисунок 4.14. Общие смещения вокруг

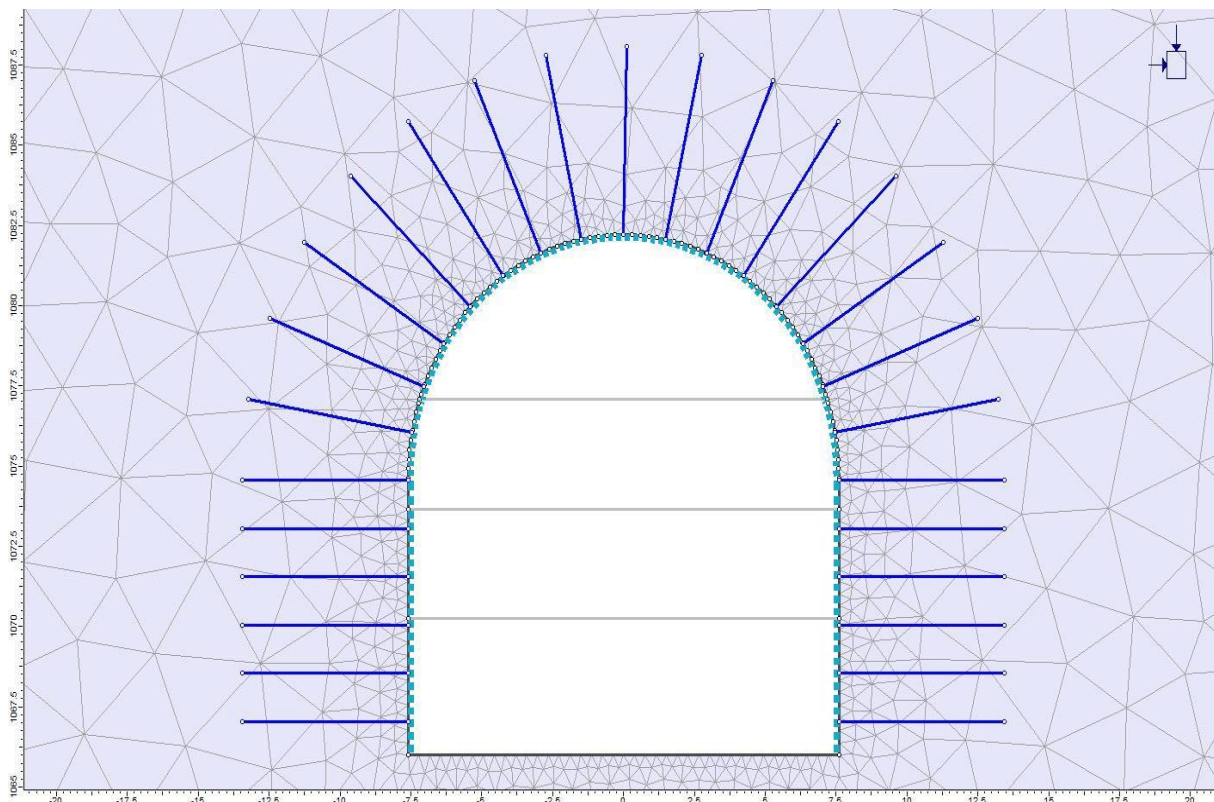
СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах на этапе 11 показан на рисунок 4.15. Кроме того, на рисунок 4.16 представлена несущая способность армированного торкрет-бетона в обделке в данном сечении. Детали К-Э анализа, включая моделирование этапов строительства и результаты в виде результатов вычислений программного обеспечения приведены в Приложении С.

Анализ напряжения показал, что меры по временному укреплению породы, предусмотренные для данного сечения, будут сохранять свою функциональность на различных этапах ведения проходки. Необходимо отметить, что в связи с применением сейсмической нагрузки, равной землетрясению, которое может произойти во время проходки безнапорных тоннелей ( $OBE = 0.27g$ ), устойчивость данных тоннелей в сечении 3 достигнута, может быть, и тоннели сохраняют функциональность после такой нагрузки.

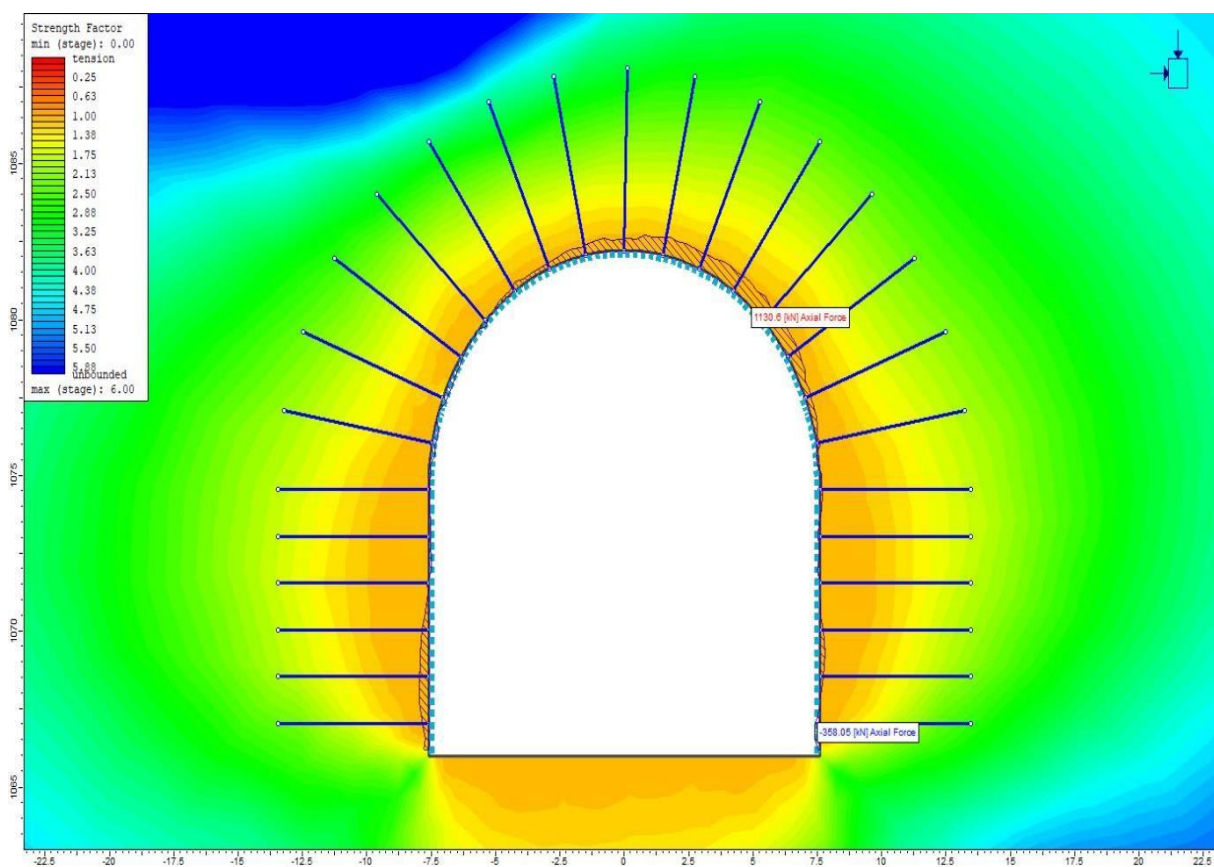


**Рисунок 4.12.** Общий вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 3, класс породного массива I-a, тип крепи породы D4-IV включая 10 см армированный торкрет-бетон с 1 слоем WWF Ø6@150x150 мм и полностью цементируемые анкерные болты Ø32 мм, L=5.85 м @1.5x1.5 м - Этап 11

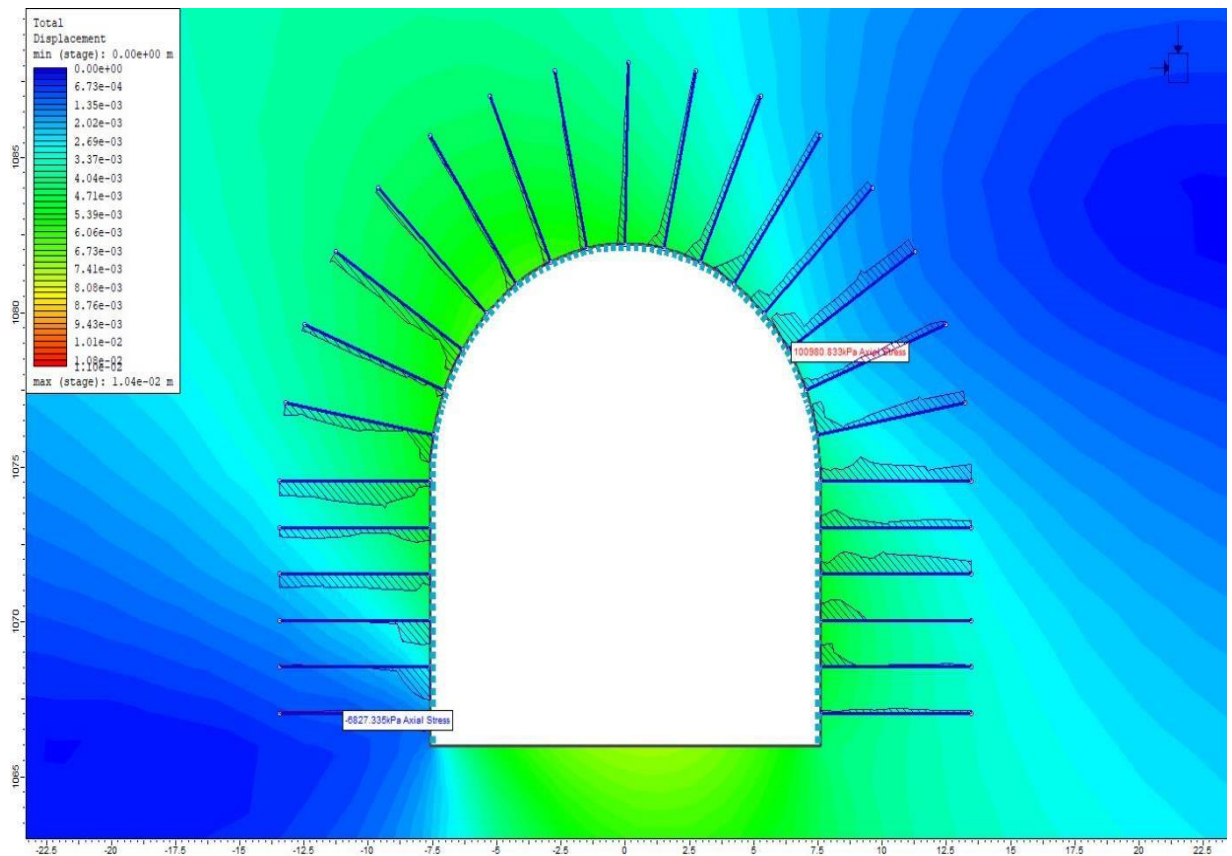




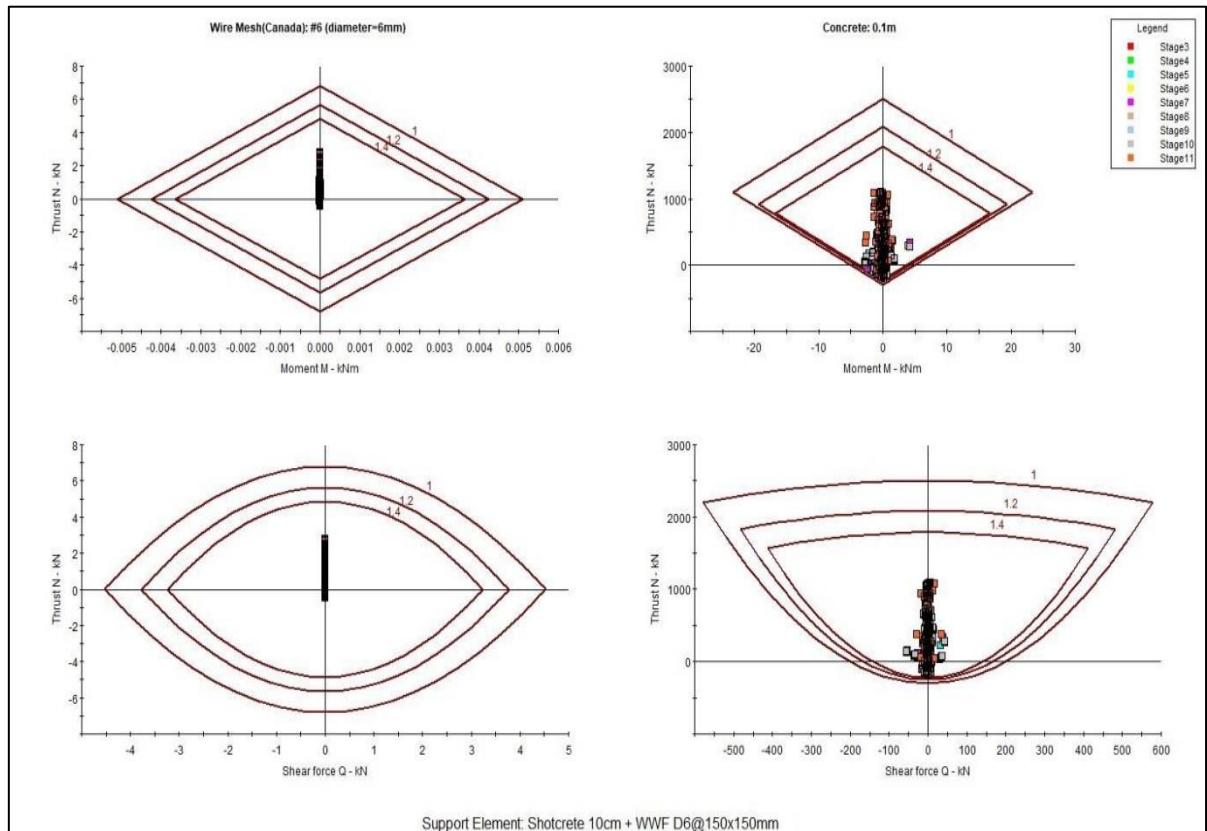
**Рисунок 4.13.** Укрупненный вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 3 - Этап 11



**Рисунок 4.14.** Коэффициенты прочности в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые усилия в обделке в сечении 3 - Этап 11



**Рисунок 4.15.** Общие смещения в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах в сечении 3 - Этап 11



**Рисунок 4.16.** Несущая способность армированного торкрет - бетона в обделке в сечении 3 безнапорных тоннелей СТ-4

#### **4.4.4. К-Э анализ сечения 4 – Крепь породы типа D4-V на ПК. 16+40 м безнапорных тоннелей**

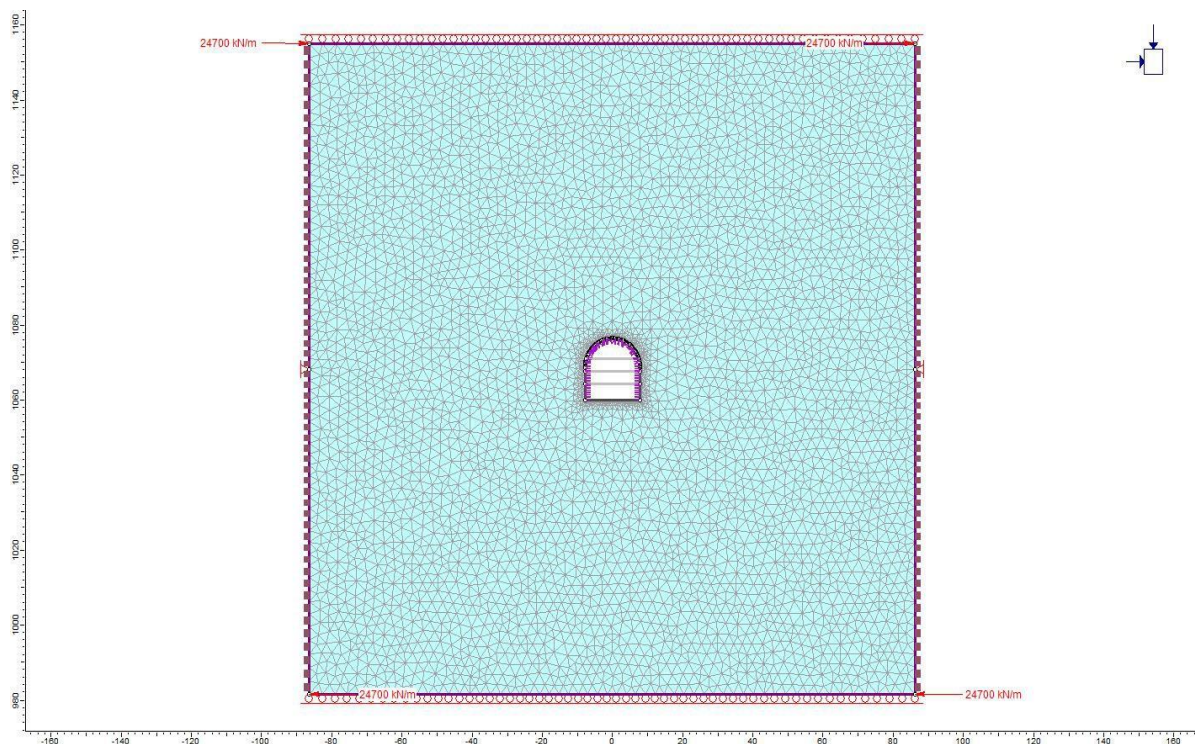
Данная модель была создана для D-образного сечения безнапорных тоннелей СТ4 на ПК. 16+40 м для СТ4-А и СТ4-В в породном массиве класса III-b (сечение 4) где планируется установка крепи породы типа D4-V, включая торкрет-бетон толщиной 5 см, неармированный бетон C25/30 толщиной 30 см и стальное ребро IPE240 мм @1.0 м. Размеры каждого безнапорного тоннеля в данной модели после проходки составляют 16.45м в высоту и 15.70м в ширину. Месторасположение - выветрелый разгруженный грунт мингбатманской формации - 2-я пачка (K1mg2), сложенная преимущественно чередованиями песчаника, алевролита и аргиллита.

Рисунок 4.17 показывает общий вид К-Э модели СТ4-БНТ в сечении 4 при активации сейсмической нагрузки на этапе 11 ( $PGA=0.27g$ ). Укрупненный вид К-Э модели в данном сечении на этапе 11 показан на 4.18.

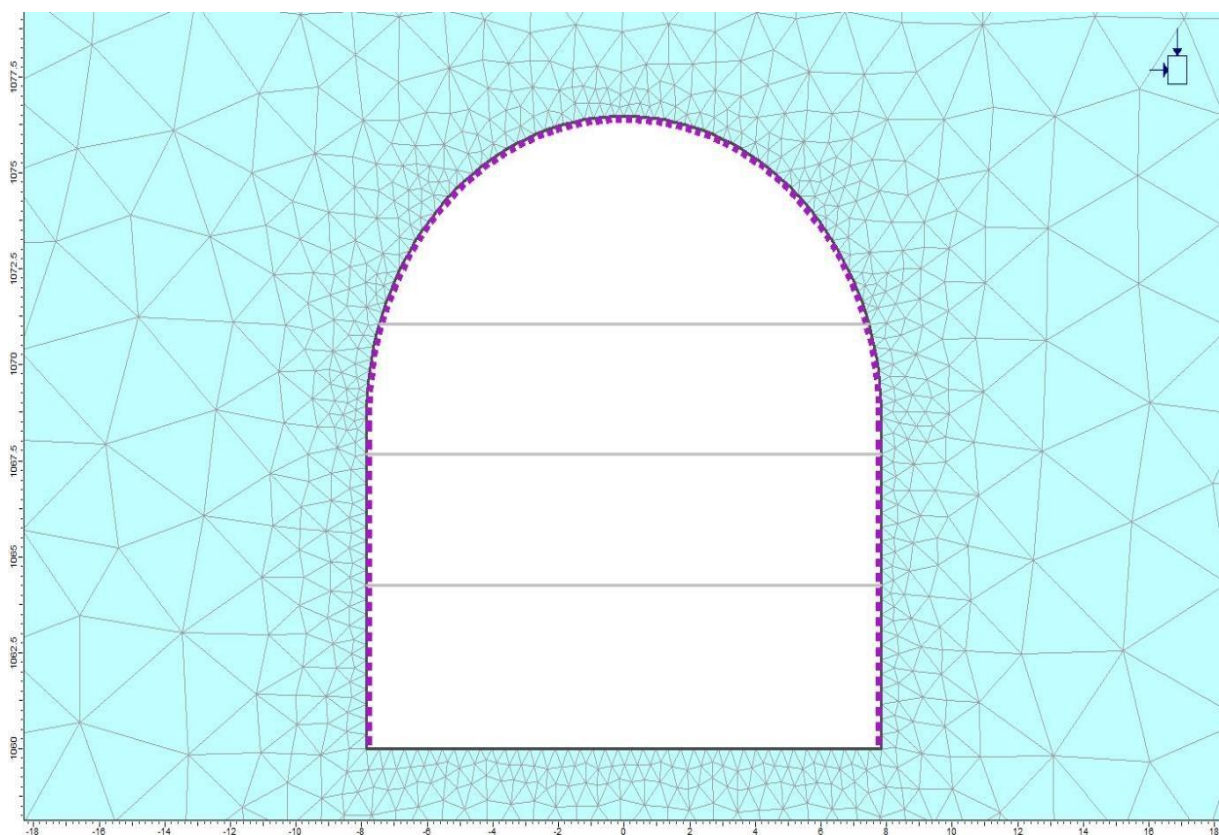
Коэффициенты устойчивости в скальном грунте класса III-b залегающем вокруг безнапорных тоннелей и осевые силы в обделке (неармированный бетон и стальное ребро) на этапе 11 показаны на рисунок 4.19. Общие смещения вокруг СТ-4 на этапе 11 показан на рисунок 4.20. Кроме того, несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в данном сечении представлена на рисунок 4.21. Детали К-Э анализа, включая моделирование этапов строительства и результаты в виде результатов вычислений программного обеспечения приведены в Приложении С.

Анализ напряжения показал, что меры по временному укреплению породы, предусмотренные для данного сечения, будут сохранять свою функциональность на различных этапах ведения проходки. Необходимо отметить, что в связи с применением сейсмической нагрузки, равной землетрясению, которое может произойти во время проходки безнапорных тоннелей ( $OBE = 0.27g$ ), устойчивость этих тоннелей в сечении 4 достигнута, может быть, и тоннели сохраняют функциональность после такой нагрузки.

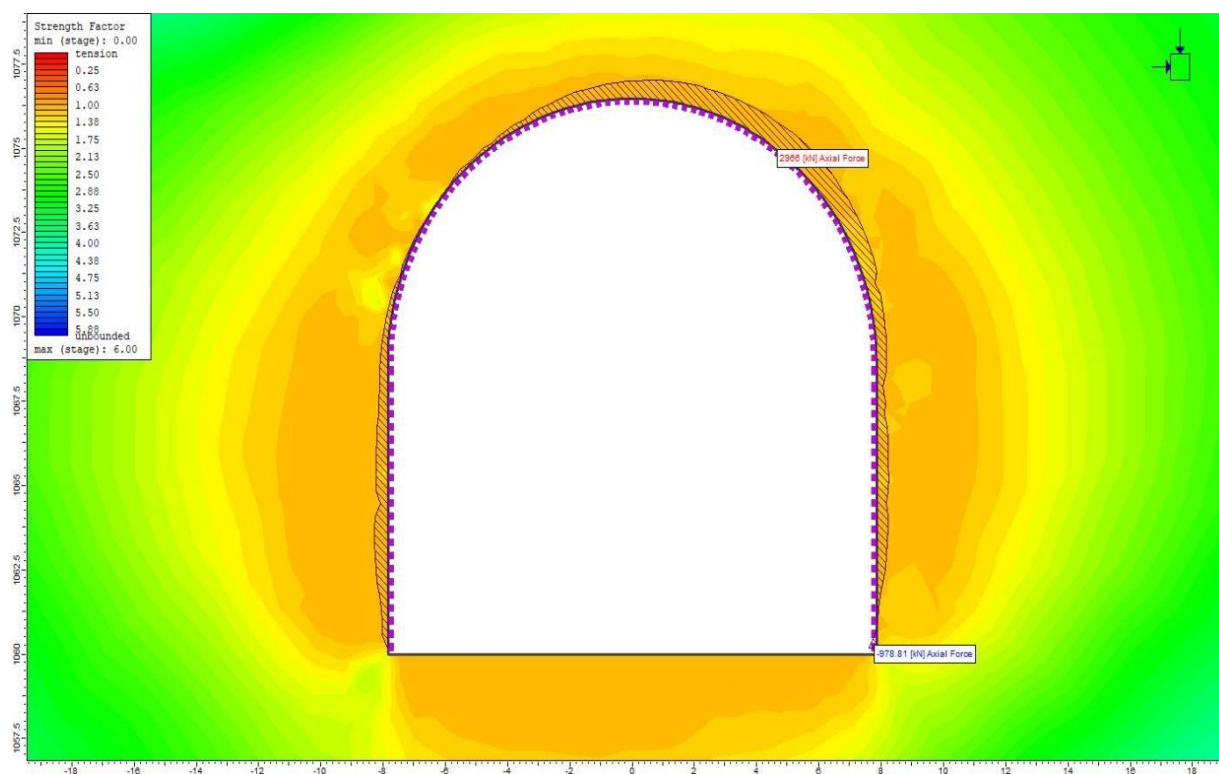




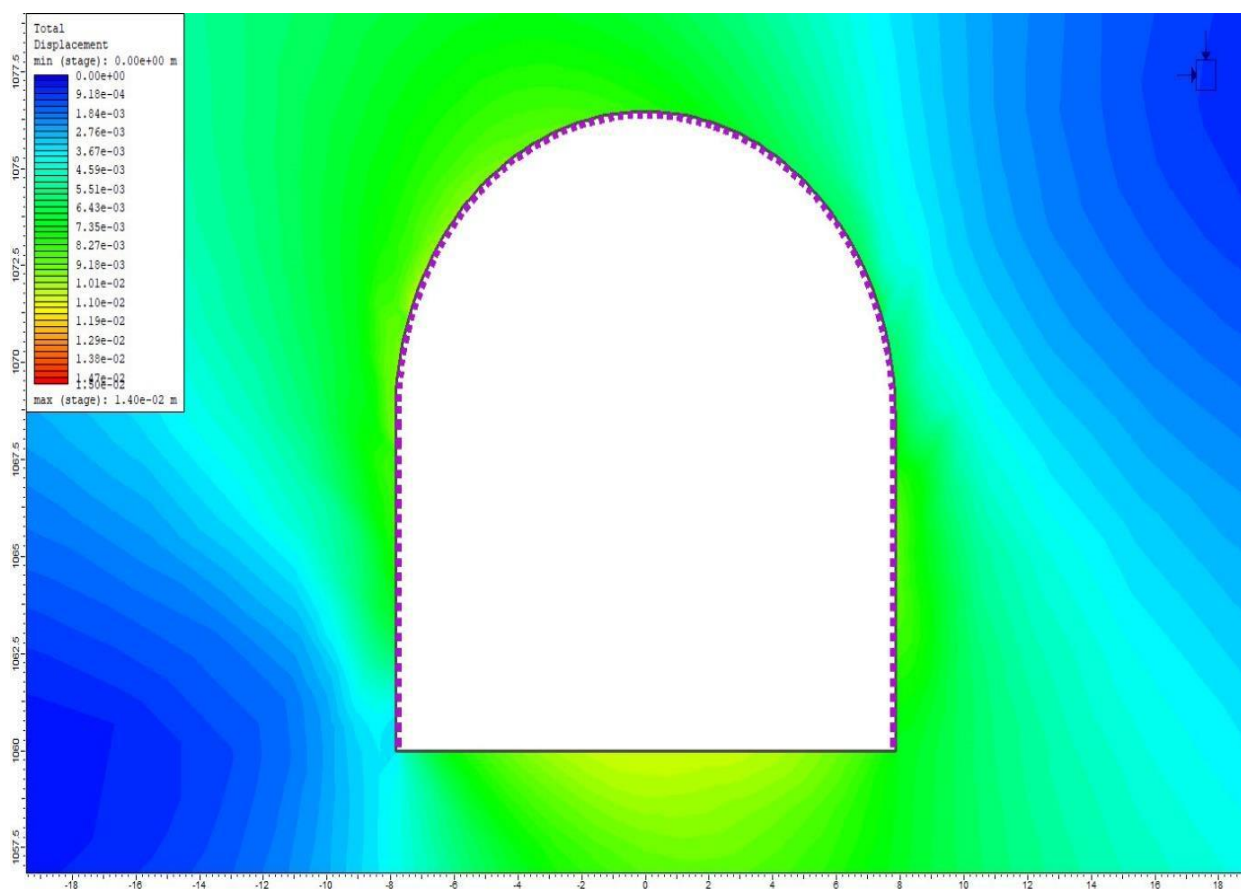
**Рисунок 4.17.** Общий вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 4, класс породного массива III-b, тип крепи породы D4-V включая торкрет-бетон толщиной 5 см, 30 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE240 мм @ 1.0 м - Этап 11



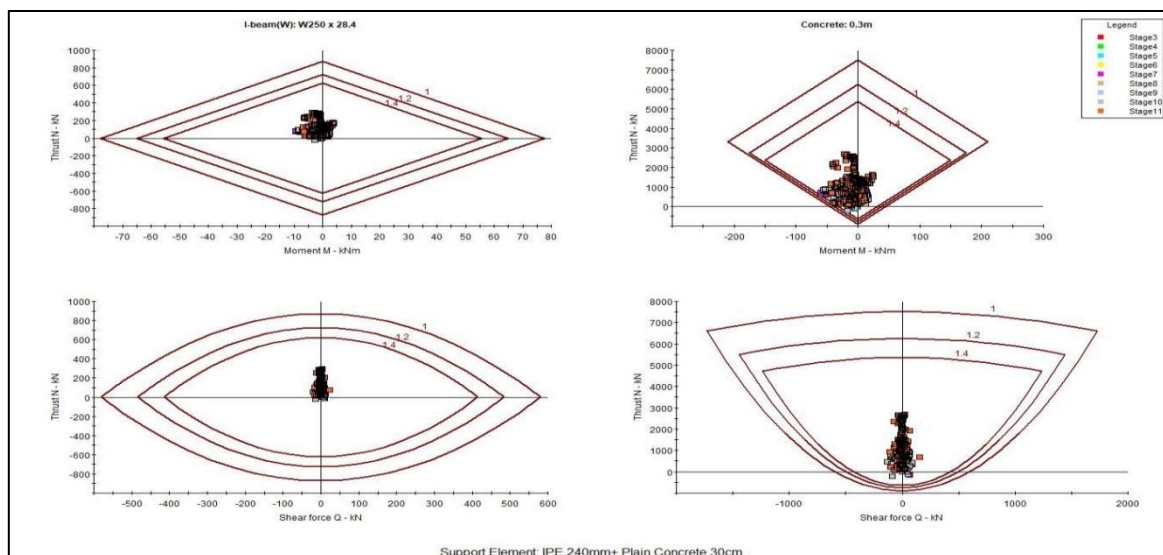
**Рисунок 4.18.** Укрупненный вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ4 в сечении 4 -  
Этап 11



**Рисунок 4.19.** Коэффициенты прочности в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые усилия в обделке в сечении 4 - Этап 11



**Рисунок 4.20.** Общие смещения в породном массиве вокруг безнапорном тоннеле СТ-4 в сечении 4 - Этап 11



**Рисунок 4.21.** Несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в сечении 4 безнапорного тоннеля СТ-4

#### **4.4.5. К-Э анализ сечения 5 – Крепь породы типа XX на ПК. 13+85 м безнапорных тоннелей**

Данная модель была создана для D-образного сечения безнапорных тоннелей СТ-4 на ПК. 13+85м для СТ4-А и СТ4-В в породном массиве класса I-a (сечение 5) где предполагается установить крепь породы типа XX, включающую торкрет-бетон толщиной 5 см, неармированный бетон C25/30 толщиной 35 см и стальное ребро IPE300 мм @1.0 м и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м @1.5×1.0 м (по боковым сторонам). Размеры каждого безнапорного тоннеля в данной модели после проходки составляют 24.75 м в высоту и 21.80м в ширину. Месторасположение – Верхнеобигармская формация (K1ob2) сложенная, в основном, песчаником с прослоями алевролита и аргиллита.

В данной главе, с учетом близости двух безнапорных тоннелей с расстоянием 12 м (меньше ширины каждого тоннеля), ветви СТ-4 моделировались как двойной тоннель. В данном К-Э анализе K1ob2 породный массив, вмещающий безнапорные тоннели, моделировался как упруго-пластический материал, в пластическом состоянии которого его прочностные параметры снижаются.



К-Э анализ безнапорных тоннелей СТ-4 в **сечении 5** выполнялся в **19 этапов** путем воспроизводства процедуры проходки и установки крепи, как представлено в таблица 4.11.

**Таблица 4.11.** Описание моделирования безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 5, класс породного массива I-а (тип крепи породы XX) в 19 этапов, при  $PGA=0.27g$ .

ЭТАПЫ	ОПИСАНИЕ	Снятие напряжения в последовательных этапах проходки и крепи			
		Передовой забой	Уступ 1	Уступ 2	Уступ 3
Этап 1	Состояние напряжения по месту, предполагая указанные выше напряжения по месту (с учетом перекрывающего пласта 200 м), удельный вес 26 кН/м <sup>3</sup> , условия плоской деформации	-	-	-	-
Этап 2	Левый тоннель – Разработка свода	90%	-	-	-
Этап 3	Левый тоннель – установка системы временной крепи породы в своде: 5см Торкрет-бетон, 35 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE300 мм @ 1.0 м и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м @1.5×1.0 м (в боковых стенах)	95%	-	-	-
Этап 4	Левый тоннель – разработка грунта уступами 1	100%	90%	-	-
Этап 5	Левый тоннель – установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 1: 5см Торкрет-бетон, 35 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE300 мм @ 1.0 m и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м	100%	95%	-	-
Этап 6	Левый тоннель – разработка грунта уступами 2	100%	100%	90%	-
Этап 7	Левый тоннель – установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 2	100%	100%	95%	-
Этап 8	Левый тоннель – разработка грунта уступами 3	100%	100%	100%	90%

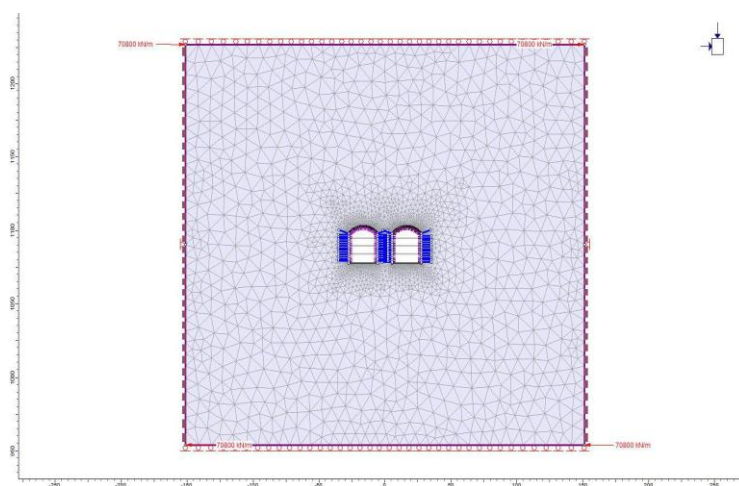
Продолжение таблица 4.11. Описание моделирования безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 5, класс породного массива I-а (тип крепи породы XX) в 19 этапов, при  $PGA=0.27g$ .

Этап 9	Левый тоннель – установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 3	100%	100%	100%	95%
Этап 10	Правый тоннель – разработка свода	90%	-	-	-
Этап 11	Правый тоннель – установка системы временной крепи породы в своде: 5см Торкрет-бетон, 35 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE300 мм @1.0 м и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м @1.5×1.0 м (в	95%	-	-	-
Этап 12	Правый тоннель – разработка грунта уступами 1	100%	90%	-	-
Этап 13	Правый тоннель – установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 1: 5см Торкрет-бетон, 35 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE300 мм @1.0 м и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м @1.5×1.0 м	100%	95%	-	-
Этап 14	Правый тоннель – разработка грунта уступами 2	100%	100%	90%	-
Этап 15	Правый тоннель – установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 2	100%	100%	95%	-
Этап 16	Правый тоннель – разработка грунта уступами 3	100%	100%	100%	90%
Этап 17	Правый тоннель – установка системы временной крепи породы в боковых стенках уступа 3	100%	100%	100%	95%
Этап 18	Завершение проходки и крепи породы	100%	100%	100%	100%
Этап 19	Активация сейсм. нагрузки, эквивалентной OBE ( $PGA = 0.27g$ ) путем приложения горизонтально действ. сил, равных 70'800 кН/м к верхней и нижней внешним границам модели	100%	100%	100%	100%

Рисунок 4.22 показывает общий вид К-Э модели СТ-4 в **сечении 5** при активации сейсмической нагрузки на этапе 19 ( $PGA=0.27g$ ). Укрупненный вид К-Э модели в данном сечении на **этапе 19** показан на рисунок 4.23.

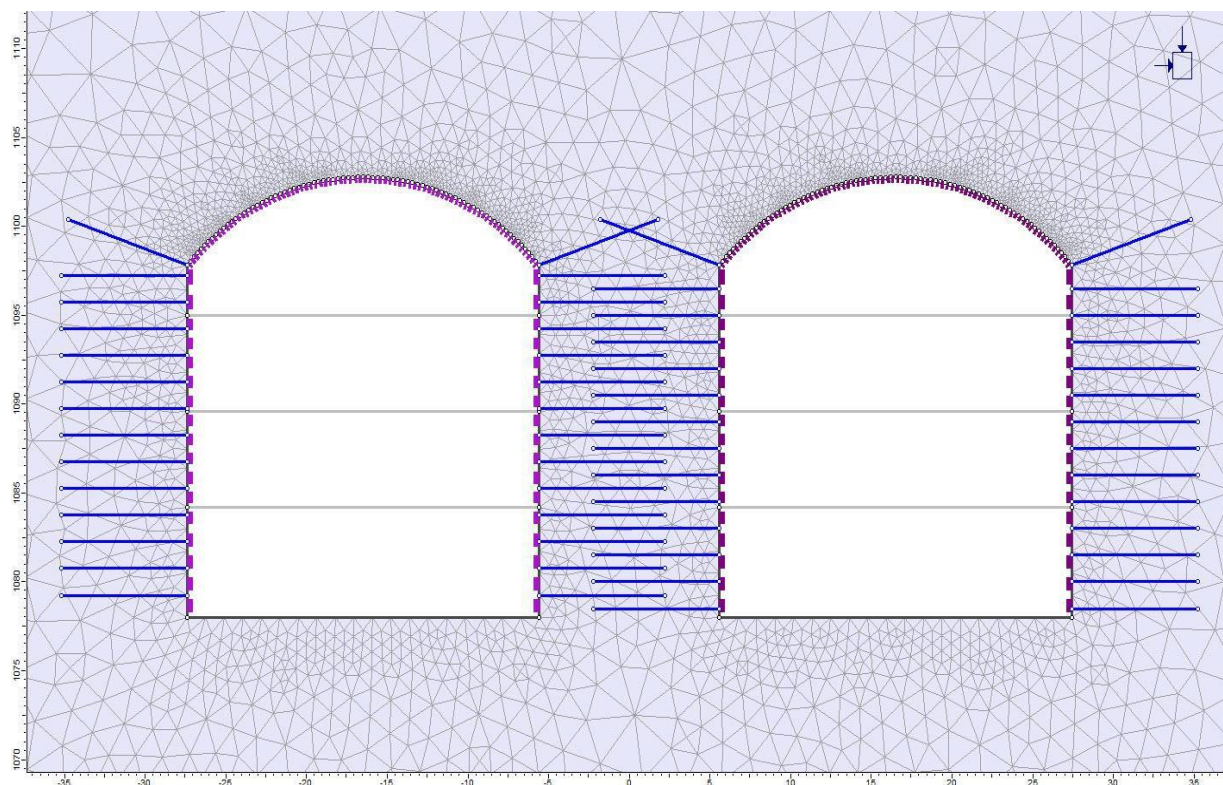
Коэффициенты устойчивости в скальном грунте класса I-a вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые усилия в обделке (неармированный бетон и стальное ребро) на этапе 19 показаны на рисунок 4.24. Общие смещения вокруг СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах на этапе 19 показан на рисунок 4.25. Кроме того, несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в данном сечении для левого и правого тоннелей приведены в рисунок 4.26. and рисунок 4.27, соответственно. Детали К-Э анализа, включая моделирование этапов строительства и результаты в виде результатов вычислений программного обеспечения приведены в Приложении С.

Анализ напряжения показал, что меры по временному укреплению породы, предусмотренные для данного сечения, будут сохранять свою функциональность на различных этапах ведения проходки. Необходимо отметить, что в связи с применением сейсмической нагрузки, равной землетрясению, которое может произойти во время проходки безнапорных тоннелей ( $OBE = 0.27g$ ), устойчивость этих тоннелей в сечении 5 достигнута может быть, и тоннели сохраняют функциональность после такой нагрузки.

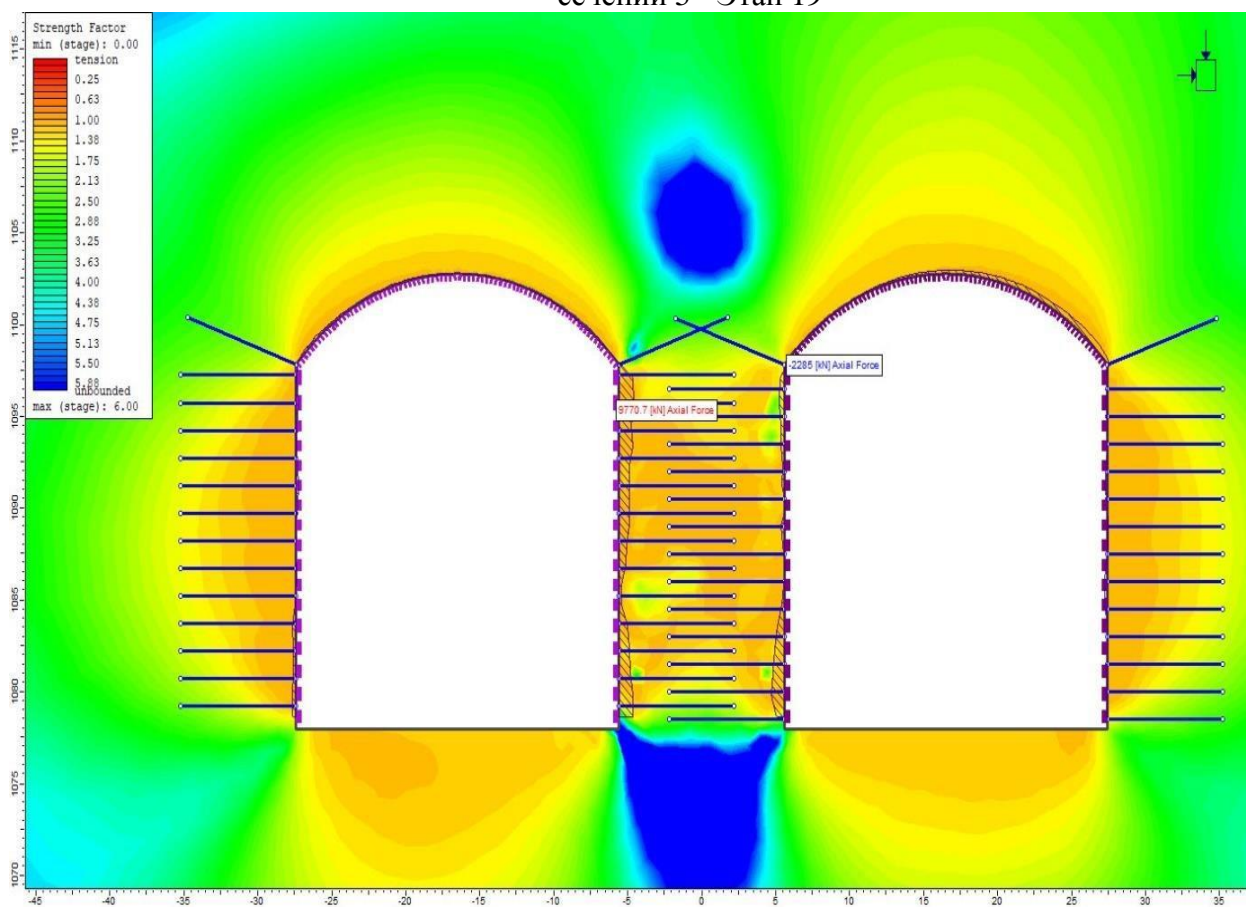


**Рисунок 4.22.** Общий вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 5, класс породного массива I-a, тип крепи породы XX включая торкрет-бетон толщиной 5 см, 35 см толщиной неармированный бетон C25/30 и стальное ребро IPE300 мм @1.0 м и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м @1.5×1.0 м в боковых стенах - Этап 19

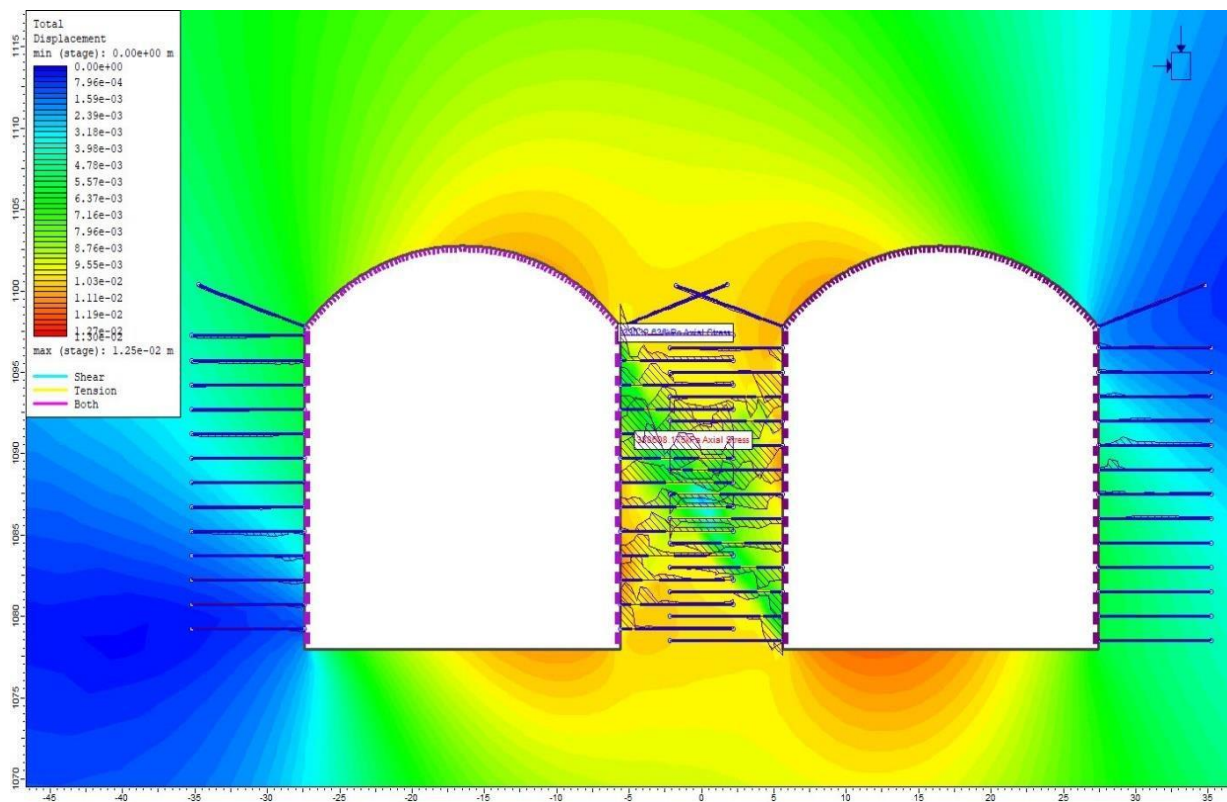




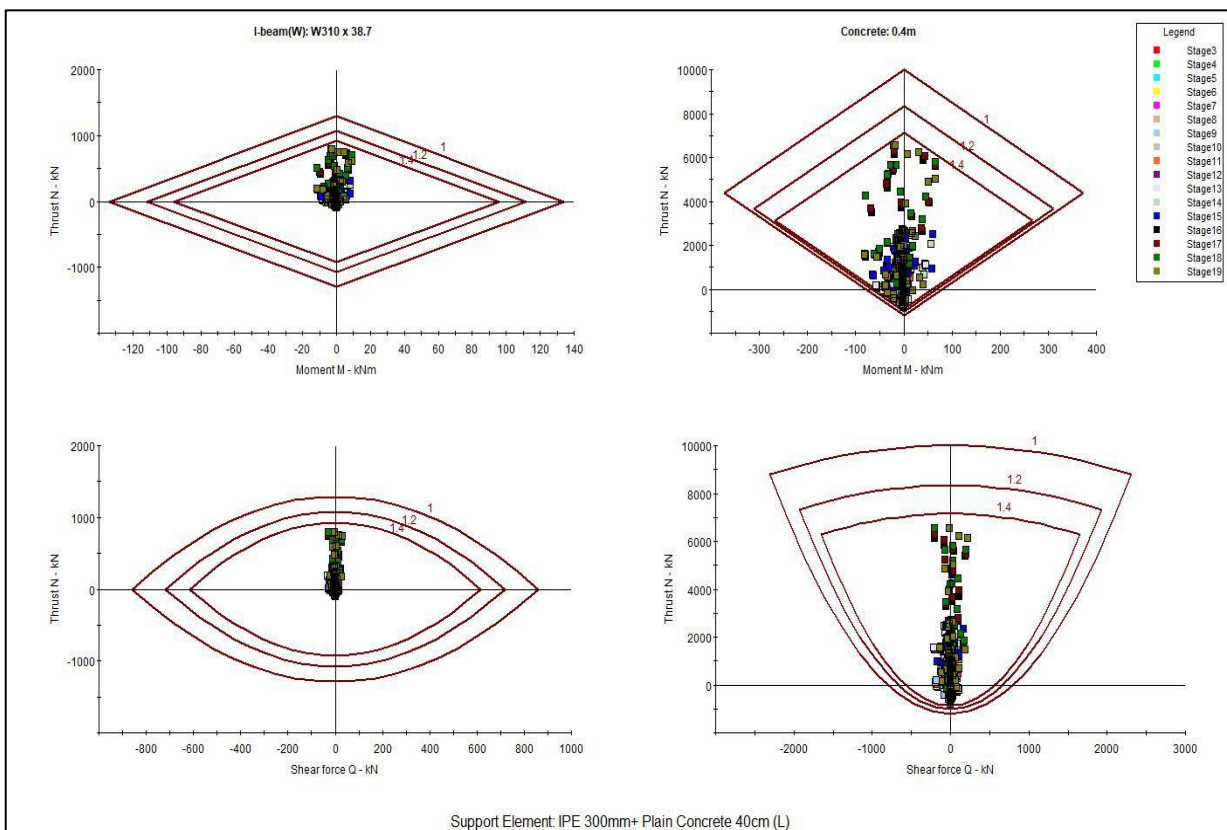
**Рисунок 4.23.** Укрупненный вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 5 - Этап 19



**Рисунок 4.24.** Коэффициенты прочности в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые усилия в обделке в сечении 5 - Этап 19

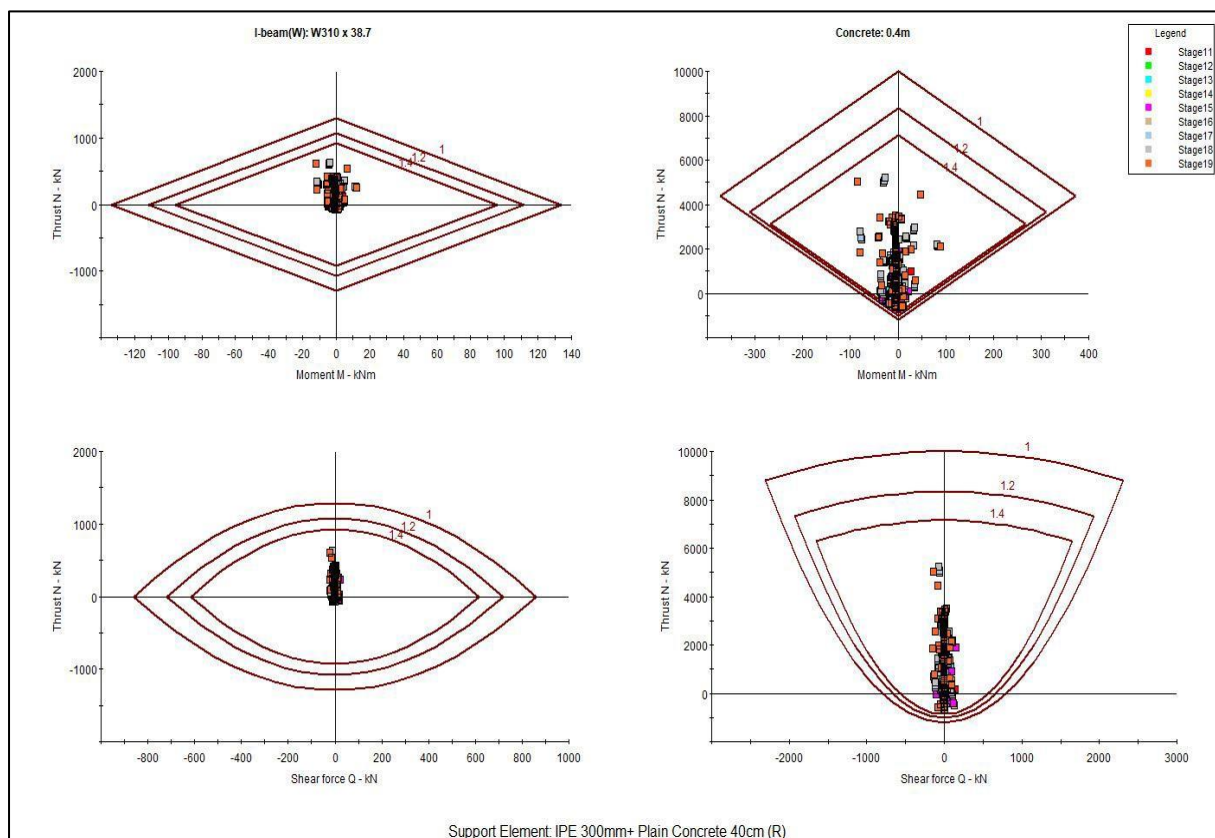


**Рисунок 4.25.** Общие смещения в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах в сечении 5 - Этап 19



**Рисунок 4.26.** Несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в сечении 5 безнапорных тоннелей СТ-4 – Левый тоннель





**Рисунок 4.27.** Несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в сечении 5 безнапорных тоннелей СТ4 – Правый тоннель

#### 4.4.6. К-Э анализ сечения 6 – Крепь породы типа XXV на ПК. 14+30 м безнапорных тоннелей

Данная модель была создана для подковообразного сечения безнапорных тоннелей СТ-4 на ПК. 14+30 м тоннелей СТ4-А и СТ4-В в породном массиве класса IV (**сечение 6**) где данные тоннели пересекают зону разлома 35 и планируется установка крепи породы типа XXV включая торкрет-бетон толщиной 5 см, неармированный бетон С25/30 толщиной 35 см и стальное ребро IPE300 мм @ 1.0 м (в своде, стенах и лотковой части) и полностью цементируемые анкерные болты Ø40 мм, L= 7.80 м @1.5×1.0 м. Размеры каждого безнапорного тоннеля в данной модели после проходки составляют 19.20 м в высоту и 21.20 м в ширину. Месторасположение – зона разлома №35, преимущественно сложенная материалами заполнения трещин (жильной глиной). Вверху и под зоной разлома №35 залегает разрушенная зона, связываемая с данным разломом (класс породного массива III-b) в верхнеобигармской формации (K1ob2) и каракузской формации (K1kr), соответственно.

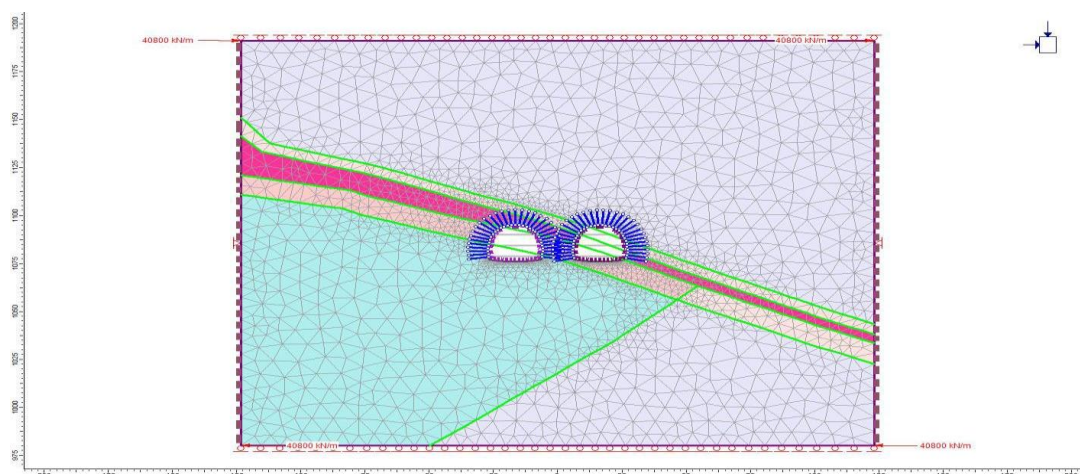
В данном сечении, учитывая близость двух безнапорных тоннелей с расстоянием 12 м (меньше ширины каждого тоннеля) ветви СТ-4 моделировались как двойной тоннель.

В данном К-Э анализе зона разлома 35 и выветрелые разгруженные грунты свит K1ob2 и K1kr, вмещающие СТ-4, моделировались как упруго-пластический материал, в пластическом состоянии которого его прочностные параметры снижаются.

К-Э анализ безнапорных тоннелей СТ-4 в **сечении 6** выполнялся в 19 этапов путем воспроизводства процедуры проходки и установки крепи.

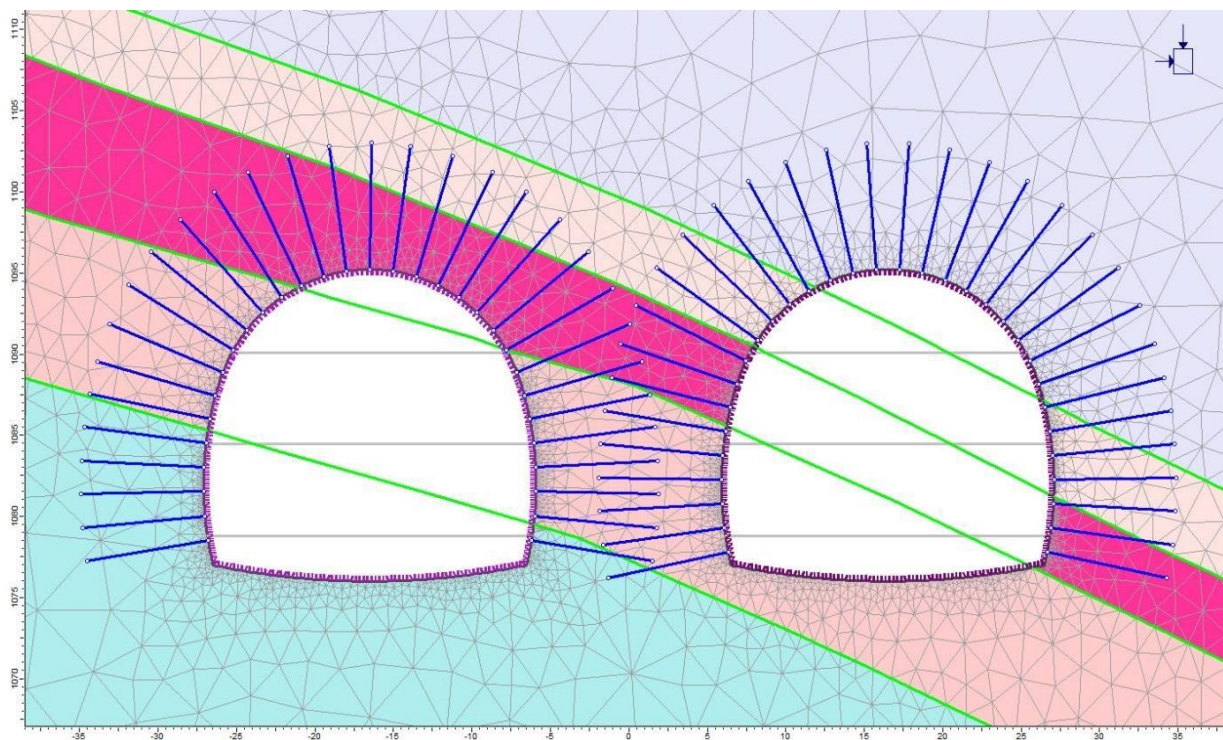
Рисунок 4.28 показывает общий вид К-Э модели СТ-4 в **сечении 6** при активации сейсмической нагрузки на этапе 19 ( $PGA=0.27g$ ). Укрупненный вид К-Э модели в данном сечении на этапе 19 показан на Рисунок 4.29.

Коэффициенты устойчивости в скальном грунте класса IV вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые усилия в обделке (неармированный бетон и стальное ребро) на этапе 19 показаны на рисунок 4.30. Общие смещения вокруг СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах на этапе 19 показан на рисунок 4.31. Кроме того, несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в данном сечении для левого и правого тоннелей приведены в рисунки 4.32 и 4.33, соответственно. Детали К-Э анализа, включая моделирование этапов строительства и результаты в виде результатов вычислений программного обеспечения приведены в Приложении С.

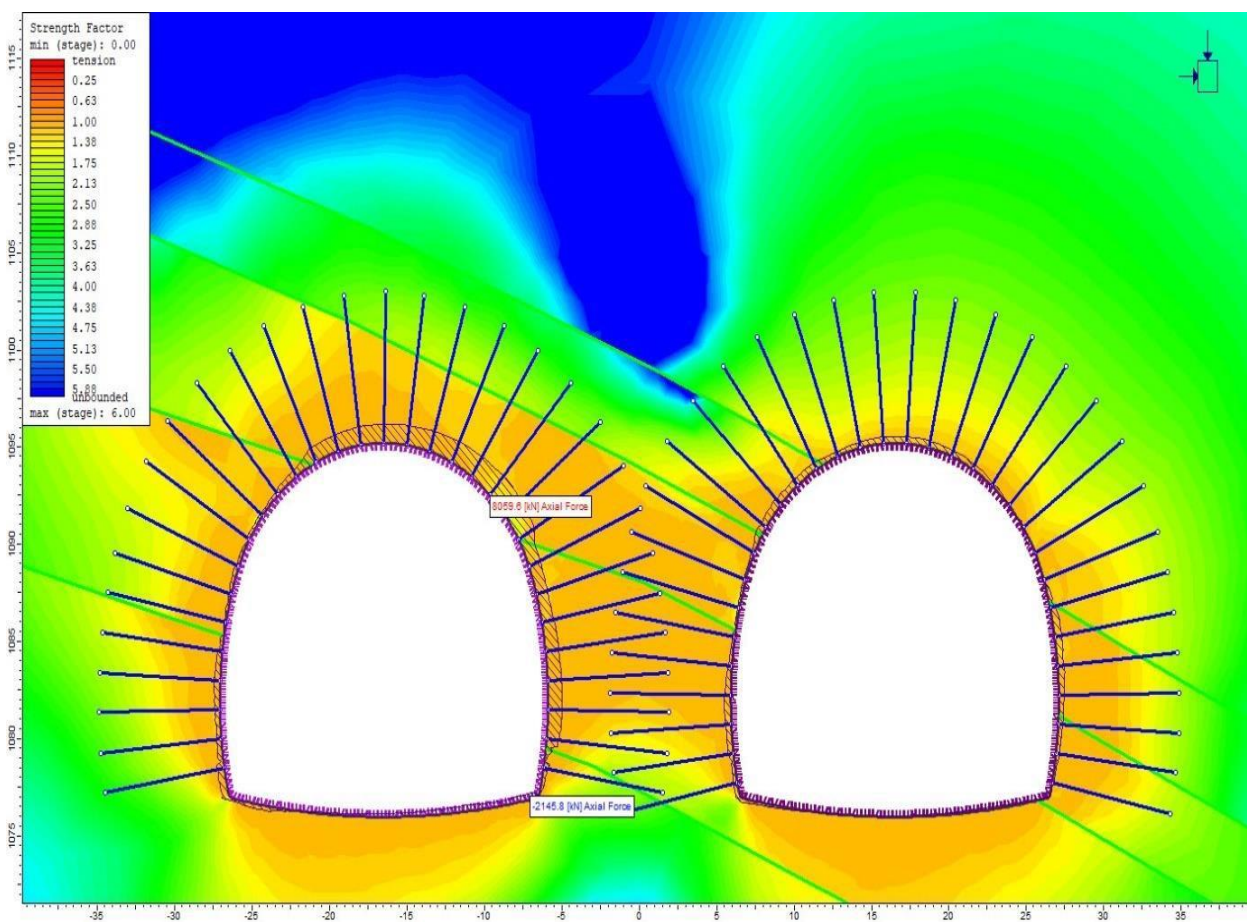


**Рисунок 4.28.** Общий вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 6

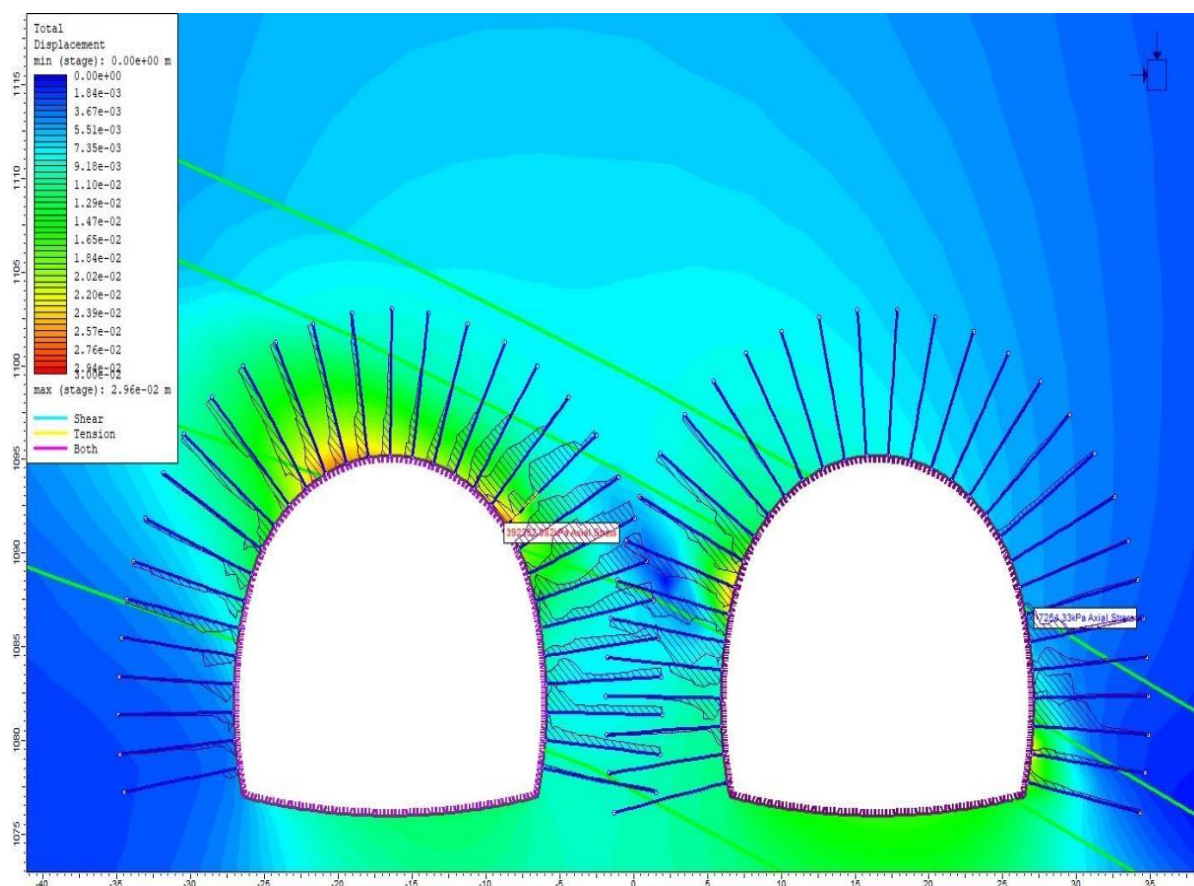




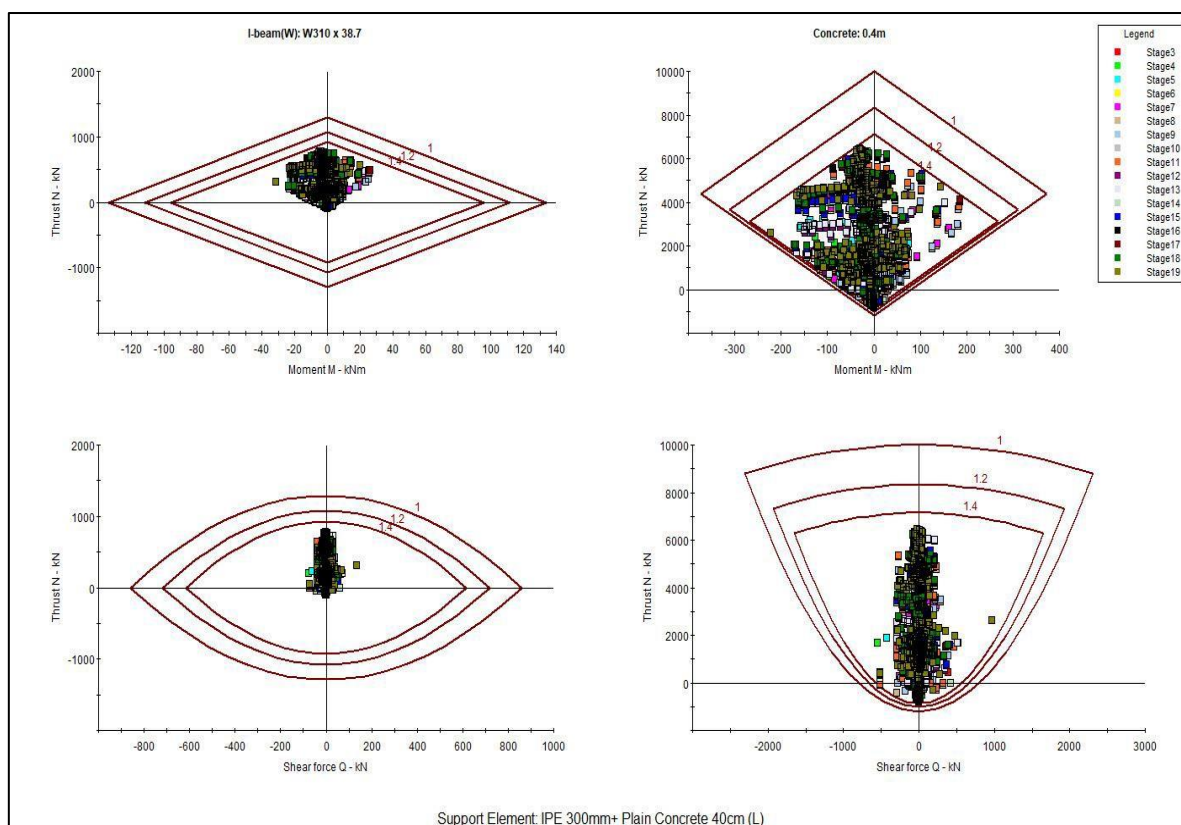
**Рисунок 4.29.** Укрупненный вид К-Э модели безнапорных тоннелей СТ-4 в сечении 6 - Этап 19



**Рисунок 4.30.** Коэффициенты прочности в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевые усилия в обделке в сечении 6 - Этап 19



**Рисунок 4.31.** Общие смещения в породных массивах вокруг безнапорных тоннелей СТ-4 и осевое напряжение в анкерных болтах в сечении 6 - Этап 19



**Рисунок 4.32.** Несущая способность неармированного бетона и стального ребра в обделке в сечении 6 безнапорных тоннелей СТ-4 – Левый тоннель





соответствии с Q2015 и включающая набрызгиваемый бетон, пока на данном проекте не использовалась.

**Таблица 4.12.** Рекомендуемые классы крепи породы в переходном участке после низовой камеры затворов СТ-4 и безнапорных тоннелей

№	Породный массив	Креп породы типа	Пикетаж (м)	Значение Q и GSI	Торкрет-бетон	Полностью цементируемый анкер	Неармир. бетон	Стальное ребро
<b>СТ4А</b>								
1	K1kr & K1mg1 с главными трещинами	D4-I & D4-IV	14+88 - 15+07	0.61<Q<1.78 45<GSI<55	10 см толщиной -	Ø32мм, L = 5.85 m @ 1.5×1.5 m	-	-
2			15+38 - 15+89					
3			16+14 - 16+21					
4	K1mg1 с главными трещинами и K1kr, K1mg1, K1mg2 & K1mg3 с второстеп. разломами	D4-II, D4-V, & D4-VI & D4-VII	14+60 - 14+88	0.22<Q<1.00 40<GSI<55	5 см толщиной	-	30 см толщиной	IPE 240 мм, промежуток 1.00 м
5			15+07 - 15+38					
6			15+88 - 16+14					
7			16+21 - 17+16					
8	K1kr (Разрушенная зона разлома 35)	D4-IIIa	14+37 - 14+60	0.17<Q<0.44 35<GSI<40	5 см толщиной	-	40 см толщиной	IPE 300 мм, промежуток 1.00 м
9	K1ob2 с главными трещинами	XX, XXI, XXII & XXIII	13+82 - 14+03	0.28<Q<0.59 50<GSI<55	5 см толщиной	Ø40мм, L = 7.80 m @ 1.5×1.0 m (Стены)	35 см толщиной	IPE 300 мм, промежуток 1.00 м
10	K1ob2 & K1kr (разрушенная зона разлома 35)	XXIV & XXV	14+03 - 14+07	0.17<Q<0.44 35<GSI<40	5 см толщиной	Ø40мм, L = 7.80 m @ 1.5×1.0 m (Свод и стены)	35 см толщиной	IPE 300 мм, промежуток 1.00 м (Свод, стены и лотковая часть)
11			14+28 - 14+37					
12	Разлом 35	XXV	14+07 - 14+28	0.017<Q<0.028 25<GSI<30	5 см толщиной	Ø40мм, L = 7.80 m @ 1.5×1.0 m (Свод и стены)	35 см толщиной	IPE 300 мм, промежуток 1.00 м (Свод, стены и лотковая часть)

Кроме того, при проходке безнапорных тоннелей СТ-4 отвечающие необходимым требованиям классы крепей будет определять инженер-геотехник на объекте, с учетом фактически наблюдаемых условий грунта. Иными словами, по результатам наблюдений и фактического геотехнического состояния породных массивов, вмещающих СТ4-БНТ, а также их поведения, отмечаемых во

время различных этапов проходки и стабилизации грунта, будет осуществляться любая необходимая адаптация классов крепи. Если потребуется, на этапе проходки будет выполнен дальнейший анализ с целью проверки классов крепи с тем, чтобы убедиться, что выбранная система крепи для каждой части тоннеля является достаточной, особенно это касается локаций, где состояние грунта или поведение породного массива будет отличаться от ожидавшихся. Необходимо отметить, что максимальное расстояние между законченной крепью породы и лицевой гранью тоннеля.

#### **Выводы по главе 4.**

1. Рекомендованы классы крепи породы с учетом эмпирического, аналитического и математического методов проектирования, т.е. с использованием анализов Q2015, UnWedge и К-Э моделирование безнапорных тоннелей СТ-4, а также принимая в расчет форму и размер поперечных сечений, и толщину бетонной обделки в данной зоне.

2. Анализ устойчивости клиньев, при выборе необходимых систем крепи указывает на то, что расчет были приняты более консервативные меры, предложенные по результатам К-Э анализа, выполненного с учетом Q2015 как показано в таблице 4.1. Основной причиной выбора стальных ребер и неармированного бетона является доступность данных материалов на объекте строящейся Рогунской ГЭС и знакомство с ними местных подрядчиков. При этом настоящая система RRS, предлагаемая в соответствии с Q2015 и включающая набрызгиваемый бетон, пока на данном проекте не использовалась..

3. Результаты наблюдений и фактического геотехнического состояния породных массивов, вмещающих СТ-4, а также их поведения, отмечаемых во время различных этапов проходки и стабилизации грунта, будет осуществляться любая необходимая адаптация классов крепи. Если потребуется, на этапе проходки будет выполнен дальнейший анализ с целью проверки классов крепи с тем, чтобы убедиться, что выбранная система крепи для каждой части тоннеля является достаточной, особенно это касается локаций, где состояние грунта или поведение породного массива будет отличаться от ожидавшихся.

4. Установлено, что максимальное расстояние между законченной крепью породы и лицевой гранью тоннеля должно составлять 2-3 м для  $Q_{min} > 0.6$ , и менее 1.5 м для  $Q_{min} < 0.6$ .

5. Анализ стабильности СТ-4 был выполнен с использованием трех различных методов проектирования скальной крепи: с использованием эмпирического, аналитического и математического методов проектирования.

6. На основании нового австрийского метода проходки туннелей (NATM) установлено, что постоянное наблюдение и мониторинг являются неотъемлемыми частями процесса подземной проходки.

## ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Результаты наблюдений и фактического геотехнического состояния породных массивов, вмещающих СТ-4, а также их поведения, отмечаемых во время различных этапов проходки и стабилизации грунта, осуществляется с учётом инженерно-геологических факторов, влияющих на упругопрочностные характеристики вмещающих массивы горных пород. Если потребуется, на этапе проходки, будет выполнен дальнейший анализ с целью проверки классов крепи с тем, чтобы убедиться, что выбранная система крепи для каждой части тоннеля является достаточной, особенно это касается локаций, где состояние грунта или поведение породного массива будет отличаться от ожидавшихся [1-А, 4-А, 8-А].

2. По результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния безнапорного гидротехнического тоннеля и разработке рекомендации по выбору типа несущей конструкций с учётом сейсмоустойчивости сооружения, установлено, что максимальное расстояние между законченной крепью породы и лицевой гранью тоннеля должно составлять 2-3 м для  $Q_{min} > 0.6$ , и менее 1.5 м для  $Q_{min} < 0.6$  [2-А, 3-А, 4-А, 6-А, 8-А].

3. Анализы стабильности гидротехнического тоннеля СТ-4 при проектировании в скальной крепи были проведены 3-мя способами: с применением эмпирического, аналитического и математического методов проектирования [2-А, 3-А, 4-А, 6-А, 8-А, 17-А, 19-А].

4. Разработаны рекомендации по выбору классов крепи породы, для различных литологических частей гидротехнического тоннеля СТ-4 по инженерно-геологических условий на основании результатов моделирования [9-А, 13-А, 15-А, 20-А, 22-А].

5. Принятая схема размещения КИА и система мониторинга строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС включает в себя 9 измерительных створов - участки с контрольно-измерительной аппаратурой. К основным геотехническим датчикам, предусмотренным для установки в СТ-4 между пикетами 06+00 м и



17+16 м, относятся вибрационные струнные (ВС) пьезометры и экстензометры [1-А, 2-А, 3-А, 4-А].

6. Получены результаты геотехнического мониторинга контрольно-измерительной аппаратурой (КИА) строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС [1-А, 2-А, 3-А, 4-А].

***Рекомендации по практическому использованию результатов:***

1. Рекомендованы классы крепи породы с учетом эмпирического, аналитического и математического методов проектирования, т.е. с использованием анализов Q2015, UnWedge и К-Э моделирование безнапорных тоннелей СТ-4, а также принимая в расчет форму и размер поперечных сечений, и толщину бетонной обделки в данной зоне.

2. Анализ устойчивости клиньев, при выборе необходимых систем крепи указывает на то, что в расчете были приняты более консервативные меры, предложенные по результатам К-Э анализа, выполненного с учетом Q2015 как показано в таблице 4.1. Основной причиной выбора стальных ребер и неармированного бетона является доступность данных материалов на объекте строящейся Рогунской ГЭС и знакомство с ними местных подрядчиков. При этом настоящая система RRS, предлагаемая в соответствии с Q2015 и включающая набрызгиваемый бетон, пока в данном проекте не использовалась..

3. Представлены результаты геотехнических исследований, включая изыскания ненарушенной породы и основных несплошностей, а также классификация горных массивов по методам Q и GSI. На основании результатов таких изысканий были оценены геомеханические параметры различных типов горных массивов с использованием конкретных значений GSI и критерия разрушения Hoek-Brown.

4. На основании нового австрийского метода проходки тоннелей (NATM) установлено, что постоянное наблюдение и мониторинг являются неотъемлемыми частями процесса подземной проходки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Earth At night. Averaged over 2021. Night lights in Google Maps. The Earth Observation Group
2. World Energy Perspective Cost of Energy Technologies (англ.). ISBN 978 0 94612 130 4 11. WORLD ENERGY COUNCIL, Bloomberg (2013). Дата обращения: 29 июля 2015. Архивировано из оригинала 1 мая 2015 года.
3. World Energy Perspective (англ.). Мировой энергетический совет (2013). Дата обращения: 20 октября 2019. Архивировано 20 октября 2019 года.
4. Катышев С.И. Проведение анализа энергетических профилей стран и инвентаризация существующих национальных энергетических систем.-2023г. 183с.
5. Чарвак -поселок строителей Чарвакской ГЭС. Дата обращения: 16 июня 2007. Архивировано из оригинала 27 сентября 2007 года.
6. Чарвакская плотина. Дата обращения: 10 июля 2010. Архивировано 7 ноября 2011 года.
7. Усманов Ислам Аббасович, Ходжаева Гульнора Аскарровна, Мусаева Алкагуль Касимбековна, Махмудова Дилбар Илхомовна, Машрапов Баходир Олимжонович. Оценка качества воды Туполангского водохранилища с целью использования для водоснабжения // Экология и водное хозяйство. -2020. -№ 1 (4). Архивировано 17 марта 2023 года.
8. O‘zbekiston gidroelektr stansiyalari: Xo‘jakent GES. АО «Узбекгидроэнерго». Дата обращения: 2 февраля 2022. Архивировано 2 февраля 2022 года.
9. Ходжикентская ГЭС. АО «Гидропроект». Дата обращения: 2 февраля 2022. Архивировано 25 сентября 2021 года.
10. Икрамова М. Р. Регулирование стока реки Амударья комплексом водохранилищ Туямуюнского гидроузла. - Варшава: RS Global, 2021. - 78 с.
11. Энергетика Казахстана. (24 февраля 2024). Википедия, свободная энциклопедия. Загружено 06 мая 2024 с <https://ru.wikipedia.org/?curid=464815&oldid=136325952>.
12. Участники сайта Википедия, 'Энергетика Казахстана', Википедия, свободная энциклопедия, 24 февраля 2024 02:02 UTC, <<https://ru.wikipedia.org/?curid=464815&oldid=136325952>> [посещено 06 мая 2024]
13. После реконструкции энергоблока мощность Экибастузской ГРЭС-1 достигла 3500 МВт. Дата обращения: 29 декабря 2014. Архивировано из оригинала 21 февраля 2018 года.
14. В Казахстане собираются строить две АЭС Архивная копия от 11 июля 2021 на Wayback Machine // Интерфакс.kz
15. Слива И. В. История гидроэнергетики России – М.: Издательство «Аспект Пресс», 2016. – 304 с.

16. Правительство Республики Казахстан; Министерство энергетики Республики Казахстан; АО "Фонд национального благосостояния "Самрук-Казына" Комитет по регулированию естественных монополий; Министерства национальной экономики Республики Казахстан; Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан; Информационно-аналитическая система Агентства Республики по статистики ТАЛДАУ; АО "KEGOK"; АО "КОРЭМ" и АО «Самрук-Энерго».-2020г.

17. Л. Лернер. Всего один день // журнал «Вокруг света», № 8, 1974. стр.1-3 (о строительстве Токтогульской ГЭС)

18. Шириязданов Ш. Токтогульский гигант строится. - Фрунзе: Издательство «Илим», 1971. - 136 с.

19. Институт «Гидропроект». Нарынгидроэнергострой. - М.: Внешторгиздат, 1992. - 55 с.

20. Дворецкая М.И., Жданова А.П., Лушников О.Г., Слива И.В. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России. - СПб.: Издательство Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 2018. - 224 с. -[ISBN 978-5-7422-6139-1](#).

21. Слива И. В. История гидроэнергетики России. - Тверь: Тверская Типография, 2014. - 302 с.

22. Официальный сайт Министерства энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. - URL: <https://www.mewr.tj>

23. IEA. Tajikistan Energy Sector Review 2022. Available at: <https://www.iea.org/reports/tajikistan-2022>

24. NGI Handbook, 2015, "Using the Q-System, Rock Mass Classification and Support Design", pp. 32-35. // Руководство Норвежского горного института, 2015, «Использование системы Q, классификация горных массивов и проект крепи», стр. 32-35.

25. Marinos V., 2010, "New Proposed GSI Classification Charts for Weak or Complex Rock Masses", Bulletin of the Geological Society of Greece Vol. 43. // Новые предложенные диаграммы классификации GSI для слабых или сложных горных массивов, Бюллетень геологического общества Греции, том 43.

26. Hoek E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., 2013, "Quantification of the Geological Strength Index Chart".//Хок Э, Картер Т.Г., Дидерихс М.С., 2013, «Количественное представление диаграммы индекса геологической прочности».

27. Rogun HPP, Factual Report on the Investigation Borehole "RE-37" in Fault 35 in CT4- A Tunnel, STE-Rep-L3-FR-037-Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., May 2021 // Рогунская ГЭС, Фактологический отчет по разведывательной скважине RE-37 в разломе № 35 в туннеле СТ4-А, STE-Rep-L3-FR-037-Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., май 2021 г.

28. Rogun HPP, Factual Report on the Investigation Borehole "RE-38" in Fault 35 in CT4- B Tunnel, STE-Rep-L3-FR-035-Rev. 0, Samanian Technical &

Engineering Co., April 2021 // Рогунская ГЭС, Фактологический отчет по разведывательной скважине RE-38 в разломе № 35 в туннеле СТ4-Б, STE-Rep-L3-FR-035-Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., апрель 2021 г.

29. Rogun HPP, Factual Report on the Piezometer Borehole RGC-06 in the Fault No. 35, STE-Rep-L3-FR-019, Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., December 2020 // Рогунская ГЭС, Фактологический отчет по разведывательной скважине RGC-06 в разломе № 35 в туннеле СТ4-Б, STE-Rep-L3-FR-019-Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., декабрь 2020 г

30. Rogun HPP, Factual Report on the Piezometer Borehole RGC-08 in the Fault No. 35, STE-Rep-L3-FR-026, Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., January 2021 // Рогунская ГЭС, Фактологический отчет по разведывательной скважине RGC-08 в разломе № 35 в туннеле СТ4-Б, STE-Rep-L3-FR-026-Rev. 0, Samanian Technical & Engineering Co., январь 2021 г

31. Hoek E. et al., 2002, “Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition” // Критерий разрушения Хок-Браун – издание 2002 года.

32. Hoek E., 2007 Edition, “Practical Rock Engineering”, [http://www.rocksolid.com/hoek/corner/Practical Rock Engineering.pdf](http://www.rocksolid.com/hoek/corner/Practical%20Rock%20Engineering.pdf). // Хок Э, изд. 2007 г. «Практическое руководство по горному делу».

33. Barton N., 2002, “Some new Q-value correlations do assist in site characterization and tunnel design”, Int. Jour. Roc. МeПк & Min. Sci., 39, pp. 185-216. // Бартон Н., 2002, «Некоторые новые корреляции значения Q с целью поддержки при описании характеристик площадок и проектировании туннелей», Межд.журнал механики грунтов и горного дела, 39, стр. 185-216.

34. Rogun HPP, Level 1 Design, Lot 3 – L1-7 – HLO2 High Level Outlet Tunnel Report, AFRY Switzerland Ltd., August 2020 // Рогунская ГЭС, проект Уровня 1, Лот 3 - L1-7- Отчет о проекте туннельного водовыпуска верхнего уровня ТВВУ2, ЭЙФРИ Швейцария Лтд., август 2020 г.

35. Rogun HPP - Memorandum, Level 1 Design – Left Bank, Review on UCS Tests performed on Sandstone and Results of Schmidt Hammer Tests in Saturated & Natural Conditions, ROG-L4-ED-BD-GE-00-GL-ME-0002-A, October 2019 // Рогунская ГЭС – Техническая записка, Проект Уровня 1 – Левый берег, Обзор результатов испытаний сопротивления одноосному сжатию, выполненных в отношении песчаника и результаты испытаний молотком Шмидта в насыщенном и естественном состояниях, ROG-L4-ED-BD-GE-00-GL-ME-0002-A,, октябрь 2019 г.

36. Techno-Economic Assessment Study for Rogun Hydroelectric Construction Project, Phase II: Project Definitions Options Volume 2: Basic Data, Chapter 3: Geotechnics, RP 45 Rev. A, April 2013 // ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС, Этап II: Варианты определения проекта, том 2: Основные данные, Раздел 3: Геотехника, RP 45 ред. А, апрель 2013 г.

37. Rogun HPP, Level 1 Design, Lot 3 – Design Criteria – Right Bank, Rev. D-Expertise, AFRY Switzerland Ltd., February 2022 // Рогунская ГЭС, Проект Уровня 1, Лот 3 – Критерии проектирования – Правый берег, Вар. D-Экспертиза, ЭЙФРИ Швейцария Лтд, февраль 2022

38. Bardon N., Lien R. and Lund J, 1974, “Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support”, Rock Mechanics, 6, pp. 189-236 // Бартон Н., Лиен Р и Лунд Дж, 1974, Инженерная классификация горных массивов для проектирования крепи туннелей.

39. Регисцкий В.И. и др. Результаты комплексных исследований на участке подземных сооружений Рогунской ГЭС. Гидротехническое строительство №2, 2015.-С.29-40

40. Шехурдин В.К. Задачник по горным работам, проведению и креплению горных выработок. М. Недра. 1985 -240с.

41. Проектирования и строительство больших плотин. Подземные работы и улучшения сальных оснований плотин. Издательства. «Энергия» Москва. 1966.-203с.

42. Булычев Н. С. «Механика подземных сооружений» Москва. Недра. 1982.-272с.

43. Рогунская ГЭС ЛОТ-3 СТ-4 Геотехническое оборудование и мониторинг. 2023 г. 25с.

44. Саманиян (2020) - Геотехнические исследования правого берега - Фактический отчет по исследовательской скважине «RE-11» в оси затвора HLO1 - Отчет № STE-Rep-L3-FR-013, ред. 0.

45. Саманиян (2020) – Геотехнические исследования Правого берега – Фактический отчет по исследовательской скважине «PE-12» в Ионахшском разломе – Отчет № STE-Rep-L3-FR-015, ред. 0.

46. Исследование технико-экономической оценки проекта строительства Рогунской ГЭС, Фаза II: Варианты определений проекта, Том 2: Основные данные, Глава 3: Геотехника, RP 45 Rev. A, 2013.

47. Исследование технико-экономической оценки проекта строительства Рогунской ГЭС, Фаза II: Оценка существующих работ на Рогунской ГЭС (Анализ нагрузки деривационного тоннеля 1, включая неармированную облицовку), RP 46 Rev. A, 2013.

48. 17 млрд киловаттов в год: Рогунская ГЭС - самая мощная в Центральной Азии. Дата обращения: 25 октября 2019. Архивировано 25 октября 2019 года.

49. Хасанов Н.М., Холов Ф.А., Зувайдов М.М. Проходка гидротехнических сооружений с предварительным укреплением методом инъекции // Политехнический Вестник №3, ТТУ, 2022. -С.108-115

50. Хасанов Н.М., Холов Ф.А., Саидов С.А. Способы проведения цементационных работ в гидротехническом строительстве. Вестник, ТНУ-Душанбе: Серия геологических и технических наук 2022. №3. –С. 85-93.

51. Хасанов Н.М., Саидов М.Х., Хасанов М.Н. Геотехнической мониторинг контрольной измерительной аппаратурой для СТ-4 Рогунской ГЭС // Политехнический Вестник №4. ТТУ, 2024. -С.120-128



52. Geokon Co., Руководство по вибрационным струнным пьезометрам – Модель серии 4500, <https://www.geokon.com/content/manuals/4500/index.html>.
53. Geokon Co., Руководство по скважинным экстензометрам – Модель 1150 серии А- 3, <https://www.geokon.com/A-3>.
54. Мосткова В.М. Подземные гидротехнические сооружения. Москва, Высшая школа. 1986. 460с.
55. Технический отчет Рогунской ГЭС. -Москва. 1978г.
56. Рогунской ГЭС на реке Вахш. Подземный комплекс. Технический проект (гидропроект). Гидроспецпроект. -М.1980 г.
57. Лоихаи техникии Нерӯгоҳи Обии Роғун дар дарёи Вахш. Тошкент. соли 1978.
58. Ҷамроҳкунии қорҳои муҳандиси-геологӣ дар рафти қорҳои сохтмонӣ иншооти НБО Роғун дар соли 2010. –Москва. соли 2011.
- 59.ОАО «РОГУНСКАЯ ГЭС». Контрактная документация - Лот 3 ER - Требования к проектированию.
60. NGI Handbook, 2015, "Using the Q-System, Rock Mass Classification and Support Design", pp. 32-35. // Руководство Норвежского горного института, 2015, «Использование системы Q, классификация горных массивов и проект крепи», стр.32-35.Rogun HPP, Level 1 Design, Lot 4 – L1-9 – Lower Pensdock Tunnels & Pressure Shafts
61. Report on Excavation, Stability Analysis & Rock Support, AFRY Switzerland Ltd., Осдоber 2020 // Рогунская ГЭС, Проект Уровня 1, Лот 4 - L1-9 – Туннели и напорные шахты нижнего туннельного водовода – Отчет по земляным работам, расчетах устойчивости и крепи породы, ЭЙФРИ Швейцария Лтд, октябрь 2020.
62. Vlachopoulos and Diederichs, 2009, Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels // Влахолупулос и Дидерихс, 2009, Улучшенные продольные профили смещения для анализа конвергенции глубоких туннелей.
63. Barla G., 2015, Technical Note - Suggested Method, “Evaluation of the Maximum Shear Deformation in Free Field Conditions – Finite Element Modelling of the Ovaling Effect of Tunnels” // Барла Г, 2015, Техническая записка – Предлагаемая методика «Оценка максимальной деформации сдвига в условиях свободного поля – Конечно- элементное моделирование эффекта овальной деформации туннелей».
64. Techno-Economical Assessment Study for Rogun Hydroelectric Construction Project, CoB, ELC, IPA, May 2013, “Assessment of the Existing Rogun HPP Works, Stress Analysis of the Diversion Tunnel 1”, RP 46, Rev. A.// Техно-экономическая оценка проекта строительства Рогунской ГЭС, СоВ, ELC, IPA,, май 2013 года, «Оценка существующих сооружений Рогунской ГЭС, Анализ напряжений Деривационного туннеля 1», RP 46, Вар. А.

65. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. Л.: Недра, 1978. – 328с.

66. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977. – 479с.

67. Коробкин В.И., Ананьев В.П. Инженерная геология. - М.: Высшая школа. 1973, 300с.

68. Marchini S. Attraversamento di una zona di materiale limoso-argilloso sotto pressione in una fase del lavoro di costruzione del - l'impianto idroelettrico nel Mantaro in Peru. - «Nuovo Cantiere», 1975, № 3, - p. 36-40.

69. Насонов И.Д. и др. Технология строительства подземных сооружений. М.Недра. 1992 г.

70. Картозия Б.А., Федунец Б.И., Шуплик М.Н. и др. Шахтное и подземное строительство. Том1. М, Изд-во, Академии горных наук, 2001. - 607 с.

71. Холов Ф.А. Воздействие инженерно-геологических условий на напряженно-деформированное состояние подходного тоннеля П-5 Рогунской ГЭС // Вестник, ТНУ- Душанбе: ТНУ, Серия геологических и технических наук 2023. №2. –С.154-15

72. Холов Ф.А., Хасанов М.Н. Инженерно - геологические условия и их влияние на напряженно-деформированное состояние подходного САСТ-5 Рогунской ГЭС //МНПК, «Водные ресурсы, инновация, ресурсо- и энергосбережения», 6-7 октября 2023 года, г.Душанбе, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана. С.257-265

73. Холов Ф.А. Улучшение свойств оснований плотин ГЭС с помощью цементации //Конференсияи ҷумҳуриявии илмӣ-амалии устодон, донишҷӯён, магистрантҳо ва аспирантон унвонҷӯён таҳти унвони «Дурнамои тараққиёти истеҳсоли масолеҳҳои сохтмонӣ дар Љумҳурии Тоҷикистон »,31-уми марти соли 2023, ДТТ. Душанбе. –С.241-245

74. Хасанов Н.М., Холов Ф.А. Медеуов А.Т. Влияние геологических и гидрогеологических условий на выбор трассы тоннеля // Международной научно-практической конференции: «Образование и наука: вызовы IV промышленной революции», посвященной 80-летию академика А. Куатбекова. 13 мая. 2022 г. Университет дружбы народов имени академика А. Куатбекова. РК.

75. Хасанов Н.М., Холов Ф.А., Алимардонов А.М. Напряженное состояние грунтового массива в естественном залегании и при воздействии сейсмических нагрузок //МНТК. Джизакском политехническом институт. 28-29 октября 2022 г. РУ. «Инновационные решения технических, инженерно-технологических задач производства». –С.336-341

76. Холов Ф.А. Сулаймонова М.А. Влияние массовых сейсмических взрывов на устойчивость гидротехнических сооружений //МНПК:

“Архитектурное образование и архитектура Таджикистана” 60 лет развития и совершенствования. ТТУ. 22 ноября. 2022. Душанбе. –С.248-252

77. Холов Ф.А., Ятимов А.Ч., Алимардонов А.М. Геологические факторы влияющих на устойчивость гидротехнических тоннелей //МНПК: “Архитектурное образование и архитектура Таджикистана” 60 лет развития и совершенствования. ТТУ. 22 ноября. 2022. Душанбе. –С.285-288.

78. Холов Ф.А., Ятимов А.Дж., Саидов С.А. Опыт проведения цементационных работ в гидротехническом строительстве //МНПК: “Архитектурное образование и архитектура Таджикистана” 60 лет развития и совершенствования. ТТУ. 2022. 22 ноября. Душанбе. –С.288-291.

79. Хасанов Н.М. Медеуов А.Т. Холов Ф.А. Влияние геологических и гидрогеологических условий на выбор трассы тоннеля // Международной научно-практической конференции: «Образование и наука: посвященной 80-летию академика А. Куатбекова. Университет Дружбы народов имени академика А. Куатбекова, 13 май, 2022. –С.48-51.

80. Хасанов Н.М. Хасанов М.Н. Строительство гидротехнических тоннелей Сангтудинской ГЭС-1 //МНПК, «Прикладные исследования и экспериментальные разработки в области естественных и технических наук» г. Белгород, 28 октября, Россия. 2020. -С.59-66.

81. Хасанов Н.М. Хасанов М.Н. Исследование технического состояния сооружений Дангаринского гидротехнического тоннеля // Конференсияи чумхуриявӣ илмӣ - амалии «Баланд бардоштани маърифати истифодаи захираҳои обӣ масъалаи муҳим ва мубрами ҷаҳони муосир аст», ДТТ. 13-14 май. 2021г.

82. Якубов А.О. Хасанов М.Н. //РНПК. ТТУ. факультет ИКТ, 2020//РНПК. ТТУ. факультет ИКТ, 2020г.

83. Хасанов Н.М. Хасанов М.Н. Защита подземных выработок от воздействия УГВ //КЧИА донишҷӯён, мағистранҳо ва аспиранту унвонҷӯён. ДТТ, 24 апрели с.2019. –С.149-156

84. Якубов А.О. Хасанов М.Н. Показатели уплотнения грунта при оптимальной влажности //РНПК. ТТУ. факультет. «Строительство и архитектуры». 2019. – С. 218-223.

85. Якубов А.О. Хасанов М.Н. Консолидация горных пород при строительстве ГЭС //Конференсияи байналмимлалӣ илмӣ – амалии донишҷӯён, мағистрон, унвонҷӯён ва олимони ҷавон «Мухандис-2019», ДТТ 29 декабри с 2018.

86. Хасанов Н.М., Саидов М.Х., Хасанов М.Н. Применение КИА для измерений гидравлических параметров в тоннеле СТ-4 Рогунской ГЭС // Кишоварз. ДАТ. Теоретический и научно-практический журнал №1.-С.115-121

87. Саидов М.Х., Сулеймонова М.А., Хасанов М.Н. Выбор конструктивной обделки и цементационные работы строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС // Политехнический Вестник №1. ТТУ, 2024. -С.

88. Хасанов Н.М., Давронов Д.К., Хасанов М.Н. Расположение геотехнических контрольно-измерительных приборов и системы мониторинга в СТ-4 Рогунской ГЭС // ТНУ, Серия геологических и технических наук 2024. №1. –С.75-83

89. Саидов М.Х., Ситамов М.С., Хасанов М.Н. Таҳқиқоти конструкиаҳои обгузаронанда бурришаш мудаффар аз таъсири қувваҳои зилзилавӣ // ТНУ, Серия геологических и технических наук 2024. №1. –С.104-114

90. Сулейманова М.А., Хасанов М.Н., Алимардонов А.М., Саидов С.А. Выбор крепи участка разветвления строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС // Политехнический Вестник №1. ТТУ, 2024. –С

91. Хасанов Н.М., Саидов М.Х., Хасанов М.Н. Геотехнической мониторинг контрольной измерительной аппаратурой для СТ-4 Рогунской ГЭС // Политехнический Вестник №4. ТТУ, 2023. -С.120-128

92. Хасанов М.Н., Саидов М.Х. Зависимость минимальной глубины заложения напорных необлицованных тоннелей //ТНУ- Душанбе: ТНУ, Серия геологических и технических наук 2023. №3. –С 28-33

93. Ятимов А.Дж., Хасанов Н.М., Холов Ф.А., Хасанов М.Н. Укрепительная цементация оснований плотин в гидротехнических сооружениях // Политехнический Вестник №1, ТТУ, 2023. -С.176-183

94. Ятимов А.Дж., Хасанов Н.М., Холов Ф.А., Хасанов М.Н. Анализ результатов исследований напряжений проявляющихся вокруг подземных выработок //ТНУ- Душанбе: ТНУ, Серия геологических и технических наук 2023. №1. –С.151-158

95. Хасанов Н.М., Холов Ф.А., Алимардонов А.М., Хасанов М.Н. Результаты натурных измерений статических анализов и их оценки при проходке гидротехнических сооружений // Политехнический Вестник №4, ТТУ, 2022. - С.112-120.

96. Ятимов А.Дж., Хасанов М.Н. Анализ напряженного состояния напряжений проявляющихся вокруг подземных выработок //Конференсияи ҷумхуриявии илмӣ-амалии устодон, донишҷӯён, магистрантҳо ва аспирантон унвонҷӯён таҳти унвони «Дурнамои тараққиёти истеҳсоли масолеҳҳои сохтмонӣ дар ҷумҳурии тоҷикистон », 31-уми март соли 2023, ДТТ. Душанбе. –С.257-263

97. Хасанов Н.М. Хасанов М.Н. Воздействие наземного транспорта на тоннели мелкого заложения //МНПК на тему: «Куатбековские чтения-1: Уроки Независимости», посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан 23 апрель 2021 г. С.343-348

98. Хасанов Н.М. Хасанов М.Н. Зависимость сейсмостойкости водопропускных сооружений от ударных нагрузок транспортных средств //МНПК, «Прикладные исследования и экспериментальные разработки в области естественных и технических наук» г. Белгород, 28 октября, Россия. 2020. -С.53-59

99. Хасанов Н.М. Хасанов М.Н. Влияние сейсмических воздействий взрывов на устойчивость гидротехнических сооружений // V Международная (XI Всероссийская конференция) Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020. 25-26 ноября. ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». -С.230-237

100. Хасанов Н.М. Ятимов А. Дж. Хасанов М.Н. Улучшение оснований плотин ГЭС с помощью цементации // МНПК, г. Белгород, Россия. 30 октября 2019. -С.95-98

101. Ядгаров Ё.Х. Хасанов М.Н. Натурные наблюдения за осадками грунта плотины в период строительства // РНПК. ТТУ. факультет. «Строительство и архитектуры». 2019. –С. 206-213.

102. Хасанов Н.М., Носиров И. Хасанов М.Н. Теоретические и экспериментальные исследования сейсмостойкости подземных пешеходных переходов //МНПК, «Естествознание, техника, технологии: современные парадигмы и практические разработки» г. Белгород, 30 октября, Россия. 2019 г. С.91-94

103. Хасанов Н.М. Сейсмостойкость конструкций водопропускных сооружений и подземных переходов /М.Н. Хасанов, А.Х. Абдужабаров //Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1(60), февраль, г. Санкт-Петербург. - С.205-209.

104. Хасанов Н.М. Выбор методов предварительного укрепления и снижения водопроницаемости грунтов и горных пород в зонах тектонических нарушений /Н.М. Хасанов, М.А. Сулаймонова//Вестник, ТНУ1/1(192) - Душанбе: ТНУ, 2016. -С.202-205.

105. Хасанов Н.М. Расчет напряженно-деформированного состояния водопропускного сооружения /Н.М. Хасанов, М. Джалалдинов //Вестник, ТНУ - Душанбе: ТНУ, 2015. №1/1(156). - С. 119-123.

106. Хасанов Н.М. Абдужабаров А.Х. Сейсмостойкость дорожных водопропускных труб и подземных переходов //Вестник, КГУСТА.-Бишкек: КГУСТА, 2013. №3.- С.101-104.

107. Хасанов Н.М. Абдужабаров А.Х. Расчет свода тоннелей с учетом динамических свойства грунтов в сейсмических районах //Вестник, КГУСТА Бишкек: КГУСТА, 2013. №3.- С.111-114.

108. Хасанов Н.М., Саидов М.Х., Ахмаджонов М.С. Влияние сейсмических воздействий взрывов на гидротехнических сооружений /Н.М. Хасанов, М.Х. Саидов,М.С. Ахмаджонов //РНПК, ТТУ, 26-марта.2024 г.-С.88-89

109. Хужаев П.С. Особенности улучшению работы системы вентиляции в подземных коммуникационных сооружениях /П.С. Хужаев, Н.М. Хасанов, Дж.И. Исматуллозода, Н.А. Сулаймонова //МНПК. «Энергетика: состояние и перспективы развития» 20.12.2023.С.461-474

110. Хасанов Н.М. Сейсмические воздействия взрывов на гидротехнические сооружения /Н.М.Хасанов, М.А.Сулаймонова//МНПК, «Водные ресурсы, инновация, ресурсо- и энергосбережения», 6-7 октября 2023 года, г.Душанбе, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана. С.274-282

111. Хасанов Н.М. Анализ технико-эксплуатационного состояния Дангаринского гидротехнического тоннеля /Н.М. Хасанов, А.М. Алимардонов, М.М. Зувайдов //МНПК: “Архитектурное образование и архитектура Таджикистана” 60 лет развития и совершенствования. ТТУ. 22 ноября. Душанбе. – С.260-263.

112. Хасанов Н.М. Напряженное состояние конструкции свода транспортных тоннелей при воздействиях динамических нагрузки //РНПК «Социально-экономические и организационно-технические основы развития строительного комплекса в РТ, ТТУ, декабрь. 2019. –С. 195-200.

113. Хасанов Н.М. Ятимов А.Ч. Влияние технологических и геологических факторов на величину переборов при проходке гидротехнических и транспортных тоннелей //МНПК Шымкент, Казахстан, 2019, 25 апреля. - С.17-20

114. Хасанов Н.М. Ятимов А.Ч. Консолидация горных пород при строительстве ГЭС //Конференция байналмимлали илмӣ – амалии донишҷӯён, магистрон, унвонҷён ва олимони ҷавон «Мухандис-2019», 29 декабри с 2018.

115. Хасанов Н.М. Якубов А.О. Инженерно-геологические условия, воздействующие на устойчивость гидротехнических сооружений // Конференция байналмилалии илмӣ-амалӣ, 21 апрел, ш.Душанбе, ДТТ, 2018 –С.306-310

116. Хасанов Н.М. Тешаев У. Р. Проектирования и строительство гидротехнических тоннелей и подземных машинных залов ГЭС //Международная конференция. Проспект свободный-2016. Красноярск, Сибирский федеральный университет. 2016 г. 15-25 апреля. -С.52-54.



117. Регисцкий В.И. и др. Результаты комплексных исследований на участке подземных сооружений Рогунской ГЭС. Гидротехническое строительство №2, 2015.-С.29-40

118. Шехурдин В.К. Задачник по горным работам, проведению и креплению горных выработок. М. Недра. 1985 -240с.

119. Проектирования и строительство больших плотин. Подземные работы и улучшения сальных оснований плотин. Издательства. «Энергия» Москва. 1966.-203с.

120.Хасанов Н.М., Мехрубонов М.Х., Саидов С.А. Анализ геолого-структурных и гидрогеологических условий участка разлома // Кишоварз. ДАТ. Теоретический и научно-практический журнал №2.2024.-С.178-183.

121.Саидов М.Х., Хасанов Н.М. Математическое моделирование участка разветвления строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС// Кишоварз. ДАТ. Теоретический и научно-практический журнал №2.2024.-С.183-194.

122.Зувайдов М.М., Хасанов Н.М. Математическое моделирование водопропускного тоннеля на примере D-1 Рогунской ГЭС // Кишоварз. ДАТ. Теоретический и научно-практический журнал №2.2024.-С.202-206.

123. Хасанов Н.М. Сейсмостойкость конструкций водопропускных сооружений и подземных переходов /М.Н. Хасанов, А.Х. Абдужабаров //Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1(60), февраль, г. Санкт-Петербург. - С.205-209.

### **Список публикаций соискателя ученой степени**

*Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:*

**[1-А]. Хасанов М.Н.** Применение КИА для измерений гидравлических параметров в тоннеле СТ-4 Рогунской ГЭС / Н.М. Хасанов, М.Х. Саидов, М.Н. Хасанов // Кишоварз. ДАТ. Теоретический и научно-практический журнал №1.- С.115-121

**[2-А]. Хасанов М.Н.** Выбор конструктивной обделки и цементационные работы строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС / М.Х.Саидов, М.А.Сулаймонова, М.Н.Хасанов // Политехнический Вестник №1. ТТУ, 2024. - С.200-208.

**[3-А]. Хасанов М.Н.** Выбор крепи участка разветвления строительного тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС / М.А.Сулаймонова, М.Н.Хасанов, А.М.Алимардонов, С.А.Саидов // Политехнический Вестник №1. ТТУ, 2024.- С.212-220.

**[4-А]. Хасанов М.Н.** Расположение геотехнических контрольно-измерительных приборов и системы мониторинга в СТ-4 Рогунской ГЭС /Н.М. Хасанов, Д.К. Давронов, М.Н. Хасанов // ТНУ, Серия геологических и технических наук 2024. №1. –С.75-83

[5-A]. **Ҳасанов М.Н.** Таҳқиқоти конструкцияҳои обгузаронанда бурришаш мудаффар аз таъсири қувваҳои зилзилавӣ /М.Х.Саидов, М.С.Ситамов, М.Н.Ҳасанов // ТНУ, Серия геологических и технических наук 2024. №1. –С.104-114

[6-A]. **Ҳасанов М.Н.** Геотехнической мониторинг контрольной измерительной аппаратурой для СТ-4 Рогунской ГЭС /Н.М. Ҳасанов, М.Х. Саидов, М.Н. Ҳасанов // Политехнический Вестник №4. ТТУ, 2023. -С.120-128

[7-A]. **Ҳасанов М.Н.** Зависимость минимальной глубины заложения напорных необлицованных тоннелей /М.Н. Ҳасанов, М.Х. Саидов //ТНУ-Душанбе: ТНУ, Серия геологических и технических наук 2023. №3. –С 28-33

[8-A]. **Ҳасанов М.Н.** Укрепительная цементация оснований плотин в гидротехнических сооружениях/А.Дж. Ятимов, Н.М. Ҳасанов, Ф.А. Холов, М.Н. Ҳасанов // Политехнический Вестник №1, ТТУ, 2023. -С.176-183

[9-A]. **Ҳасанов М.Н.** Анализ результатов исследований напряжений проявляющихся вокруг подземных выработок /А.Дж. Ятимов, Н.М. Ҳасанов, Ф.А. Холов, М.Н. Ҳасанов //ТНУ- Душанбе: ТНУ, Серия геологических и технических наук 2023. №1. –С.151-158

[10-A]. **Ҳасанов М.Н.** Результаты натурных измерений статических анализов и их оценки при проходке гидротехнических сооружений /Н.М. Ҳасанов, Ф.А. Холов, А.М. Алимардонов, М.Н. Ҳасанов // Политехнический Вестник №4, ТТУ, 2022. -С.112-120.

[11-A]. **M.N. Hasanov.** Peculiarities of swelling eocene clays as the base of structures / М.М. Zakirov, I.A. Agzamova, M.N. Hasanov //Tashkent state technical university named after islam kartrmov. Tashent 2021. №1(07). С.161-168

[12-A]. **Ҳасанов М.Н.** Арболитовые материалы на основе РВК с использованием стеблей хлопчатника/М.Р. Джуракулов, М.Н.Ҳасанов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. №4 (52) – 2020. – С.126-131

[13-A]. **Ҳасанов М.Н.** Зилзилатобоварии конструкцияҳои обгузарон ҳангоми таъсири зарбавии воситаҳои нақлиёт /М.А. Сулаймонова, М.Н. Ҳасанов, М.М. Зувайдов //МНПК, «Водные ресурсы, инновация, ресурсо- и энергосбережения», 6-7 октября 2023 года, г.Душанбе, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана. С.282-289

[14-A]. **Ҳасанов М.Н.** Инженерно - геологические условия и их влияние на напряженно-деформированное состояние подходного САСТ-5 Рогунской ГЭС /Ф.А. Холов, М.Н. Ҳасанов //МНПК, «Водные ресурсы, инновация, ресурсо- и энергосбережения», 6-7 октября 2023 года, г.Душанбе, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана. С.257-265

**[15-А]. Хасанов М.Н.** Анализ напряженного состояния напряжений проявляющихся вокруг подземных выработок /А.Дж. Ятимов, М.Н. Хасанов //Конференсияи чумхуриявии илмӣ-амалии устодон, донишҷӯён, магистрантҳо ва аспирантону унвонҷӯён таҳти унвони «Дурнамои тараққиёти истеҳсоли масолеҳҳои сохтмонӣ дар ҷумҳурии тоҷикистон », 31-уми марти соли 2023, ДТТ. Душанбе. –С.257-263

**[16-А]. Хасанов М.Н.** Воздействие наземного транспорта на тоннели мелкого заложения /Н.М. Хасанов, М.Н. Хасанов //МНПК на тему: «Куатбековские чтения-1: Уроки Независимости», посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан 23 апрель 2021 г. С.343-348

**[17-А]. Хасанов М.Н.** Строительство гидротехнических тоннелей Сангтудинской ГЭС-1/Н.М. Хасанов, М.Н. Хасанов //МНПК, «Прикладные исследования и экспериментальные разработки в области естественных и технических наук» г. Белгород, 28 октября, Россия. 2020. -С.59-66.

**[18-А]. Хасанов М.Н.** Зависимость сейсмостойкости водопропускных сооружений от ударных нагрузок транспортных средств/Н.М. Хасанов, М.Н. Хасанов //МНПК, «Прикладные исследования и экспериментальные разработки в области естественных и технических наук» г. Белгород, 28 октября, Россия. 2020. -С.53-59

**[19-А]. Хасанов М.Н.** Влияние сейсмических воздействий взрывов на устойчивость гидротехнических сооружений /Н.М. Хасанов, М.Н. Хасанов// V Международная (XI Всероссийская конференция) Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020. 25-26 ноября. ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова». -С.230-237

**[20-А]. Хасанов М.Н.** Улучшение оснований плотин ГЭС с помощью цементации /Н.М. Хасанов, А.Дж. Ятимов, М.Н. Хасанов // МНПК, г. Белгород, Россия. 30 октября 2019. -С.95-98



**[21-А]. Хасанов М.Н.** Натурные наблюдения за осадками грунта плотины в период строительства / Ё.Х. Ядгаров, М.Н. Хасанов // РНПК. ТТУ. факультет. «Строительство и архитектуры». 2019. –С. 206-213.

**[22-А]. Хасанов М.Н.** Теоретические и экспериментальные исследования сейсмостойкости подземных пешеходных переходов/Н.М. Хасанов, И. Носиров, М.Н. Хасанов //МНПК, «Естествознание, техника, технологии: современные парадигмы и практические разработки» г. Белгород, 30 октября, Россия. 2019 г. С.91-94.

**[23-А]. Хасанов М.Н.** Применение цементации для улучшение оснований плотин ГЭС /А.Дж. Ятимов, М.Н. Хасанов // РНПК. ТТУ. факультет. «Строительство и архитектуры». 2019. – С. 223-228.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**



ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН		ИДОРАИ ПАТЕНТӢ
<b>ШАҲОДАТНОМА</b>		
Шахрванд	Ҳасанов М.Н.	
муаллифи ихтирои	Конструкцияи иншооти обгузаронанда	
Ба ихтироъ нахустпатенти	№ ТҶ 1417	дода шудааст.
Дорандаи нахустпатент	Ҳасанов Н.М., Холов Ф.А., Ҳасанов М.Н., Алимардонов А.М., Зувайдов М.М.	
Сарзамин	Ҷумҳурии Тоҷикистон	
Ҳаммуаллиф(он)	Ҳасанов Н.М., Холов Ф.А., Алимардонов А.М., Зувайдов М.М.	
Аввалияти ихтироъ	22.11.2022	
Таърихи рӯзи пешниҳоди ариза	22.11.2022	
Аризаи №	2201758	
Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон		
25 августи	с. 2023	ба кайд гирифта шуд
Нахустпатент		
эътибор дорад аз	22 ноябри	с. 2022 то 22 ноябри 2032с.
Ин шаҳодатнома хангоми амалӣ гардонидани ҳукуку имтиёзҳое, ки барои муаллифони ихтироот бо қонунгузории ҷорӣ муқаррар гардидаанд, нишон дода мешавад		
ДИРЕКТОР		М. Имомилзода





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени академика М.С. Осими

734042, Душанбе, просп. академиков Раджабовых, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11, Факс: (+992 37) 221-71-35

Web: www.ttu.tj E-mail: info@ttu.tj

от «04» 02 2025г. № 24/97  
«\_\_» 2025г. №\_\_



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

ТТУ имени академика М.С.Осими  
профессор Давлатзода К.К.

« 05 » 02 2025г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертации Хасанова Мухриддина Нуралиевича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **05.23.00** – Строительство и архитектура (**05.23.07** - Гидротехническое строительство) в учебный процесс кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими.

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации диссертации Хасанова Мухриддина Нуралиевича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **05.23.00** – Строительство и архитектура (**05.23.07** - Гидротехническое строительство) на тему: «Влияние инженерно-геологических факторов на напряженно-деформированное состояние гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС» внедрены в учебный процесс кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» ТТУ имени академика М.С.Осими при изучении дисциплин: Шахтное и подземное строительство; Специальные способы строительства подземных сооружений; Основы горного дела и Гидротехническое строительство читаемых студентам (бакалаврам и магистрантам) по направлению подготовки специальностям 1-700201-06- Шахтное и подземное строительство и 1-700401-03-Строительство и эксплуатации ГЭС.



### **Основные результаты научной работы:**

В результате исследований проанализированы инженерно-геологические и гидрогеологические условия гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС, определены физико-механические свойства вмещающих горных пород, проектируемого гидротехнического тоннеля СТ-4, также при численном моделировании выявлены напряженно-деформируемые процессы, протекающие в горных породах гидротехнического тоннеля при проходке и возведении временной крепи.

### **Эффект использования результатов внедрения:**

Выявление геологических причин, оказывающих воздействий на разрушение и устойчивость вмещающих массивов горных пород гидротехнического тоннеля СТ-4 Рогунской ГЭС. Определение направления главного минимального и максимального напряжения на основе проведенных специальных исследований в больших подземных выработках. Также разработаны рекомендации по выбору классов крепи пород, для различных литологических частей гидротехнического тоннеля СТ-4 с учетом фактической геометрии тоннеля и геологических условий;

Материалы диссертации использованы в следующих документах, материалах и разработках:

- в учебном процессе при разработке методического материала для использования студентами специальности «Шахтное и подземное строительство» и «Строительство и эксплуатации ГЭС»;
- в разработках курсовых и дипломных проектов по указанным дисциплинам;
- в перспективных планах развития и строительства подземных сооружений Таджикистана.

Председатель комиссии

Якубов А.О.

Члены комиссии:

Бозоров Ш.А.

Джуракулов М.Р.

Хасанзода Н.М.

Хасанзода Н.Н.

Подписи к.т.н., и.о. доцента, декана факультета СиА Якубова А.О., членов комиссии: начальника Управления НиИ, к.т.н., доцента Бозорова Ш.А., к.т.н., Джуракулова М.Р., док.тех. и в.проф. кафедры «О,ФиПС», Хасанзода Н.М., док.арх, проф. кафедры «ПЗиС» Хасанзода Н.Н. заверяю:

Начальник отдела кадров  
и специальных работ ТТЗ им. акад. М.С. Осими

Қодирзода Н.Ҳ



«Утверждаю»



Начальник технического  
отдела ОАО «ТГЭМ»  
Гадоев О.Х.

АКТ

о внедрении научных результатов

Диссертационная работа Хасанов М.Н. посвящена исследованию влияния инженерно – геологических факторов на напряженно – деформированное состояние гидротехнического тоннеля СТ-4В Рогунской ГЭС, что является весьма актуальной темой.

Для достижения поставленной цели выполнены исследования инженерно – геологических и гидрогеологических условий место строительства проектируемого объекта СТ-4В.

Исследовано состояние и произведен мониторинг гидротехнического тоннеля СТ-4В, состоящего из 9-ти измерительных створов, которые представляют собой участки с контрольно – измерительной аппаратурой, основной целью которой является подбор схемы размещения контрольно – измерительной аппаратуры для измерения гидравлических параметров вдоль гидротехнического тоннеля СТ-4В.

В результате проведенных исследований разработаны рекомендации по выбору крепи породы для различных литологических частей гидротехнического тоннеля СТ-4В Рогунской ГЭС.

Начальник технического  
Отдела ГСПУ ОАО «ТГЭМ»  
в г. Рогун

Зангоне М.