

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



ТЕШАЕВ УМАРДЖОН РИЁЗИДИНОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ВОДООТВЕДЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ**

(На примере транспортных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан»

Республики Таджикистан)

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)»

Диссертация на соискание
учёной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
профессор С.А. Вохмин

Красноярск 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Анализ факторов, влияющих на устойчивость подземных сооружений и безопасность их эксплуатации.....	10
1.1.1 Геологические факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений.....	17
1.1.2 Гидрогеологические факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений.....	22
1.1.3 Влияния сейсмичности на устойчивость подземных сооружений.....	25
1.1.4 Климатические факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений.....	29
1.1.5 Техногенные факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений.....	34
1.2 Горно-геологическая характеристика районов строительства и эксплуатации тоннелей.....	38
1.3 Оценка состояния эксплуатируемых тоннелей «Истиклол» и «Шахристан»	43
1.4 Цель и задачи исследования	51
2 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ «ИСТИКЛОЛ» И «ШАХРИСТАН»	53
2.1 Раковины	54
2.2 Выщелачивание.....	56
2.3 Трещины и холодные швы	59
2.4 Образование морозобойных трещин на обделке тоннелей	65
2.5 Образование наледей.....	67
2.6 Сейсмическое воздействие.....	70
3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ	73
3.1 Методика оценки технического состояния конструкций и обустройств транспортных тоннелей.....	74

3.2	Водоулавливание агрессивных подземных вод транспортного тоннеля «Истиклол»	90
4	РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ ВОДОСБОРНЫХ СИСТЕМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ.....	101
4.1	Водосборные системы в условиях отрицательных температур	101
4.2	Методика расчёта и параметров теплоизолированных водосборных желобов	105
4.3	Исследование параметров теплоизоляционного желоба	108
4.4	Методика расчёта утепления лотков при внутритуннельном водоотводе ..	113
4.5	Электронагревающий водоотводной лоток.....	119
5	ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТОННЕЛЯХ «ИСТИКЛОЛ» И «ШАХРИСТАН» РТ	122
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Тоннели и другие подземные сооружения являются неотъемлемой частью современной транспортной инфраструктуры. Для Республики Таджикистан тоннели были и остаются важнейшей коммуникационной структурой региональной хозяйственной и общественной жизни. Около 60% территории республики занимают высокогорные пространства, лежащие выше 2700 м над уровнем моря. Специфические природно-климатические условия Республики Таджикистан, сложный, сильно расчлененный горный рельеф, высокая сейсмичность, суровый климат и т.д. затрудняют строительство и эксплуатацию транспортных тоннелей, железных дорог и других подземных сооружений. С течением времени при эксплуатации происходит нарушение работоспособности тоннелей. Характер и объёмы этих нарушений зависят как от чёткого выполнения технологии возведения постоянной крепи на стадии строительства тоннелей, так и от целого комплекса неблагоприятных факторов: горного давления, напорных агрессивных вод, значительного и резкого перепада температур, промерзания обделки и окружающих пород.

Значительный вклад в области теории и практики обеспечения безаварийной эксплуатации тоннелей в сложных горно-геологических и метеорологических условиях внесли: Булычев Н.С., Гарбер В.А., Горбушко Р.М., Дашко Р.Э., Злобин Г.А., Колесников А.В., Котюков П.В., Кудрявцев А.В., Кузьмин А.В., Левченко А.Н., Малеев Д.Ю., Никитин К.А., Пашкин Е.М., Поддубный В.В., Потапова О.А., Пьянкова А.Ю., Самылова Ю.А., Сорокина А.Т., Франкевич Г.С., Май Дык Минь, Нгуен Ван Хунг и другие.

Вместе с тем в ранее выполненных исследованиях недостаточно полно изучены вопросы, связанные с обеспечением безаварийной эксплуатации тоннелей, а также разработкой универсальной методики оценки и прогнозирования работоспособности горнотехнических сооружений.

При строительстве и эксплуатации большинства горных тоннелей в

Средней Азии столкнулись с проблемами влияния эндогенно–экзогенных факторов на устойчивость обделки и конструкций, приводящих к негативным последствиям. Ряд землетрясений, произошедших в последние годы, а также суровые климатические условия в Республике Таджикистан повредили, а в отдельных местах разрушили транспортные тоннели.

Обзор и анализ факторов, вызывающих повреждение конструкций тоннелей, а также методов и способов предупреждения негативного влияния этих факторов, является важной задачей современной науки, поскольку позволяет критически подойти к проектированию подземных сооружений и разработке новых методов и способов поддержания их в безаварийном состоянии.

Таким образом, необходимость решения данных проблем, а также разработка методов оценки состояния обделки и защиты тоннелей, расположенных в сложных горно-геологических и климатических условиях, от различных негативных факторов, является актуальной научно-практической задачей.

Цель работы - разработка технологии обустройства тоннелей, обеспечивающих безопасную эксплуатацию и увеличение сроков их безаварийной службы в условиях высокогорья.

Идея работы – повышение эффективности и безопасности эксплуатации транспортных тоннелей достигается посредством их обустройства водоотводными лотками, исключающими обледенение и образование морозобойных трещин в обделке тоннелей в условиях высокогорья и сурового климата.

Основные задачи исследований:

– оценить практику решения проблем вредного влияния горно-геологических, технологических и климатических факторов при строительстве и эксплуатации тоннелей;

- провести натурные исследования и специальные мониторинговые наблюдения состояния тоннелей, выявить и систематизировать факторы, влияющие на работоспособность транспортных сооружений;
- выполнить анализ разрушений подземных сооружений, возникающих под воздействием различных горно-геологических, технологических и климатических факторов;
- выполнить математическое моделирование и разработать расчётные схемы утеплённых водоотводных лотков для решения проблемы обледенения тоннелей;
- разработать практические рекомендации по предотвращению лёдообразования в тоннелях, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию подземных сооружений.

Методы исследований. При выполнении работы использовался комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение сведений, содержащихся в литературных, фондовых и патентных источниках, посвящённых рассматриваемым вопросам; натурные наблюдения и эксперименты в тоннелях, статистическая и аналитическая обработка полученных результатов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Техническое состояние транспортных тоннелей, расположенных в условиях высокогорья обусловлено горно-геологическими и климатическими условиями, предопределяющими раскрытие трещин в рабочих и деформационных швах при сейсмических явлениях и последующее обледенение поверхности тоннелей.
2. Для исключения образования в тоннелях наледей и морозобойных трещин в деформационных и рабочих швах обделки необходимо в их защитной зоне устраивать водоулавливающие и водоотводящие конструкции из теплоизолирующего материала, зависимость его максимальной толщины от ширины защитной зоны описывает уравнение логарифмической функции.

3. Конструкция теплоизолированных водоулавливающих и водоотводных лотков predetermined масштабом возможного обледенения и должна минимизировать затраты на защиту тоннелей в процессе их эксплуатации.

Научная новизна работы

1. Систематизированы горно-геологические, технологические и климатические факторы, влияющие на надёжность конструктивных элементов тоннелей, расположенных в условиях высокогорья;

2. Выявлены закономерности возникновения и развития дефектов обделки во времени в тоннелях, расположенных в условиях высокогорья;

3. Получены аналитические зависимости параметров, утеплённых водоулавливающих и водоотводных лотков на основе учёта коэффициента теплопроводности применяемого материала и температуры внутренней поверхности обделки тоннелей;

4. Разработаны способы предотвращения образования морозобойных трещин и наледей в тоннелях на основе использования новых конструкций теплоизолированных водоулавливающих и водоотводных лотков (патенты РФ № 185730 от 17.12.2018г. и № 2687693 от 15.05.2019 г.).

Теоретическая и практическая значимость работы

Практическая значимость работы

– разработан новый подход к оценке горно-геологических, технологических и климатических факторов, с последующим количественным учётом и прогнозированием их влияния на подземное сооружение и, вследствие этого, повышение качества принимаемых технических и технологических решений, как на стадии проектирования, так и непосредственно в период строительства и эксплуатации тоннелей в сложных условиях высокогорья;

– разработана методика расчёта параметров защитной зоны рабочих и деформационных швов, а также параметров, утеплённых водоулавливающих и водоотводных лотков;

– разработаны способы предотвращения образования морозобойных трещин и наледей в тоннелях на основе использования новых конструкций

теплоизолированных водоулавливающих и водоотводных лотков (патенты РФ № 185730 от 17.12.2018г. № 2687693 от 15.05.2019 г.).

Результаты исследования могут быть использованы:

- в практике научно-исследовательских и проектных институтов при проектировании строительства транспортных тоннелей, расположенных в условиях высокогорья;
- в практике контроля технического состояния тоннелей и принятия оперативных решений для предотвращения и ликвидации аварийных ситуаций.
- в качестве методического обеспечения при организации учебного процесса по подготовке горных инженеров специализации «Шахтное и подземное строительство». В учебном процессе на кафедре «Шахтное и подземное строительство» ИГДГГ СФУ.

Достоверность научных положений и рекомендаций подтверждена корректностью постановки задач исследований и представительным объёмом промышленных наблюдений и экспериментов.

В основу диссертации положены результаты, полученные в рамках полевых и научно-практических работ по изучению влияния различных факторов на безопасность, бесперебойность и устойчивость транспортных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» при их эксплуатации.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на конференциях различного уровня, в том числе: IV Международная (X Всероссийская) конференция НАСКР-2018 «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»; Научные семинары по итогам НИР в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск, 2015-2017 гг.; Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука» г. Красноярск, 2014-2018 гг.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; проведении натурных наблюдений и экспериментов; выполнении статистического анализа и прогнозировании влияния отрицательных факторов на

работоспособность тоннелей; разработке методики расчёта параметров защитной зоны рабочих и деформационных швов от влияния отрицательных температур; разработке систем водоотведения в условиях отрицательных температур; формирования основных выводов и рекомендаций по обеспечению безаварийной эксплуатации тоннелей в условиях высокогорья.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 11 печатных работах, из них 1 - в изданиях международного статуса SCOPUS, 1 - в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, 2 патента РФ на изобретение.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков, 18 таблиц, 18 формул, список литературы из 103 наименований.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю профессору С.А. Вохмину, профессору Ю.П. Требушу, а также всем сотрудникам кафедры «Шахтное и подземное строительство» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» за советы и неоценимую помощь при выполнении работы.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование вопросов, связанных с обеспечением надежности водоотведения и предотвращения разрушительного воздействия отрицательных температур на обделку при сооружении транспортных тоннелей и их эксплуатации на трассе Душанбе-Чанак, в теоретическом плане основано на работах, посвященных разработке методик оценки эффективных технологических решений, влияющих на устойчивость подземных горных выработок. Этот аспект методически целесообразно рассмотреть по факторам, влияющим на работоспособность тоннелей при их строительстве и эксплуатации, а в практическом плане – на анализе полученных данных о фактических разрушениях объекта исследования.

Выполненное таким образом обобщение теории и практики позволяет правильно и полно сформулировать задачи исследования.

1.1 Анализ факторов, влияющих на устойчивость подземных сооружений и безопасность их эксплуатации

Развитие городского, железнодорожного и водного транспорта вызвало во многих странах мира необходимость строительства специальных подземных сооружений - тоннелей. Тоннели относятся к наиболее ответственным, сложным и дорогостоящим искусственным сооружениям для автомобильного и железнодорожного транспорта, рассчитанным на длительный срок эксплуатации. Однако при большом сроке службы тоннелей их обделки подвергаются разрушениям под влиянием эндогенных и экзогенно-геологических процессов.

Вопросам обоснования эффективных технологических решений при строительстве капитальных горных выработок большое внимание уделялось научными и инженерно-техническими работниками горнотехнического

строительства. Настоящее исследование базируется на результатах большого числа ранее проведенных исследований, посвященных изучению состояния тоннелей и среды вокруг объекта, опубликованных ведущими отечественными и зарубежными учёными: Булычев Н.С., Гарбер В.А., Горбушко Р.М., Дашко Р.Э., Злобин Г.А., Колесников А.В., Котюков П.В., Кудрявцев А.В., Кузьмин А.В., Левченко А.Н., Малеев Д.Ю., Никитин К.А., Пашкин Е.М., Поддубный В.В., Потапова О.А., Пьянкова А.Ю., Самылова Ю.А., Сорокина А.Т., Франкевич Г.С., Май Дык Минь, Нгуен Ван Хунг и др. Они внесли в современную науку значительный вклад в области теории и практики обеспечения безаварийной эксплуатации тоннелей в сложных горно-геологических и метеорологических условиях. Однако, несмотря на большое внимание уделяемое вопросам безаварийной эксплуатации тоннелей, сегодня так и не решён вопрос создания универсальной методики оценки и прогнозирования работоспособности горнотехнических сооружений.

В этом плане, наиболее важным для тоннелей, как и для любых подземных сооружений, являются инженерно-геологические исследования. Они включают изучение геоструктурных, геоморфологических, гидрогеологических и других факторов, определяющих безаварийную эксплуатацию подземных инженерных сооружений. К числу основных факторов относятся: инженерно-геологические свойства горных пород, в том числе распространение, условия залегания, генезис, возраст, мощность, а так же состав и свойства приуроченных к ним подземных вод.

На основании анализа результатов инженерно-геологических работ принимается решение о возможности строительства подземных сооружений и определяются наиболее благоприятные места для их размещения.

Пашкин Е.М. одним из первых провёл изучение инженерно-геологических условий в области тоннелестроения. В его работах рассмотрены методологические основы исследований, вопросы влияния структурных и геологических факторов на формирование инженерно-геологических условий строительства тоннелей. Исследованы факторы, влияющие на устойчивость

горных пород при проходке, причины ее нарушения и прогноз. Дана методика определения параметров вывалов породы на основе математического моделирования с использованием расчётных схем. Он описал принципы взаимодействия массива горных пород и выработки (выбор оптимального сечения, безопасная проходка тектонических зон) [50].

Горбушко Р.М. в своей работе рассмотрел вопросы типизации инженерно-геологических условий строительства тоннелей на примере московского метрополитена для последующего информационного обеспечения туннельно-проходческих комплексов (ТПМК) [31]. В его работе подробно рассмотрены инженерно-геологические особенности трасс Лефортовского и Серебряноборских тоннелей. Предложен вариант типизации инженерно-геологических условий при строительстве тоннелей с применением ТПМК и разработана методологическая схема проведения инженерно-геологических изысканий для строительства тоннелей с применением ТПМК. Данная работа не охватывает широкий аспект изучения инженерно-геологических условий, в том числе высокогорные условия.

Большой вклад в изучение влияния инженерно-геологических условий на эксплуатацию транспортных тоннелей внесла Дашко Р.Э. [32-34] Под её руководством были изучены вопросы надежности и длительной устойчивости подземных сооружений Санкт-Петербургского метрополитена. В работах большое внимание уделено вопросам влияния техногенных факторов на конструкции тоннелей и обеспечения их надежной эксплуатации [33, 35].

Вопросами инженерно-геологического и гидрогеологического обеспечения эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений занимался Котюков П.В. [33]. В его исследованиях приведены результаты изучения структурно-тектонических, инженерно-геологических, гидрогеологических и геоэкологических условий по трассам тоннелей Санкт-Петербурга и оценено их влияние на устойчивость конструкционных материалов тоннельных обделок. По результатам исследований выполнено зонирование трасс тоннелей и разработаны рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности перегонных тоннелей.

Кудрявцев А.В. провел исследования в области надежности эксплуатации и технологии строительства тоннелей железнодорожных трасс Абакан–Тайшет и Абакан–Междуреченск [36]. В его работах рассмотрено влияние инженерно-геологических условий, горного давления, наличия напорных агрессивных вод, значительного и резкого перепада температур, промерзания бетона и окружающих пород на устойчивость тоннельного сооружения. Разработана методика определения параметров и оценки влияния морозобойных трещин на устойчивость и надежность тоннелей, определены оптимальные значения уровня надежности тоннелей в зависимости от их назначения, усовершенствована методика определения смещений окружающих пород от действия различных факторов (глубина их расположения, крепость, трещиноватость и степень обводненности пород, отставание крепи от забоя). Однако в работе не рассмотрено изменение (ухудшение) состояния тоннелей в течение определенного промежутка времени, а рассмотрены только существующие на момент оценки дефекты.

Исследованиями в области изучения инженерно-геологических условий тоннелей на Дальнем Востоке занимался Малеев Д.Ю. Его работы посвящены комплексному изучению инженерно-геологических условий тоннелей Хинганского массива (Лагар–Аульский, Облученский, Казачинский, Тарманчуканский, Райчихинский) [37]. Были исследованы особенности геологического строения и гидрогеологические условия тоннелей, определены физико-механические свойства горных пород и построены корреляционные зависимости для различных параметров. Впервые для трассы вышеперечисленных тоннелей были применены геофизические методы изысканий и сейсморазведка, позволяющие наиболее точно определить особенности геологического строения массива. Большое внимание уделено вопросам геодинамики, неотектоники и сейсмологии. Изучены закономерности развития неотектонических процессов, выполнено сейсмическое микрорайонирование, рассчитана оценка сейсмического риска и т.д.

Строительство Северо-Муйского тоннеля велось в сложнейших инженерно-геологических условиях, с пересечением большого количества разно ранговых разломных зон, в суровом климате и при высокой сейсмичности участка строительства (9 баллов). При строительстве тоннеля были освоены в то время новейшие методы и оборудование (проходка механизированными тоннелепроходческими комплексами, использование механизированной опалубки сечением до 60 м², применение сейсмо- и термостойкой двухслойной обделки тоннеля и др.). Разработаны и применены новые технологии (химическое закрепление неустойчивых грунтов в зонах тектонических разломов, автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) при строительстве и др.).

Научный интерес представляют исследования ученых в области гидрогеологии [55,56], сеймики [58,60], геофизики [57] и т.д. Множество зарубежных исследований показывают актуальность и заинтересованность в инженерно-геологическом изучении тоннелей.

Одним из мировых лидеров объёма строительства тоннелей является Япония. В настоящее время на ее территории эксплуатируются 3062 железнодорожных тоннеля общей протяженностью 2450 км при общей длине железных дорог 20700 км, т.е. около 10 % общей длины железных дорог Японии составляют тоннели [61]. Такое развитие отрасли связано со сложным рельефом, инженерно-геологическими условиями, высоким развитием транспортной инфраструктуры и дефицитом неосвоенной территории. В связи с этим, методика инженерно-геологических изысканий в этой стране является наукоемкой, проработанной и надежной, так как опирается на огромный опыт изысканий, строительства и эксплуатации тоннелей.

Строительство тоннелей в Японии имеет свою специфику: высокая сейсмичность территории, часто слабые грунты и сложное геологическое строение, большие и малые глубины залегания трассы тоннелей, сложность применения стандартных методов изысканий и т.д. На территории Японии происходит множество землетрясений, в том числе и разрушительных

(землетрясение Тохоку 2011), которые наносят повреждения тоннельным сооружениям.

Исследованиям воздействия землетрясений на тоннельные конструкции посвящены большое количество работ [62 - 67]. В работах данных авторов исследуются поведение тоннельных конструкций при землетрясениях [64,65], моделируется поведение тоннелей при землетрясениях [62], применяются расчёты и анализ для прогноза устойчивости и возможных деформаций тоннелей [63,64,66].

Май Дык Минь (Вьетнам) исследовал воздействие сейсмике на тоннель. В его работе [18] выполнен анализ разрушений подземных сооружений при землетрясениях, проведён обзор существующих методов расчёта устойчивости подземных сооружений при сейсмических воздействиях, разработаны упрощенные аналитические способы расчёта сейсмостойких подземных сооружений. На основе этого им разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния тоннелей, пересекающих зоны разлома и предложены способы, позволяющие уменьшить повреждения тоннельных обделок.

Ряд авторов рассматривают вопросы проходки тоннелей в слабых грунтах, часто ослабленных разломами, из-за которых происходит осадка и вывалы грунта [68, 69]. Предложены новые методы мониторинга состояния массивов [70], проходки [71] и мероприятия по закреплению грунтов [72], а также использование геофизических методов исследования.

Строительство 12-километрового тоннеля Сюешань (Тайвань) велось в сложных геологических и гидрогеологических условиях, которые значительно затруднили и замедлили строительство (1991–2006 гг.). В период строительства происходили многочисленные вывалы, прорывы грунтовых вод, оползни и т.д. К моменту ввода в эксплуатацию Сюешань являлся самым протяженным тоннелем в Азии и 4-м по длине тоннелем в мире. Материалы, полученные на всех этапах строительства тоннеля, получили развитие в работах многих авторов [60 - 72].

Представляют интерес работы турецких ученых в области инженерно-геологических исследований при строительстве тоннеля Дорухан (Dorukhan) [73], гидротехнического тоннеля Салакьюрт (Sulakyurt) [74] и автодорожного тоннеля Орду (Ordu) [75]. Изучению инженерно-геологических условий и причин деформации крепи гидротехнического тоннеля Лам Та Хонг, Тайланд (Lam Ta Khong, Thailand) посвящена работа японских и тайских ученых [76].

Анализ ранее проведенных исследований [2,3,14-17,20-23,92,87] подтверждает актуальность изучения инженерно-геологических, гидрогеологических, геотехнических проблем в области тоннелестроения и позволил обобщить и систематизировать основные факторы, влияющие на работоспособность тоннельной обделки (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Систематизация факторов, влияющих на устойчивость обделки тоннелей

В результате воздействия приведенных факторов происходит деструкция вмещающих горных пород, разрушение крепи и внезапные обрушения подземных сооружений.

Основными задачами обеспечения длительной, безаварийной эксплуатации являются учёт этих факторов при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений, прогноз состояния обделки тоннелей, разработка

рекомендаций по предупреждению техногенных аварий, предотвращение или снижение влияния вредных факторов.

1.1.1 Геологические факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений

Вопросы надежности при строительстве тоннелей подземных сооружений и в процессе их эксплуатации относятся к основным, т.к. имеют большое технологическое и экономическое значение. При проектировании и строительстве тоннелей одним из основных факторов являются геологические условия района расположения тоннеля. Недооценка воздействия геологических факторов на конструкции приводит, как правило, к негативным последствиям.

Обрушение породы является самым распространенным из видов аварий как в строящихся, так и в эксплуатируемых горных выработках [2]. Обрушение - непредвиденное сдвигание горных пород с отделением от массива кусков, глыб, блоков и т. п. Обрушение наступает из-за ослабления структурных сил сцепления между отдельными частями массива, который из состояния покоя переходит в состояние движения при влиянии различных факторов.

Имеются случаи, когда горный массив, прорезаемый тоннелем, подвергается оползням, сдвигам, просадкам, вызывая тем самым деформации сооружения или даже его разрушение. Нередко массив вполне устойчивый до постройки тоннеля, начинает смещаться в процессе эксплуатации вследствие нарушения режима подземных вод, вызванного обильным водопротоком к самой выработке и дренажным сооружениям. Обычно приходится иметь дело с разрушениями отдельных участков, расположенных у порталов или внутри тоннеля. Степень разрушения конструкции в свою очередь может быть полной или частичной.

Потери устойчивости выработки Булычев Н.С. [22] скомпоновал в следующие группы: вывалообразование, разрушение в зонах концентрации напряжений и чрезмерные смещения поверхности выработок вследствие

пластических деформаций. В общем случае устойчивость подземных сооружений зависит от ряда факторов и свойств горных пород, действие которых на их надежность оценивается безразмерными коэффициентами, фактические значения которых устанавливаются на основании практического опыта и экспериментальных исследований.

Степень устойчивости окружающих горных пород определяется величиной комплексного показателя S (таблица 1.1) [24]:

$$S = f \times \frac{K_M \times K_R \times K_W}{K_N \times K_t \times K_A \times K_\alpha}, \quad (1.1)$$

где f , K_M , K_N , K_W , K_R , K_t , K_A , K_α – коэффициенты, характеризующие или учитывающие соответственно крепость пород, влияние степени трещиноватости, число систем трещин и слоистость, обводненности пород, влияние шероховатости поверхности трещин, величину раскрытия незаполненных трещин, заполнение трещин раздробленной породой, ориентацию выработки относительно наиболее развитой системы трещин.

Таблица 1.1 - Значения комплексного показателя устойчивости

Комплексный показатель устойчивости S	Категория устойчивости породы	Степень устойчивости породы (массива)	Допустимое время обнажения выработки
≥ 70	I	Вполне устойчивый	Не ограничено
5 – 70	II	Устойчивый	До 6 мес.
1 – 5	III	Средней устойчивости	10 – 15 сут.
0,05 – 1	IV	Слабоустойчивый	Не более 1 сут.
$\leq 0,05$	V	Неустойчивый	Не допускается

В процессе эксплуатации разрушение тоннелей может произойти либо вследствие несоответствия конструкции обделки действующим нагрузкам, либо в результате непреднамеренного разрушения. Не достаточно полный учёт геологических факторов приводит к тому, что несущие конструкции тоннеля не будут соответствовать действующим нагрузкам, а это чаще всего приводит к постепенным повреждениям и возрастанию деформаций обделки.

В зависимости от характера распространения обвала пород и его размера завалы бывают следующих типов: закрытый глухой завал (глухой завал с отрывом), при котором над тоннелем образуется свод обрушения, а порода заполняет весь поперечный профиль тоннеля (рисунок 1.2, а), завалы с отрывом, при котором над тоннелем образуется свод обрушения с частичным заполнением поперечного профиля тоннеля породой (рисунок 1.2, б) и завал переходного типа, когда с одной стороны он имеет вид глухого завала, а с другой стороны поперечный профиль тоннеля заполнен породой частично (рисунок 1.2, в) [2, 3,92].

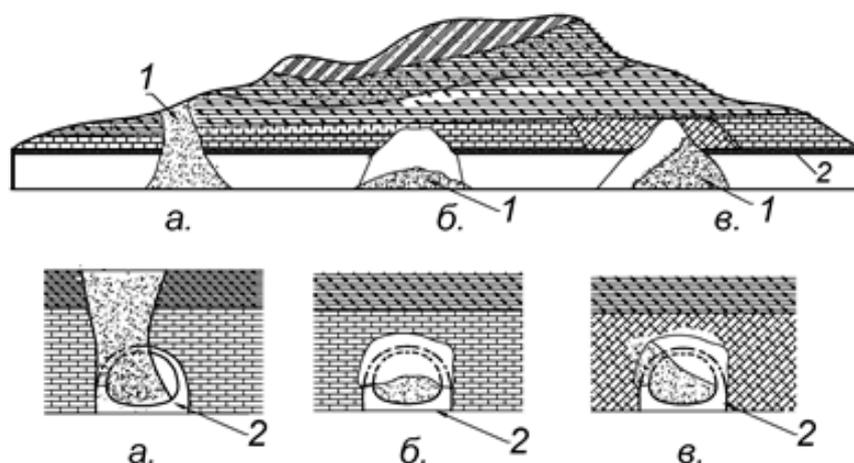


Рисунок 1.2 - Обрушения породы в эксплуатируемых выработках (тоннелях):
1- вывал; 2 - обделка

В зонах развития опасных геологических проявлений (оползней, обвалов, селевых потоков, снежных лавин и др.) необходимо проектировать защитные сооружения или предусматривать мероприятия, обеспечивающие необходимую защиту порталов и припортальных участков тоннеля от негативных процессов.

Карстовые пустоты тоже могут являться причиной деформации тоннелей. Эти пустоты в виде пещер, каверн, гротов возникают под влиянием растворяющего и механического воздействия воды. Карстовые пустоты особенно опасны в случае заполненной их водой и образованием карстовых озер, из которых может произойти внезапный прорыв воды в тоннель. В некоторых случаях эти пустоты заполняются отложениями, выщелачиваемыми из

близлежащих пластов горных пород, что могут послужить причиной появления значительных местных нагрузок на обделку.

Строительство подземных сооружений в рыхлых породах связано с наиболее интенсивным горным давлением. Инженерно-геологические условия особенно осложняются при перенасыщении пород водой (илы, пливуны, водонасыщенные пески и т.д.).

Горное давление породы на тоннель зависит от физико-механических свойств грунтов и расположения тоннеля в напластованиях. Различают следующие виды горного давления (рисунок 1.3) [14]:

- горизонтальное (боковое) давление грунта на стены;
- продольное давление, возникающее у порталов от скольжения пластов склона по смоченным нижележащим слоям пород.
- вертикальное давление сверху вниз от свода обрушения;
- вертикальное давление снизу-вверх по почве выработки от «вздутия» глинистых грунтов или выпирания породы из-под фундаментов стен.

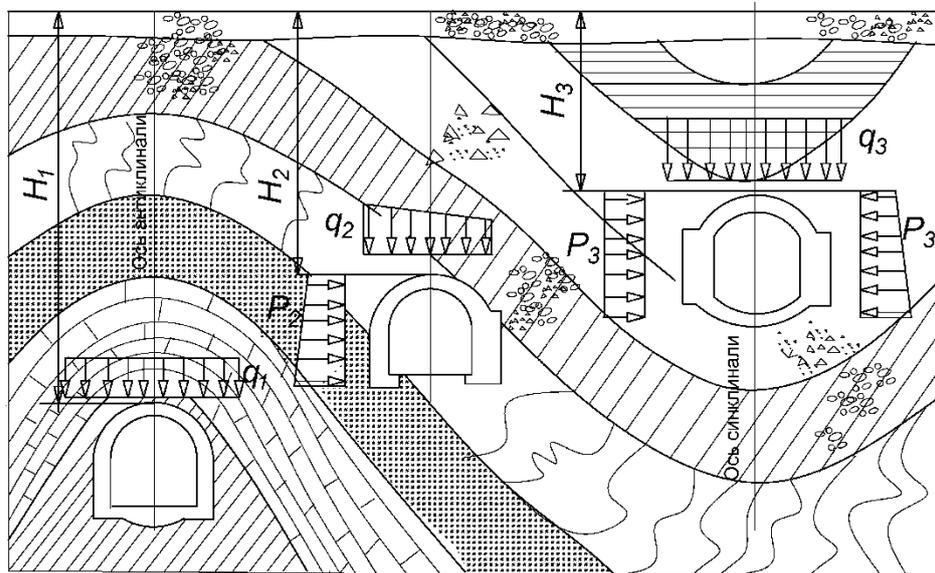


Рисунок 1.3 - Зависимость конструкции обделки тоннелей от инженерно-геологических условий

При совпадении оси тоннеля с осью прямой не нарушенной антиклинальной складки давление на обделку будет минимальным благодаря перекрытию

подземной выработки естественным породным сводом, воспринимающим давление вышележащих слоев [14].

Расположение тоннеля в одном из крыльев антиклинали вызовет одновременно с увеличением вертикального большое одностороннее боковое давление, вследствие которого возникает необходимость в сооружении мощной обделки несимметричного очертания.

В ещё худших условиях окажется тоннель, проложенный по оси синклинали, либо веерообразной складки с воздушным седлом, где величины вертикального и горизонтального давления могут достигнуть больших значений, особенно при водообильности подсекаемых пластов, и вызвать необходимость устройства сверхмощной и дорогой обделки. Несмотря на то что $H_1 > H_2 > H_3$, величина горного давления будет обратной глубине заложения, т. е. $q_1 < q_2 < q_3$ (рисунок 1.3).

Тектонические нарушения, выраженные зонами разлома, оказывают влияние на конструкцию обделки, методы работ и после построечную устойчивость массива и тоннеля. Строительство подземных сооружений в зонах тектонического разлома сопряжено с возможными обвалами больших масс породы и прорывов напорной воды, часто вызывающих аварии и разрушения.

Так, обнаруженный при инженерно-геологических изысканиях разлом горного массива привел к срыву работ на Северо-Муйском тоннеле и значительному увеличению срока его строительства.

Горные удары, происходящие обычно на большой глубине (свыше 200 м) преимущественно в породах высокой прочности, тоже могут представлять опасность разрушительного характера. Горные удары являются не достаточно изученным явлением и объясняются мгновенным переходом потенциальной энергии упругих деформаций в кинетическую. Проявляются горные удары катастрофическими выбросами большого объема породы и сопровождаются сотрясением горного массива и воздушными ударами.

Наиболее сложен случай расположения тоннеля в условиях бессистемного сочетания разнообразных форм залегания пород с различными физико-

механическими свойствами и углами падения и простирания пластов. При этом обделка на различных участках трассы будет испытывать резкое изменение горного давления не только по величине, но и по направлению действия сил. Наличие статического горизонта подземных вод влечет за собой вероятность появления гидростатического давления, величина которого должна определяться с учетом возможного снижения уровня воды, вызванного проведением подземной выработки, являющейся искусственным дренажем.

Таким образом, геологические особенности необходимо учитывать при обосновании конструкции тоннельной обделки, порталов, дренажных и укрепительных мероприятий, а также при выборе метода производства работ как на всём протяжении тоннеля, так и на каждом характерном его участке.

1.1.2 Гидрогеологические факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений

Влияние гидрогеологических условий на тоннельные конструкции может проявиться в виде дополнительной нагрузки от гидростатического давления, а также вредного воздействия подземных вод на породу, окружающую выработку, конструкцию и материал самой обделки. Инфильтрация швов и трещин в тоннельных стенах приводят к ухудшению состояния конструкции тоннеля, за счёт воздействия химических реагентов, приводящих к выщелачиванию бетона. Это приводит от незначительной поверхностной коррозии к серьезному ухудшению структуры материала крепи и снижению несущей способности конструкции обделки тоннеля [25].

Большинство тоннелей эксплуатируются в условиях инфильтрации воды сквозь обделки (рисунок 1.4, а), что приводит к следующим рискам появления опасности:

- ослабление структуры бетона;
- коррозию арматуры, что вызывает расслаивание и сколы бетонного покрытия;

- коррозию крепежных изделий внутренней отделки или других аксессуаров (вентиляторов, осветительных приборов и т.д.), что может вызвать коррозию и создавать опасность движения транспорта во время сейсмического события;
- замерзание воды на проезжей части, а также в форме сосулек, что создаёт опасность движения транспорта (рисунок 1.4, б);
- расслаивание и отделение бетона при замораживании и оттаивания;
- появление морозобойных трещин при отрицательных температурах.

а)



б)



Рисунок 1.4 - Автодорожные тоннели «Истиклол» и «Шахристан». а- инфильтрационные подземные воды в тоннеле «Шахристан»; б - сосульки на стенах тоннеля «Истиклол»

Со временем свойства породы, окружающей обделку тоннелей, под воздействием гидрогеологических факторов могут меняться, тем самым изменяя условия статической работы обделки. Тоннели, заложенные в глинах, глинистых сланцах и мергелях, находятся в наиболее неблагоприятных условиях работы обделок. Процесс упругого расширения глины (пучение), которая до проходки выработки находится под воздействием вышележащих пород в условиях трехосного сжатия, приводит к разрушению обделки. Аналогичные явления, вызванные действием воды с химическими процессами, обычно наблюдаются в мергелях, при этом интенсивность набухания зависит от их физико-механических свойств и петрографического состава пород.

Некоторые разновидности известняков и полевошпатовых пород под влиянием процессов выветривания быстро разрушаются, увеличиваясь при этом в объёме и оказывая на обделку значительное давление разрушительного характера.

Рисков для возникновения коррозии и начала разрушения бетонных конструкций довольно много. Химическая коррозия является следствием атмосферных осадков, свойств горных пород и состава артезианских вод, воздействия углекислого газа, который всегда присутствует в составе воздуха. Наибольшее разрушительное воздействие на бетон происходит в результате атмосферных осадков, которые включают хлориды, сульфаты или карбонаты.

Разрушение припортальной части тоннелей происходит в результате воздействия осадков, в составе которых присутствуют оксиды азота – так называемые «кислотные дожди».

Существует ряд химических процессов, влияющих на устойчивость отделки тоннелей:

- растворение цементного камня под действием влаги;
- химическая реакция агрессивных сред с цементом, с дальнейшим растворением полученных продуктов и вымыванием их из толщи бетона, либо появлением бесформенных отложений;
- проникновение в незащищенную конструкцию растворов сульфатов с последующей кристаллизацией в порах продуктов химической реакции и появлением внутренних напряжений, приводящих к нарушению структуры материала;
- повреждение бетона живыми организмами, проникшими в поры и развивающимися внутри них (лишайник, мох, грибки и т.д.).

Несмотря на свою кажущуюся прочность, бетон подвержен разрушению. В этом процессе могут участвовать разнообразные факторы и агрессивные вещества, вступающие в реакцию с цементным камнем. К ним относятся соли аммония и магния, кислоты, щелочь, углекислота, сульфаты, ионизирующие излучения, действие электрического тока, корродирующая арматура.

Химические процессы также могут вызвать значительное увеличение объёма породы и нагрузок на отделку. Так, ангидрит в соединении с водой превращается в гипс - водный сернокислый кальций и увеличивается при этом в объёме почти на 33%. Химические процессы, приводящие к увеличению объёма

пород, могут оказывать длительный характер вредного воздействия на условия работы тоннельной обделки, в некоторых случаях десятки лет.

Как правило, подземные воды снижают прочность и устойчивость горных пород. Некоторые породы, такие, как глины, мергели и пески, при соединении с водой становятся непрочными, иногда превращаются в пльвуны и со временем могут оказать значительное давление на обделку тоннелей.

Вредное воздействие подземных вод на конструкции обделки тоннеля проявляется также в виде фильтрации через него. При растворении карбоната и гидрата окисей кальция и выщелачивании их из бетона в значительной мере снижает прочность обделки. Кроме того, в районах с суровыми климатическими условиями, проникновение подземных вод через обделку в тоннель в зимнее время еще в большей степени ухудшает условия работы обделки. Попадая в поры, швы и трещины кладки вода замерзает и, увеличиваясь в объёме, разрушает обделку. Кроме того, при размораживании кладки и разрушения обделки в зимнее время происходит образование наледей, что приводит к временной негабаритности тоннеля и необходимости систематической сколки льда.

1.1.3 Влияния сейсмичности на устойчивость подземных сооружений

Сейсмическое воздействие относят к наиболее опасным негативным проявлениям, влияющим на устойчивость подземных сооружений. При этом следует отметить, что транспортные тоннели, так же, как и другие подземные конструкции, менее подвержены разрушениям при землетрясениях, чем наземные здания и сооружения. Проблемы сейсмического воздействия при транспортном тоннелестроении должны решаться комплексно на основе использования новейших сведений в области геологии и геофизики, сейсмологии и инженерной сейсмологии, теории сейсмостойкости и строительства сейсмостойкой конструкции [87,89].

Сейсмические воздействия на тоннели должны учитываться в обязательном порядке. Во время сильных землетрясений, некоторые подземные конструкции

получили серьезные повреждения и даже были разрушены [15]. В результате оценки статистического анализа повреждений тоннелей при различных землетрясениях было установлено следующие соотношения.

Тоннели при землетрясениях не повреждаются, если пиковое ускорение частиц грунта $a_g < 0,19g$ и пиковая скорость движения частиц грунта $v_g < 20\text{см/с}$; тоннель будет незначительно повреждён, если пиковые ускорения находятся в пределах $0,19g < a_g < 0,5g$ и пиковые скорости: $20\text{см/с} < v_g < 80\text{см/с}$; тоннель может получить серьезные повреждения, если пиковое ускорение и пиковые скорости превышают следующие значения: $a_g > 0,5g$ и $v_g > 80\text{см/с}$ [16].

По характеру разрушения от сейсмических воздействий подземные сооружения объединены в три группы [17,20];

- тоннели, построенные горным способом;
- тоннели, построенные открытым способом;
- стальные и пластмассовые трубопроводы.

В работах Dowding С.Н. и Rozen А. приведена классификация причин повреждения тоннелей, от сейсмического воздействия [16]:

- повреждения, вызванные разрушениями окружающего грунта, такими как разжижение или оползни в тоннельных порталах;
- повреждения от смещения в зоне разлома;
- повреждения из-за колебаний грунта, возникающих при распространении сейсмических волн.

Предвидеть возможные повреждения подземных сооружений, вызванные разрушением грунта возможно с помощью геомониторинга.

Все подземные сооружения могут испытывать три вида деформации при сейсмическом воздействии: продольные деформации (сжатия и растяжения), изгибающие деформации и деформации сдвига. Повреждения тоннелей зависят от параметров землетрясения, характера деформаций массива грунта около подземных сооружений и особенностей конструкции их обделки. В зависимости от соотношения жёсткости обделки подземных сооружений и массива грунта сооружения будут либо деформироваться вместе с массивом грунта, либо

сопротивляться деформациям. Если жёсткость тоннеля превышает жёсткость среды, то в зоне контакта в грунте может образоваться пластическая зона.

Существуют следующие виды повреждений подземных сооружений при воздействии сейсмических сил:

- разрушение обделок при сдвиге горных пород;
- появление продольных, поперечных и наклонных трещин;
- деформации стен сооружения.

По результатам работ [4 - 11,18,20] выполнен анализ поведения тоннелей и их повреждений при землетрясениях: тоннель Танна при землетрясении «Кита-Идзу» в 1930 г.; тоннель «Инатори» при землетрясении Идзу-Осима-Кинкаи в 1978 г.; гидротехнический тоннель при землетрясении Наганокен-Сейбу в 1984 г.; железнодорожный тоннель «Райт» при землетрясении в Сан-Франциско в 1906 г.; тоннель «Болу» при землетрясении Дюздже в 1999 г. в Турции [6]; тоннель «Шиганг» при землетрясении Чи-Чи в 1999 г. на Тайване [8].

После землетрясения 2008 года в Вэньчуань (Китай) были зафиксированы чрезвычайно серьезные повреждения туннелей, включая обрушение и сдвиги обделки (рисунок 1.5) [19, 20].



Рисунок 1.5 - Разрушение тоннелей при землетрясении 2008 года в Вэньчуань (Китай)

Согласно докладу Исследовательского центра связи и проектирования, а также Отдела коммуникаций провинции Сычуань (CSDISPCTD, 2008) среди 52 обследованных горных туннелей было повреждено 42, в том числе 20 из них потребовали капитального ремонта, а в остальных туннелях существенных повреждений после землетрясения не выявлено.

В практике эксплуатации тоннелей имеются случаи крупных разрушений, основными причинами которых являются: несоответствие принятых конструктивных решений фактическим гидрогеологическим условиям; отступления в процессе строительства от принятых проектных решений; возрастание величины горного давления; образование пустот за обделкой и обвалы горного массива в результате воздействия подземных вод; внезапные сдвиги и оползни из-за неустойчивости горного массива; воздействие на тоннель сейсмических сил.

Обрушения массива породы на стадии эксплуатации подземных сооружений происходят в отдельных местах, образуя так называемый завал, причем в зависимости от размеров вывала обрушившаяся порода может целиком или частично заполнить участок сооружения. Например, на строящемся транспортном тоннеле на территории уезда Шицзянь провинции Гуанжоу Китайской Республики произошёл обвал горной породы (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 - Обвал в транспортном тоннеле, Китай

Произошли повреждения транспортного тоннеля «Шахристан» при землетрясении Кули Сарез (Озеро Сарез) в 2015 г. в Республике Таджикистан.

Анализ показал, что к основным мерам по уменьшению повреждений тоннелей сейсмического действия относятся:

- стабилизация грунта;
- удаление и замена жестких грунтов вокруг тоннеля;
- изменение трассы или заглубление тоннеля.

1.1.4 Климатические факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений

Большинство климатических факторов также оказывают неблагоприятное воздействие на крепь тоннелей. Эти факторы проявляются в виде ухудшения эксплуатационных качеств сооружения, снижения прочностных и других свойств материалов обделки и, как следствие, снижения долговечности сооружения. К климатическим факторам, влияющим на работоспособность и безопасность эксплуатации тоннелей, относят температуру воздуха и его влажность, атмосферные осадки, ветровую нагрузку и т.д.

Действие низких отрицательных и знакопеременных температур воздуха в сочетании с обводнением существенно влияет на долговечность и эксплуатационную надежность тоннелей. В период зимних холодов при воздействии этих факторов на ряде сооружений ограничивают скорости движения транспортных средств из-за обмерзания тоннелей, что приводит к значительному снижению пропускной способности. Негативное воздействие отрицательных температур проявляется не только в северных районах, но и в областях с относительно мягким климатом, например, на Урале, горах Кавказа и средней Азии.

Последствия воздействия низких температур воздуха и подземных вод на общее состояние тоннельных конструкций и обустройств отличаются разнообразием. Выделяют следующие основные угрожающие последствия при отрицательных температурах на безопасность движения транспорта:

- образование наледей, вызывающих ускоренное разрушение обделки и пути, нарушающих габариты тоннеля;
- морозное пучение грунтов, создающее дополнительное давление на конструкции обделки и верхние строения пути;
- промерзание дренажных и водоотводных устройств, вызывающих выход наледей на пути;
- появление в обделке значительных температурных напряжений, вызывающих деформации и разрушение конструкций сооружения;
- снижение долговечности, прочностных и других характеристик материалов обделки тоннеля;
- ускорение процесса коррозии материалов;
- возникновение в элементах сооружения усилий и напряжений от колебания температуры;
- сезонное промерзание горных пород и дренирующих подземных вод, вследствие низких температур воздуха, что приводит к появлению морозобойных трещин.

При содержании искусственных сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях, особое внимание должно уделяться осуществлению профилактических мер, направленных на обеспечение надлежащего состояния русел и укрепительных устройств. Недоучёт специфических особенностей сурового климата приводит к тому, что практически сразу же после ввода тоннеля в эксплуатацию приходится выполнять значительные объёмы ремонтно-восстановительных работ. Влияние знакопеременных температур ведет к разрушению тоннельных обделок, выходу из строя дренажных и водоотводных устройств, вызывает необходимость досрочного ремонта или реконструкции отдельных участков тоннелей. В результате в большинстве тоннелей, эксплуатируемых в районах с суровым климатом, действуют ограничения скорости движения транспортов, а для ремонта конструкций обделки и борьбы с наледями приходится расходовать значительные трудовые и материальные ресурсы.

Влажность воздуха является основным фактором метеорологической или атмосферной коррозии материалов отделки. Коррозия приводит к постепенному разрушению материалов сооружения, и как следствие к снижению его несущей способности и долговечности. Всё это обуславливает ускоренное старение защитных антикоррозийных (гидроизоляционных) покрытий.

Вследствие значительных перепадов температур воздуха внутри сооружения и соответственно, тоннельной отделки, в последней возникают растягивающие напряжения, превышающие иногда предел прочности бетона на растяжение. Это приводит к разрыву сплошности конструкции с образованием трещин разнообразной ориентировки (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Образование морозобойных трещин в Манском тоннеле

Отрицательные температуры вызывают раскрытие уже имеющихся трещин, а положительные - способствуют их смыканию. Большое значение имеет разность температуры отделки на её внутренней и внешней поверхности - на контакте с грунтом. Казаков В.П. установил, что на внутренней поверхности бетонной отделки толщиной 500...600 мм развиваются растягивающие напряжения 0,4 МПа на 1°С разницы температуры между внутренней и внешней поверхности отделки. Наиболее активное развитие таких напряжений приурочено к припортальным участкам тоннеля, где существенно влияние наружного воздуха.

Одним из наиболее важных процессов, происходящих при промерзании горных пород, требующих учета при сооружении крепи, является увеличение его объёма (как правило, неравномерное) и последующая осадка-просадка при оттаивании (также неравномерная), которые являются самой распространённой причиной деформаций различных зданий и сооружений при производстве работ в зимнее время.

Одной из причин образования трещин является наличие жёсткого контакта между грунтом и обделкой, что при изменении температуры приводит к напряжениям стеснения, т.е. напряжениям, возникающим вследствие защемления внешней поверхности обделки. Кроме того, чем меньше толщина обделки, тем, при прочих равных условиях, ниже возникающие в ней температурные напряжения. Отсюда следует, что уменьшить величину температурных напряжений возможно путем снижения степени сцепления на контакте обделки и вмещающим тоннель грунтом за счёт нанесения на поверхность выработки пограничного слоя, уменьшения толщины обделки, введения добавок, увеличивающих прочность бетона на растяжение и уменьшающих модуль упругости бетона. Немаловажным фактором противодействия разрушению могут выступать теплоизоляционные покрытия, особенно вблизи порталов.

Морозное пучение горных пород за обделкой играет негативную роль на несущую способность крепи. Этот негативный процесс возникает при объёмном расширении воды (примерно на 9%), находящейся в грунте до промерзания и дополнительно мигрирующей к границе промерзания в процессе перехода воды из жидкого состояния в твёрдое (лед). При замерзании даже всей поровой воды в грунте увеличение его объёма составляет 3-4% (закрытая система). В то же время в натуре объём грунта при его промерзании увеличивается на 10 - 50% [88].

Процесс пучения с наибольшей интенсивностью проявляется в пылеватых, пылевато-глинистых и лессовидных грунтах. Интенсивность пучения наряду с гранулометрическим и минералогическим составом грунтов зависит и от структуры последних, а также от гидрогеологических и температурных условий стояния выработок. Помимо обычных отрицательных воздействий, оказываемых

на железнодорожный путь на открытых участках дороги, пучение грунтов в тоннелях может привести к серьезным деформациям обделки с нарушением габарита.

Последствия таких воздействий приводят к увеличению объема линз, склонных к пучению грунтов, а при оттаивании - к просадкам и разжижению пород, слагающих основание тоннельной обделки. Наблюдение показали, что в эксплуатируемых тоннелях деформации в виде просадок стен и разрушений обратных сводов являются следствием периодического действия сил пучения, величина которых может превышать величину прогнозируемого при проектировании горного давления.

Время появлений деформаций морозного пучения и динамика их развития зависят от условий промерзания массива, глубины заложения пучинистых грунтов. При расположении таких грунтов в приконтурных слоях морозное пучение проявляется в начале появления отрицательных температур и развивается по мере увеличения промерзшего слоя до границы непучинистых грунтов. Если же пучинистые грунты удалены от контура тоннеля, то эффект пучения проявляется позже. Балластное пучение появляется, как правило, в начале зимы при переувлажнении балласта. Такие пучины могут достигать 25...30 мм. Наибольшие деформации пучения грунта за обделкой наблюдаются в зимний и весенний период в виде перемещения стен внутрь тоннеля. Деформации обделки могут достигать 150...200 мм и оказывать отрицательное влияние на нормальную эксплуатацию тоннеля и вызывать разрушения обделки. Особенно опасны неравномерные деформации, причинами которых являются неоднородность состава и сложения пучинистых грунтов, неравномерность увлажнения и промерзания грунтов из-за различия гидрогеологических условий подлине тоннеля.

Предотвратить глубокое сезонное промерзание грунтов при эксплуатации тоннелей в условиях Сибири практически невозможно. Поэтому основные мероприятия по предотвращению негативных последствий морозного пучения должны быть предусмотрены на стадии проектирования. К таким мероприятиям

относится применение обделок замкнутого очертания (подковообразных с обратным сводом или круговых), а также устранение обводненности пучинистых грунтов. Первоочередным мероприятием, выполняемым во всех случаях проявления пучения в эксплуатируемых тоннелях, является приведение в порядок балластной призмы, обочин и лотков, а также планировка поверхности основной площадки с целью обеспечения быстрого и полного отвода подземных вод в тоннельный лоток.

Опыт эксплуатации тоннелей в районах с суровым климатом показывает, что, если своевременно не повышать эффективность мероприятий по борьбе с неблагоприятными факторами, то сложности их содержания существенно возрастают. Основными мероприятиями являются снижение обводненности и тепловая защита тоннеля. В свою очередь, снижение обводненности эксплуатируемого тоннеля относят к работам по капитальному ремонту тоннеля и должны рассматриваться как самостоятельный вид работ.

1.1.5 Техногенные факторы, влияющие на устойчивость подземных сооружений

Существенное влияние на эксплуатационные возможности, устойчивость и долговечность тоннельного сооружения оказывают также техногенные факторы, которые можно разделить на три группы (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Техногенные факторы, влияющие на устойчивость тоннеля

Техногенные факторы влияния на устойчивость тоннеля		
конструктивные	производственные	эксплуатационные
-длина тоннеля; -поперечное сечение; -план; -профиль; -неадекватные проектные решения обделки и обустройств	-отклонения от проектного контура выработки; -снижение класса бетона; -наличие пустот за обделкой; -аварийные вывалы при проходке	-род тяги на ж.д. -интенсивность движения; -установленные скорости движения; -режим проветривания

Конструктивные факторы [38] обусловлены неточностью норм, ошибками изысканий и проектирования. Примерами могут служить отсутствие гидроизоляции тоннеля, дренажных устройств, недостаточная несущая способность обратного свода или его отсутствие при интенсивном боковом давлении вмещающих грунтов; недостаточная тепловая защита дренажных и водоотводных устройств и их заложение в зоне сезонного промерзания грунтов при неблагоприятных температурных условиях эксплуатации; неверное расположение или отсутствие деформационных и сейсмических швов; неорганизованный сток воды по проезжей части; отсутствие систем пожаротушения, сигнализации, связи и др.

Как показал опыт эксплуатации ряда транспортных тоннелей, такие решения иногда не приемлемы, так как тщательность надзора и своевременность текущего ремонта не всегда могут быть обеспечены на практике. Это положение особенно касается тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях и малообжитых районах, где ощущается недостаток в рабочей силе, существуют проблемы с доставкой оборудования и материалов. От характеристик и качества конструктивных материалов, применяемых для сооружения обделки, зависят долговечность и эксплуатационные качества тоннелей. При образовании в несущих конструкциях трещин, нарушается гидроизоляция, засоряются, перемерзают и выходят из строя дренажные и водоотводные сооружения и т. п. Все это приводит к преждевременному выходу из строя всего тоннельного сооружения, резкому ухудшению эксплуатационных условий и необходимости проведения ремонтных работ.

Производственные факторы, вызванные нарушениями проектных и технологических решений при строительстве сооружений, брак в работе, приводящие к снижению эксплуатационную надежность действующих тоннелей. К ним относится наличие холодных швов между блоками бетонирования в обделке, не уплотненный, слабый бетон, наличие заобделочных пустот и недостаточная толщина обделки, недоборы грунта по контуру выработки и др. Строительные характеристики отражают фактическое состояние и очертание

тоннельного сооружения по сравнению с проектным. Качество строительных работ при сооружении тоннелей оценивают в зависимости от степени приближения совокупности параметров сооружения или его элементов, полученных в ходе строительства, требованиям, установленным проектом и нормативными документами. Случайные отступления в натуре от проекта в пределах нормальных допусков всегда могут быть, однако некоторые отступления улучшают условия работы сооружения, другие же существенно ухудшают условия его эксплуатации.

Примером может быть обделка тоннеля, толщина которой превосходит проектные размеры за счёт укладки бетона в переборы, или укладка в конструкцию бетона более высокой марки, что может в значительной степени повысить прочность, устойчивость и долговечность сооружения. Однако это и может оказать негативный характер, так как излишки профиля обделки, распределенные неравномерно по ее периметру, особенно в пределах сводовой части, приводят к увеличению сосредоточенных нагрузок от собственного веса и обуславливают местные перенапряжения и появление трещин.

Заобделочные пустоты со временем могут в значительной степени ухудшить условия работы обделки сооружения. Оставленные незаполненными пустоты приводят к местному увеличению горного давления на несущие конструкции, чем вызывается деформация, образование трещин и даже разрушений в процессе эксплуатации тоннеля. Эти пустоты образуются не только от геологических факторов (карстовые образования, растворимые грунты и др.), но также от качества строительных работ. В первую очередь от некачественного нагнетания раствора, закладкой камнем, гравием или щебнем и т.д. в заобделочное пространство, а также и в результате постепенного гниения оставленной за обделкой деревянной крепи или забутовки переборов и вывалов. Заполнение раствором всех пустот создает плотный контакт между горной породой и обделкой, обеспечивает более равномерную передачу горного давления и тем самым существенно улучшает условия работы конструкции. Нагнетание цементного раствора оказывает также существенное влияние на величину

упругого отпора породы, что непосредственно связано с условиями статической работы обделки.

Нарушение при строительстве целостности лежащего над выработкой слоя водонепроницаемых пород при строительстве может также в дальнейшем значительно ухудшить условия эксплуатации тоннеля. Несмотря даже на качественную забутовку и нагнетание раствора в пространство вывала, со временем в эти места могут поступать вышележащие подземные воды и постепенно начать проникать в тоннель через обделку, образуя сильные протечки, что при отрицательных температурах приводит к образованию наледи. При подобной ситуации требуется срочное проведение ремонтных работ с целью ликвидации обводненности.

Эксплуатационные факторы связаны с недостаточным нормативным, кадровым и техническим оснащением эксплуатирующих организаций и некачественным выполнением ремонтно-восстановительных мероприятий при неблагоприятном воздействии природно-климатических факторов.

Особенно неблагоприятной в этом отношении является род тяги на железнодорожных магистралях, интенсивность движения поездов и автотранспорта в автодорожных тоннелях, установленные скорости движения и др. Выхлопы двигателей внутреннего сгорания вредно воздействуют на бетон, вызывая химическое разложение и постепенное отслаивание обделки. При электрической тяге на тоннельное сооружение весьма вредное воздействие оказывают блуждающие токи, вызывающие коррозию чугуна и арматуры в обделках, элементах верхнего строения пути, а также всех остальных металлических конструкций, монтируемых в тоннеле. В этом случае наиболее сильному химическому и термическому выветриванию подвержен свод, т.е. самая ответственная часть обделки.

В свою очередь, повышенная интенсивность движения транспорта в тоннелях затрудняет текущее содержание тоннелей и не позволяет своевременно проводить ремонтные работы. Эти работы часто относят на более поздний срок, первоначально ограничиваясь временными мерами первостепенной

необходимости. Такое несвоевременное выполнение полного объёма ремонтных работ, естественно, негативно скажется на состоянии тоннельного сооружения и сократит его долговечность.

Поэтому в процессе изысканий, проектирования, строительства и текущего содержания тоннелей следует тщательно изучать и своевременно учитывать все рассмотренные выше вредные факторы, определяющие условия работы обделки тоннелей. Это позволит возводить и эксплуатировать тоннельные сооружения, отвечающие современным требованиям и отличающиеся долговечной работоспособностью. Эксплуатация таких сооружений требует незначительного объёма ремонтных работ, которые могут быть выполнены, как правило, в процессе текущего содержания.

1.2 Горно-геологическая характеристика районов строительства и эксплуатации тоннелей

Республика Таджикистан, занимая горную территорию Центральной Азии, имеет широкий спектр природных условий от песчано-пустынных равнин до высокогорных субальпийских и альпийских лугов и мерзлотных экосистем. Сложность географии выражается в резком расчленении рельефа с наличием мощных горных хребтов и определяет многообразие природно-климатических условий, обуславливая наличие вертикальной поясности растительного, почвенного покрова и горных экосистем. Около 60% территории республики занимают высокогорные пространства, лежащие выше 2700 м над уровнем моря.

Эффективная реализация проектов развития государства невозможна без решения транспортных проблем, и в первую очередь, проблем автомобильного транспорта. Автотранспорт Республики Таджикистан был и остается важнейшей коммуникационной структурой региональной хозяйственной и общественной жизни.

Преобладание горного рельефа (93%) (при этом 1/2 территории расположена на высоте более 3000 м) в районе с особым климатом создает

уникальный диапазон климатических условий: от жаркого, знойного лета в долинах предгорных районов, где температура воздуха превышает $40-45^{\circ}\text{C}$, а на поверхности почвы $70-75^{\circ}\text{C}$ до жесточайшей зимы, когда морозы в отдельных высокогорных районах достигают -63°C (Булункуль). Специфические природно-климатические условия Республики Таджикистан, сложный, сильно расчлененный горный рельеф, высокая сейсмичность и т.д. затрудняют строительство железных дорог, транспортных тоннелей, аэродромов и других транспортных сооружений.

Нынешнее состояние автомобильно-дорожного комплекса республики, связанное с рыночными преобразованиями, нестабильностью региона и другими факторами, требуют проведения научно-исследовательских работ, направленных на повышение эффективности транспортных сооружений и управлении надёжностью автотранспортных средств в экстремальных условиях РТ.

Строительство тоннелей и особенно транспортного назначения в основном осуществляется в горных регионах. В связи с этим инженерно-геологические условия в местах их сооружения предопределяются особенностями процесса горообразования (орогенеза) в земной коре вообще и формирования конкретных горных областей и отдельных их участков в частности. с позиции чисто научных геологических исследований. Не смотря на достаточно большое количество работ, в том числе обобщающего характера, исследований с позиций инженерной геологии (инженерно-геологических) свойств массивов горных пород при горообразовании в научной литературе практически не отражено и, особенно, в региональном плане [27-29].

Имеющиеся материалы по отдельным участкам непосредственного строительства подземных сооружений, хотя и представляют определенную научную и практическую ценность, тем не менее, они очень редко могут служить прямыми аналогами для прогноза условий подземного строительства в других горных регионах. И связано это, прежде всего, с исключительным многообразием формирования горных массивов пород, обуславливающих их взаимосвязи, и

сложностью эндогенно-экзогенных процессов, а также влиянием активностью сейсмических сил на инженерные сооружения [91,93-95].

Территория Республики Таджикистан располагается в пределах Южного Тянь-Шаня и Памира, горный рельеф которых сформировался в новейший тектонический этап. С точки зрения тектоники эти горные образования относятся к типу эпиплатформенных. При этом в связи с преобладанием пород фундамента в пределах собственно горных сооружений характерно сводово-глыбовая структура, то есть развитие пологих изгибов с крупноблоковым и мелко блоковым внутренним строением. Иначе говоря, преобладающие значения и формирование структур горных сооружений имеют дизъюнктивной деформации. Пликативные же деформации пород фундамента происходили в соответствующие эпохи, предшествовавшие новейшему тектоническому этапу.

Блоковое строение горных сооружений сопряжено с широким развитием разрывных тектонических нарушений различного порядка, определяемого по их протяженности и мощности зон дробления. Среди них выделяются глубинные, региональные разломы, соответственно 1 и 2-го порядка, по классификации СНиП 2.02.02-85, которые и определяют общий план новейшего тектонического строения горных сооружений. Региональные разломы, на ряду с краевыми, оправляют границы основных новейших тектонических структур зон поднятий и впадин. Выделено блоковое строение и в меньшей степени нарушения 3-го порядка. В свою очередь строение самых блоков, как правило, осложнено крупными трещинами 5-го порядка, которые часто относят к малым формам разрывных тектонических нарушений.

В инженерно-геологическом отношении, применительно к подземному строительству, наиболее сложные горнотехнические условия приурочиваются именно к разрывным нарушениям. Обусловлено это тем, что связанные с ними зоны дробления пород и повышенной трещиноватости имеют большую мощность, достигающие десятки и сотни метров.

В пределах таких зон первичные породы преобразуются в новые виды пород, которые обладают более низкими прочностными свойствами. Эти породы,

как правило, слабоустойчивые и способствуют увеличению сейсмического воздействия. Проходка подземных выработок в таких породах требует применения специальных мероприятий.

Исследований зон разрывных нарушений в инженерно-геологическом отношении в региональном плане всей территории Таджикистана не проводились. Исследования осуществлялись лишь на отдельных участках в районах гидротехнического и гидроэнергетического строительства. Таких как Нурекская ГЭС, Рогунская ГЭС, Байпазинский ГЭС, Сангтудинский ГЭС, автодорожных тоннелей Шар-Шар, Истиклол, Дусти, Шахристон, Дангаринский и Зеравшанский гидротехнических тоннелей и ряда других объектов. Полученные при этом материалы показали, что под воздействием множества факторов, в результате геологического развития разрывных нарушений происходят изменения как вещественного состава, так и первоначального материала. Прежде всего, это гидротермальные растворы, значительно изменяющие горные породы, как в зонах разрывных нарушений, так и в прилегающих к ним относительно монолитных. Возникают новые минералы глинистые, карбонатные и кварцевые.

На участках Нурекской и Рогунской ГЭС широкое развитие получили ангидрит, соленосные породы, что в результате с циркуляцией подземных вод приводит к увеличению сейсмической активности в горных породах. В пределах толщ карбонатных пород с подземными водами связаны процессы карстообразования, что значительно усложняет строительство подземных транспортных сооружений. В этих условиях увеличиваются воздействия сейсмических волн на подземные транспортные сооружения, которые следует учесть при уточнении расчётной сейсмостойкости.

Результатом этих исследований было установлено, что монолитные скальные участки тоннеля необходимо рассчитывать на 7 баллов, а с рыхлыми отложениями - на 9 баллов расчётной сейсмичности.

Для Республики Таджикистан, более 93% территории которого занимают горы и где представлен практически весь спектр опасных геологических и природно-климатических явлений (землетрясения, оползни, обвалы, сели,

периодически быстрые подвижки ледников, эрозия почв и др.), приводящих к стихийным бедствиям, решение вопросов снижения риска от них имеет первостепенное значение. Особенностью республики является тот факт, что население в силу дефицита пригодных для хозяйственного использования земель заселяется в местах, подверженных опасности проявления того или иного стихийного бедствия или их сочетаний [59].

Республика Таджикистан является классическим примером областей активного эпиплатформенного горообразования в ярко выраженной форме. Новейшая активизация тектонических движений определяет современный рельеф и его многообразные формы, создание новых и преобразование древних структур, климатические и многие другие факторы, прямо или косвенно связанные с этим явлением. В первую очередь следует отметить сейсмичность, расположенность в зоне грандиозного сучивания хребтов Высокой Азии и другие важные особенности геологического строения территории республики. Согласно карте сейсмического районирования, 50% территории страны расположено в 9-балльной сейсмической зоне, 38% - в 8-балльной и 12% - в 7-балльной. Сильные и катастрофические землетрясения - чрезвычайно серьезное испытание для зданий и сооружений, расположенных в потенциально неустойчивых структурах горных пород на склонах. При проектировании и строительстве подземных сооружений необходимо учитывать сейсмическую опасность территорий с целью снижения для них сейсмического риска.

На территории республики располагаются горные хребты Гиссарско-Алайской системы, Туркистанский, Зеравшанский, Гиссарский, Алайский. Юго-восток ее занят горами Памира, на Севере располагаются Кураминский и другие горные хребты, относящиеся к западу Тянь-Шаня.

При геологическом районировании территории республики выделено 5 регионов [13]: Северный Таджикистан (Карамазар); Ферганская депрессия; Центральный Таджикистан (или Гиссаро-Алай); Таджикская депрессия и Памир (включая Дарваз).

Через горные хребты Центрального Таджикистана проходит автомобильная дорога, связующая Север и Юг республики, по двум перевалам: Анзобский, высотой 3372 м (Гиссарский хребет) и Шахристанский - 3351 м (Туркестанский хребет). Эти хребты с востока на запад рассекают основные экономические регионы республики на северную и южной части. В этих условиях наличие надежных транспортных коммуникаций, в первую очередь, развитой сети автомобильных дорог, имеет решающее значение для экономики географически разобщенных областей республики. Для обеспечения круглогодичной связи северных регионов со столицей были построены тоннели Дусти, Истиклол и Шахристан.

Однако ключевым вопросом является безопасное движение транспортных средств и длительный срок службы тоннелей. Практика показывает, что ряд разрушений тоннелей происходит под воздействием различных эндогенных и экзогенных факторов, в том числе сейсмика, обвалы, морозобойные трещины, подземные воды и т.д.

Одним из примеров является разрушение Шахристанского тоннеля, которое произошло 7.12.2015 г. после землетрясения магнитудой 4 балла. Эпицентр землетрясения находился на расстоянии более 380 км от тоннеля вблизи озера Сарез магнитудой 7-8 баллов.

1.3 Оценка состояния эксплуатируемых тоннелей «Истиклол» и «Шахристан»

Район строительства тоннелей характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями. Они обусловлены наличием пород с различными физико-механическими свойствами, широким развитием интенсивных складчатых и дизъюнктивных деформации пород, активными проявления карста, сложностью гидрогеологических условий, большой глубиной заложения тоннеля.

Строительство тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» осуществлялось в породах крепких и средней крепости горным способом [51-53]. При строительстве

этих тоннелей устойчивых породах применялась схема сплошного забоя.

Транспортные тоннели «Истиклол» и «Шахристан» относятся к сильно обводненным, и по данному фактору условия строительства считаются сложными. Максимальный водопроток в тоннели достигает 250 - 300 м³/ч и зависит от времени года.

Тоннель «Истиклол», построенный в 2006 г. как двухполосная транспортная выработка на автомобильной дороге Душанбе-Худжанд, имеет длину 4996 м, ширину 10,2 м и высоту 8,1 м, Тоннель находится на высоте 2670 м над уровнем моря. Поперечное сечение тоннеля имеет подковообразную форму с обделкой из монолитного бетона и железобетона. Также параллельно на расстоянии 27,5 м был построен вентиляционный тоннель шириной 6,0 м и высотой 5,0 м.

Тоннель «Истиклол» пройден в скальном массиве, сложенном гранитами, кварцами, песчаниками, доломитами и т.д. (рисунок 1.8). Коэффициент крепости пород изменяется от 2 до 20. Развиты пликативные и дизъюнктивные дислокации, обуславливающие сильную трещиноватость пород. Трещины ориентированы по простиранию пород и параллельно друг другу. Трещины бывают зияющими, частично «залеченные» глинистым материалом и волосяными, развитыми в средней части тоннеля. Размер открытых трещин изменяется в пределах от 0,5 до 7 - 8 мм.

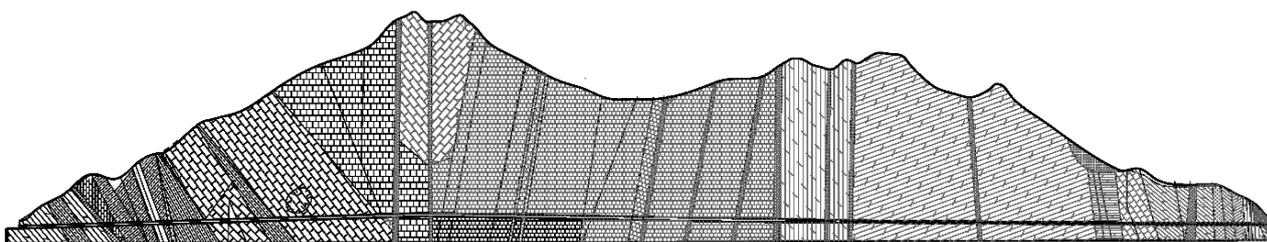


Рисунок 1.8 - Геологический разрез трассы транспортного тоннеля «Истиклол»

При строительстве тоннеля выявлен ряд водопроявлений в виде сосредоточенных выходов интенсивного капеза, приуроченных к зонам сильной выветренности и тектонического дробления. Температура подземных вод в районе строительства тоннеля составляет + 3 - 5°С.

При строительстве тоннеля применен буровзрывной способ (БВР). Обделка сооружалась по параллельной схеме с использованием телескопической опалубки. Участок тоннеля, где производились бетонные работы, отделялся от остальной части перемычкой для обеспечения требуемого температурного режима твердения бетона. Температура воздуха в зимний период в месте укладки бетона составляла не менее $+4^{\circ}\text{C}$. Подача бетона за опалубку производилась бетононагнетателем ПН-500, установленным в пределах участка сооружения постоянной обделки.

Тоннель «Истиклол» и вентиляционный тоннель разрабатывали с двух сторон со средней скоростью 60 - 80 м/мес. Уход забоя за цикл составлял 1,3 - 2,0 м при глубине шпуров 1,5 - 2,3 м. Продолжительность цикла изменялась от 1,0 до 1,5 суток в зависимости от устойчивости пород.

В зависимости от характера и водоносности пород, изменяющихся как по отдельным тоннелям, так и каждому из них, в проектах предусмотрены конструкции подковообразной и сводчатой форм (рисунок 1.9).

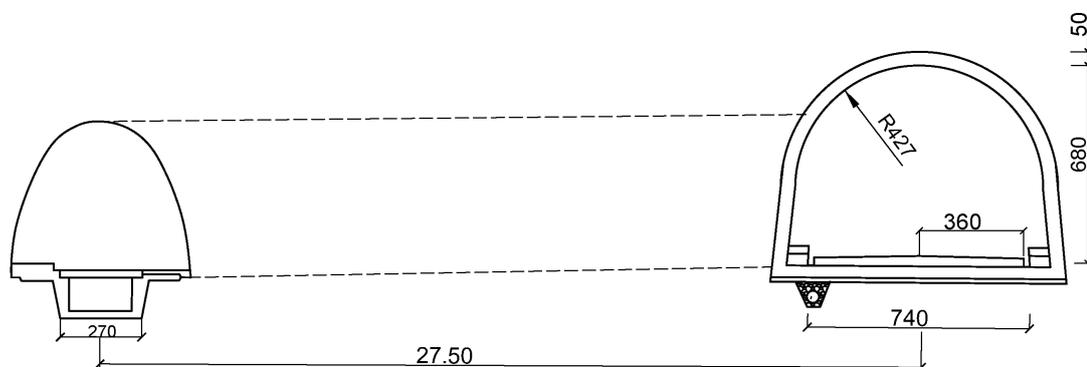


Рисунок 1.9 - Сечение транспортного тоннеля «Истиклол»

В тоннельных конструкциях «Истиклол» применен бетон класса В15. Марка бетона по морозостойкости для района строительства применялась не ниже $\text{М}_{\text{рз}}200$. Толщина обделки рассчитана на возможную нагрузку от вертикального горного давления, определенного согласно требованиям [52]. Несущие конструкции рассчитаны на суммарное сочетание воздействий от горного давления и нагрузки от собственного веса обделки, по предельному состоянию 1 группы (по несущей способности). По проекту, с учетом горнотехнических,

гидрогеологических и климатических условий, толщина обделки принята 500 мм.

Тоннель «Шахристан». Автомобильный тоннель на дороге «Душанбе - Чанок» на стыке двух районов Согдийской области РТ Айнинского и Шахристанского. Тоннель облегчает преодоление Туркестанского хребта. Строительные работы на тоннеле были начаты 22 августа 2006 г. и он был сдан в эксплуатацию 27 октября 2012 г. как двухпутевой транспортный. Данный тоннель имеет длину 5253 м, ширину 9,5 м и высоту 6,9 м. Параллельно на расстоянии 27 м была построена вентиляционная штольня шириной 6,24 м и высотой 5,5 м. Рельеф зоны строительства относится к высокогорным, южный портал находится на высоте 2752 м, северный на высоте 2640 м над уровнем моря. Глубина залегания выработки составляет 958 м. Сечение тоннеля «Шахристан» приведено на рисунке 1.10.

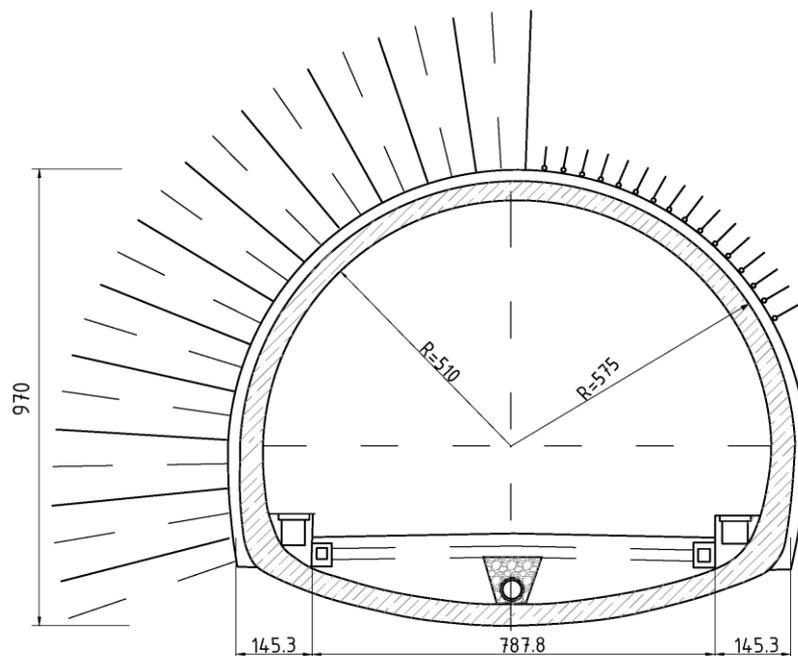


Рисунок 1.10 - Сечение тоннеля «Шахристан»

Конструкция обделки тоннеля состоит из:

Анкеров $\varnothing 22$ мм, $L=3,5$ м, 70×100 см (продольное 100 см);

Арматурной сетки $\varnothing 8$ мм, 15×15 см;

Быстротвердеющего бетона С25, 25 с;

Устройства гидроизоляции;

Монолитная крепь - бетоном марки С25, 45 см.

По комплексу этих факторов, влияющих на устойчивость выработки, в массиве горных пород по трассе тоннеля «Шахристан» выделяют три основных участка: южный, центральный и северный (рисунок 1.11).

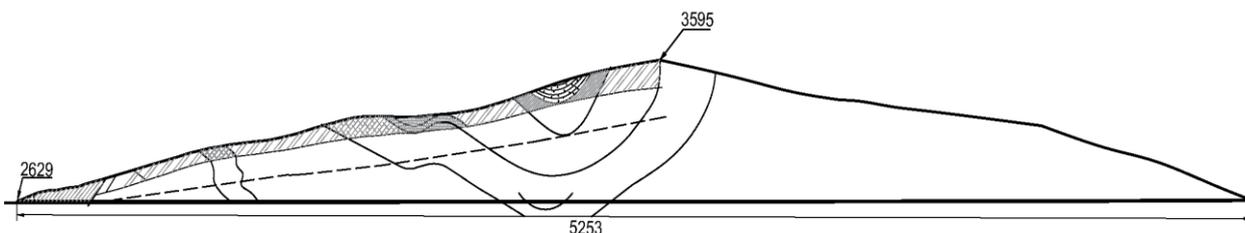


Рисунок 1.11 - Геологический разрез трассы тоннеля «Шахристан»

На южном участке представлены чередования различной мощности слоев доломитов, известняков, сланцев разного состава и небольшие слои гранитного типа. Коэффициент крепости пород по шкале М.М. Протоdjяконова изменяются от 6-7 до 9-10, реже более 10, породы средней и слабой трещиноватости. Группа пород по трудности разработки VII-IX. Класс пород по Беньявскому в основном III, меньше II.

Центральный участок (глубина заложения тоннеля более 500 м) сложен исключительно сланцами шпат-хлорит и слюдисто-кварцевыми, чередующимися в виде прослоев различной мощности. Углы залегания пород от 30-40 до 70-80 градусов. Коэффициент крепости пород 4-7, группы пород по трудности разработки V, VII. Породы, предположительно средней трещиноватости. Класс пород по Беньявскому преимущественно –III.

Северный участок сложен в основном доломитами. Их коэффициент крепости 7, группа пород по трудности разработки VIII-IX. Породы средне и слабо трещиноватый, класс пород по Беньявскому II-III.

Выявленные по трассе тоннеля многочисленные разрывные тектонические нарушения II-го порядка представлены зонами дробления пород до песчано-дресвяного, местами глинистого состояния. Мощность зон до 1-1,5м и более, к ним же приурочены зоны мощностью до 10-20 м и более с повышенной

трещиноватую пород. В пределах зон разрывных тектонических нарушений коэффициент крепости пород составляет 2, группа пород по трудности разработки IV, VI. Класс пород по Бенявскому V-IV, реже III.

На каждом из этих трех участков с такими разрывными нарушениями в карбонатных породах приурочены и наиболее активные проявления карста в виде каверн, каналов и полостей. Длина отдельных карстовых форм достигает 10-60 м, ширина 10-30 м. Многие полости заполнены дресвой, щебнем, песчано-глинистым материалом, нередко глыбами материнских пород.

Особенности геологического строения массива горных пород определили и разнообразие гидрогеологических условий. При этом наибольшую сложность представляют зоны разрывных тектонических нарушений в карбонатных породах, в пределах которых наблюдаются проявления карста.

При проходке разведочных штолен в момент вскрытия участков с карстом наблюдались прорывы подземных вод дебитом от 3-5 м³/ч до 50 м³/ч. Как правило, по истечению 2-3 суток водопроток в выработку снижался до объёмов менее 1 м³/ч. Наиболее крупный водопроток наблюдался на южном участке, где в паводковый период он увеличивался до 1800 м³/ч при глубине заложения тоннеля на данном участке около 500 м.

Основными факторами, определяющими гидрогеологические условия района расположения тоннелей «Истиклол» и «Шахристан», являются: большое количество осадков, выпадающих преимущественно в теплое время года, расчленённость рельефа, крутосклонный характер долин, широкое распространение прочных осадочных, метаморфических и интрузивных пород, водопроницаемых только по трещинам.

По данным Таджикгидромета годовая сумма осадков составляет 494 мм. Изменение суммы годовых осадков приведено на рисунке 1.12. Из графика видно, что происходит постепенное увеличение количества осадков по годам. При составлении графика использовались метеорологические данные станции «Анзобский перевал».

Для Анзобского перевала характерен годовой ход осадков с максимумом в марте-мае и минимумом в августе – сентябре. Основное их количество – 44% приходится на весенний период, зимой выпадает 26%, на летние и осенние месяцы приходится по 13-17% осадков от годовой суммы. Средняя годовая относительная влажность составляет 65%, а средняя месячная колеблется от 50 до 80%. Снежный покров появляется в начале октября и удерживается до конца мая. Средняя максимальная декадная высота снежного покрова составляет 169 см, наибольшая высота снежного покрова составила 264 см.

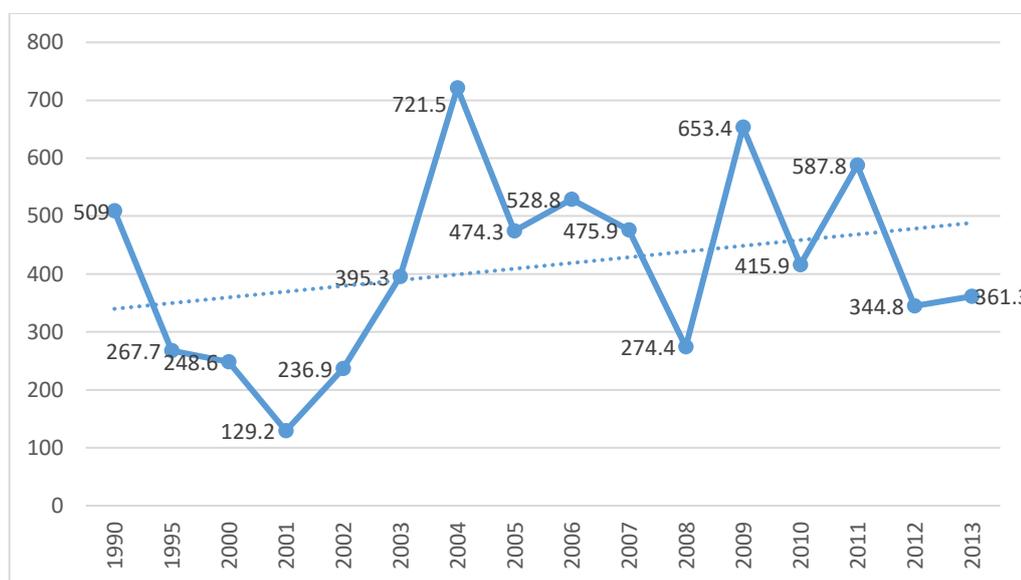


Рисунок 1.12 - График изменения суммы годовых осадков по данным метеорологической службы «Анзобский перевал»

По гидрогеологическому режиму условия строительства тоннелей относятся к сложным, поэтому при горнопроходческих работах и эксплуатации, предусматриваются мероприятия по перехвату и отводу поверхностных вод, а также водопонижению и отводу подземных вод. Особенно это касается буровзрывных работ, когда возможны прорывы трещинных вод из тектонических зон в выработку.

По химическому составу подземные воды не агрессивны к бетонам любой плотности, слабоагрессивны к железобетону при периодическом смачивании, средне агрессивны к железу.

В настоящее время в тоннелях «Истиклол» и «Шахристан» отмечается большое количество течей в виде потеков, струйного капежа и мокрых мест на поверхности бетонной отделки. Вода проникает в тоннель, главным образом, через холодные швы. Тоннели имеют следующие гидрогеологические особенности:

- подземные воды не имеют четко выраженного режима движения;
- характер водопроявлений в значительной мере зависит от условий их питания;
- сосредоточенные выходы подземных вод по зонам разлома и рассеяние по остальной части тоннелей;
- зоны повышенной трещиноватости не имеют четко выраженных границ, т.к. зоны стратиграфических и литологических контактов пород часто совмещаются с тектоническими зонами. Отмечается чередование зон водопроницаемых пород с водонепроницаемыми, т.е. так называемая, неупорядоченная трещиноватость.

При замерзании вода, находящаяся в трещинах и порах отделки, а также в забутовочном материале, увеличивается в объеме в 1,09 раза и разрушает крепь выработки. Поскольку процесс выщелачивания идет непрерывно, то и в отделке также непрерывно будет возрастать объем пор и пустот. И как результат снижение прочности бетона отделки вследствие растрескивания, образования раковин, каверн и вывалов.

В инженерно-геологическом отношении следует отметить, что тоннели находятся в зоне с сейсмичностью в 7–9 баллов, в породах с низкой температурой на глубине. Изложенные инженерно-геологические условия вызвали необходимость принятия, специальных методов проходки и определения напряженно-деформированной отделки тоннелей при конкретных геологических условиях строительства и наличии грунтовых вод [4, 30], а также разработке мероприятий, направленных на обеспечение безаварийной эксплуатации тоннелей.

1.4 Цель и задачи исследования

Из проведённого ретроспективного анализа результатов исследований факторов, определяющих условия работы тоннелей можно сделать вывод, что сегодня существует большое количество различных методик оценки и расчёта параметров обделки. Они учитывают различные аспекты и особенности горно-геологических, горнотехнических и климатических факторов, влияющих на устойчивость и работоспособность тоннелей.

Проведенный анализ фактического состояния тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» РТ показал, что существующие мероприятия, направленные на снижение отрицательного влияния различных факторов не в полной мере обеспечивают безаварийную и эффективную эксплуатацию тоннельных сооружений.

Исходя из всего изложенного, следует, что целью работы является установление факторов, влияющих на работоспособность транспортных тоннелей и разработка рекомендаций, обеспечивающих безопасную эксплуатацию и увеличение сроков безаварийной службы транспортных тоннелей в условиях высокогорья. Это позволит сократить общий объём затрат на поддержание тоннелей в рабочем состоянии и обеспечит повышение эффективности при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.

Такое повышение может быть достигнуто путём решения следующих задач.

1. Оценить опыт решения проблем вредного влияния горно-геологических, технологических и климатических факторов при строительстве и эксплуатации тоннелей.
2. Провести натурные исследования и специальные мониторинговые наблюдения состояния тоннелей, выявить и систематизировать факторы, влияющие на работоспособность транспортных сооружений.
3. Выполнить анализ разрушений подземных сооружений, возникающих под воздействием различных горно-геологических, технологических и климатических факторов.

4. Выполнить математическое моделирование и разработать расчётные схемы утеплённых водоотводных лотков для решения проблемы обледенения тоннелей.

5. Разработать практические рекомендации по предотвращению лёдообразования в тоннелях, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию подземных сооружений.

2 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ «ИСТИКЛОЛ» И «ШАХРИСТАН»

По результатам проведенных исследований всех видов разрушений обделок тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» в период 2014-2017 гг. были выявлены факторы, определяющие устойчивость обделки транспортных сооружений и соответствующие им виды её нарушений. Таким образом, при решении вопроса надежности капитальных горных выработок в условиях высокогорья необходимо установить зависимость устойчивости обделки от качества забутовки, морозостойкости бетона, типа и времени установки временного крепления, гидроизоляции, теплоизоляции дренажных систем и других факторов.

Полученная фактическая картина состояния обделок транспортных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» обеспечивает правильный подход к проектированию строительства, позволяет прогнозировать возможные нарушения обделок, выбирать оптимальную технологию и комплекс оборудования, занятого на ремонтно-восстановительные работы.

К основным типам нарушений относятся раковины, выбоины в крепи, волосяные и раскрытые трещины, холодные швы, инфильтрация воды, что приводит к выщелачиванию бетона на довольно обширных площадях поверхности крепи, образованию морозобойных трещин и наледей.

Замеры дефектов, в том числе количества холодных швов и мест инфильтрации воды, площади наледей, морозобойных трещин, раковин, вывалов, трещин и зон выщелачивания бетона обделок, производились автором в период 2014 - 2017 гг. Были также проанализированы и обработаны результаты съёмки разрушений тоннеля «Шахристан» от сейсмических воздействий 2015 г. Результаты обследований позволяют отстроить в масштабе развертки тоннелей с нанесением всех выявленных нарушений.

В процессе промышленных экспериментов проведены обследования и замеры вышеприведенных дефектов с последующей систематизацией и установлением причин их образования.

2.1 Раковины

Раковины – это нарушения обделок тоннелей, представляющие собой выкрашивание и частичное обрушение бетона, но не на всю толщину существующей крепи. Они представлены формами с разнообразной неправильной конфигурацией.

Обследование обделки тоннеля «Истиклол» показал, что она покрыта раковинами на общей площади 37,05 м². Всего было выявлено и замерено 58 раковин различной площади (таблица 2.1). В тоннели «Шахристан» обследовано 11 раковин суммарной площадью 4,4 м². При этом в обоих тоннелях площадь одной раковины изменяется в пределах от 0,05 до 1,5 м². Площади основной массы этого типа нарушений (более 70 %) находятся в пределах 0,1–1 м² (рисунок 2.1). Глубина раковин изменяется от первых миллиметров (на начальной стадии разрушения крепи) с последующим увеличением до 200 мм и более, вплоть до образования вывалов.

Таблица 2.1 - Размеры раковин в обделке транспортного тоннеля «Истиклол»

№ п/п	Глубина нарушения, м	Площадь, м ²
1	0,7	0,120
2	0,85	0,300
3	0,12	0,850
4	0,8	0,560
5	0,20	0,350
6	0,15	0,530
7	0,11	0,750
...
...
55	0,15	0,800
56	0,09	0,650
57	0,07	1,700
58	0,12	1,200
Среднее по раковинам	0,132	0,639

а)



б)



Рисунок 2.1 - Раковины в обделке тоннеля «Истиклол»

По результатам проведенных исследований построены диаграммы распределения частоты встречи раковин по площадям, что позволяет производить предварительный прогноз возможного нарушения обделок при эксплуатации тоннелей (рисунок 2.2 и 2.3).

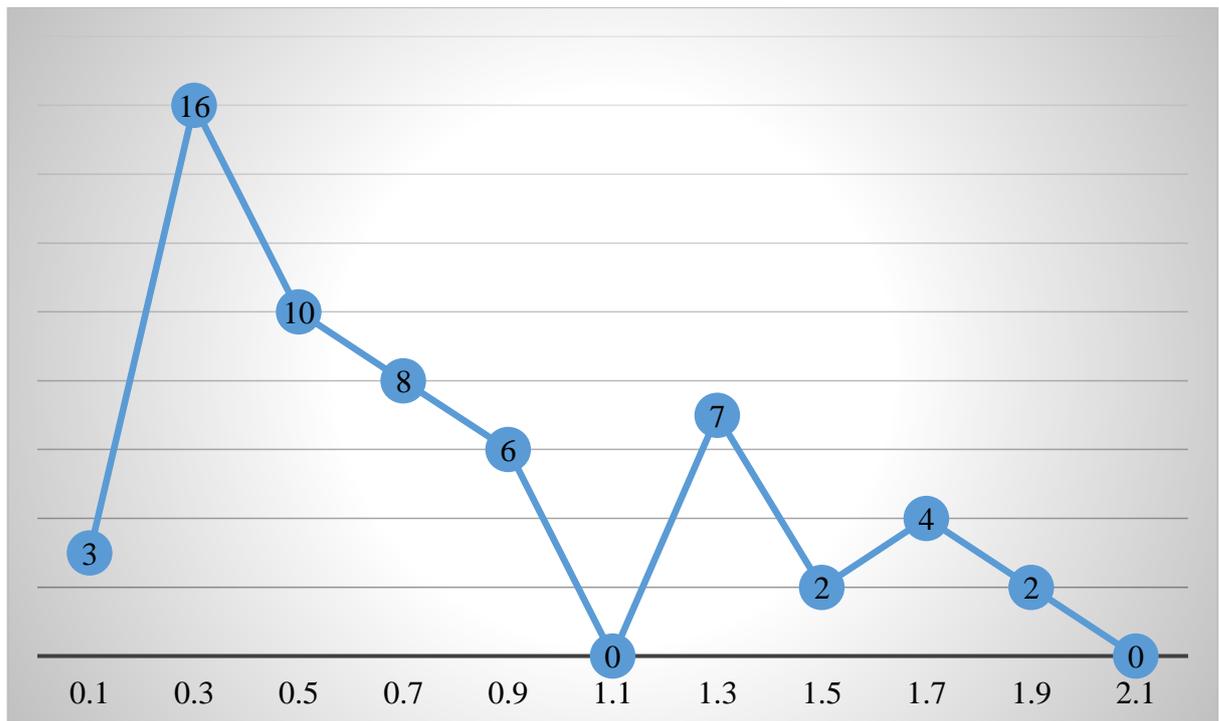


Рисунок 2.2 - Диаграмма частоты площадей раковин в тоннеле «Истиклол»

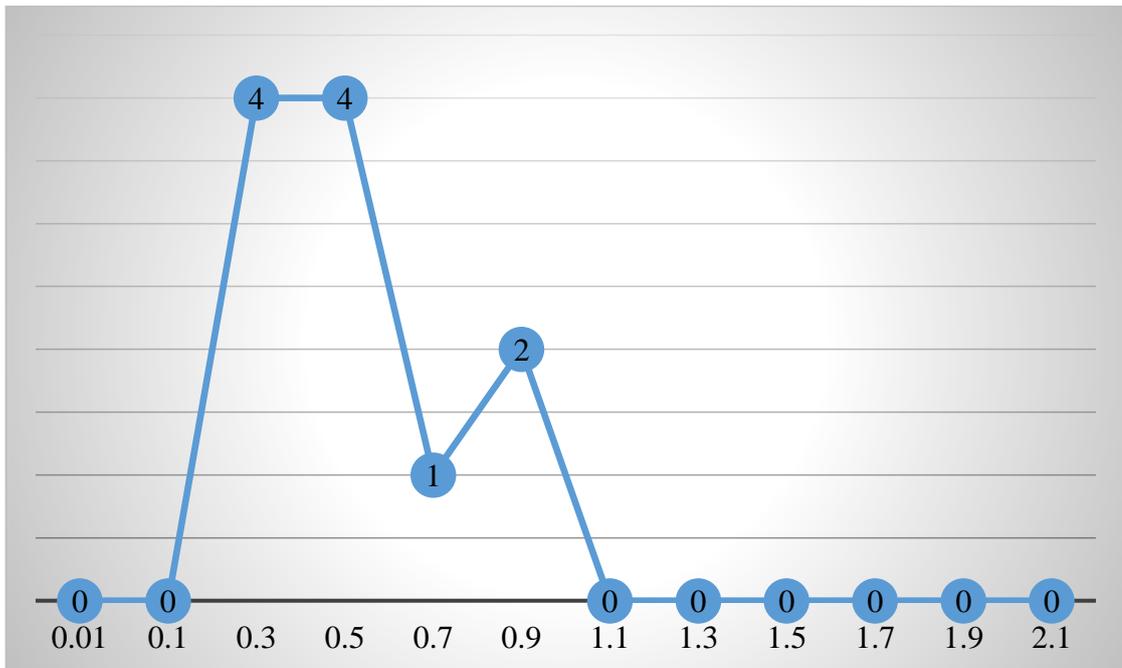


Рисунок 2.3 - Диаграмма частоты площадей раковин в тоннеле «Шахристан»

Анализ и обработка результатов съёмки показали, что в основном раковины расположены в сводчатой части тоннелей и по их стенам, реже в местах холодных швов.

Следует отметить, что деструктивный бетон отделки - размороженный или выщелоченный, разбирается вручную на глубину более 20 мм.

2.2 Выщелачивание

Выщелачивание отделки происходит в результате вымывания водой цементного молока из состава бетона крепи. В дальнейшем выщелачивание приводит к образованию раковин и, очень часто, к массовым вывалам бетона. Данный вид разрушения отделки приурочен к местам просачивания дренажных вод через крепь и охватывает значительные площади внутренней поверхности крепи тоннелей.

Отслоение покрытий бетона отделки или разрушение внутренней поверхности сводов и стен отделки проявляются в виде сколов, коррозии арматуры и выщелачивания раствора в швах (рисунок 2.4). Сколы бетона отделки

на небольшую глубину (защитного слоя в железобетонных обделках), если они не являются следствием деформации обделки, чаще всего происходят в результате воздействия низких и знакопеременных температур воздуха и фильтрации воды через обделку: вода, заполняя поры, при замерзании разрушает материал. Сколы возможны и при отсутствии обводнения вследствие впитывания влаги, избыточно содержащейся в атмосфере тоннеля. Ускоренное разрушение монолитных бетонных обделок может быть вызвано действием агрессивных сред. Негативное воздействие агрессивной среды особенно скоротечно проявляется при низком качестве бетонирования.

а)



б)



Рисунок 2.4 - Расслаивание защитного слоя поверхности крепи тоннеля «Истиклол»

Выщелачивание бетона проявляется в виде так называемых высолов - белых пятен, потеков и наплывов, что является признаком уменьшения прочности бетона (рисунок 2.5 и 2.6). Разрушение бетона обделок в агрессивных средах происходит главным образом по связующему цементному камню, так как заполнители обладают, как правило, большой химической стойкостью и плотностью. Являясь высокощелочным материалом, бетон активно реагирует с жидкостями и газами, имеющими кислую природу. Таким образом, интенсивность коррозии бетона во многом зависит не только от химического взаимодействия агрессивной среды с цементным камнем, но и в значительной степени от физического состояния бетонной конструкции, в первую очередь, плотности бетона, его водо- и газонепроницаемости.

а)



б)



Рисунок 2.5 - Выщелачивание обделки тоннеля «Истиклол»

а)



б)



Рисунок 2.6 - Последствие влияния инфильтрационных вод в тоннеле «Шахристан»

Анализ результатов натуральных наблюдений показал, что по каждому тоннелю суммарная площадь обделок, подвергшаяся выщелачиванию, составляет более 70 м². Причем в тоннеле «Истиклол» отмечено 22 места, где площадь выщелачивания достигает 52,1 м², причем практически повсеместно процесс разрушения обделок не прекращается, так как идет постоянное просачивание воды (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Площади выщелачивания отделки тоннеля «Истиклол»

№ п/п	Ориентировка местности	Площадь, м ²
1	Стена тоннеля	2,1
2	Стена тоннеля	2,30
3	Стена тоннеля	1,6
4	Сводовая часть	0,52
5	Сводовая часть	0,36
6	Стена тоннеля	1,82
7	Сводовая часть	0,70
8	Стена тоннеля	2,00
...		...
19	Стена тоннеля	0,80
20	Сводовая часть	0,65
21	Стена тоннеля	1,10
22	Стена тоннеля	1,50
Среднее		1,364

2.3 Трещины и холодные швы

Трещины – весьма распространенный вид нарушения отделки тоннелей. Различают волосяные и открытые (трещины с раскрытием) трещины. Образование волосяных трещин приводит в последствии к их раскрытию и выкрашиванию бетона отделки. Частота образования волосяных трещин по длине тоннеля неравномерна. Всего зафиксировано в тоннеле «Истиклол» 48 волосяных трещин, в «Шахристаном» – 6 шт. длиной от 2 до 15 м и шириной 1-2 мм (рисунок 2.7).

а)



б)

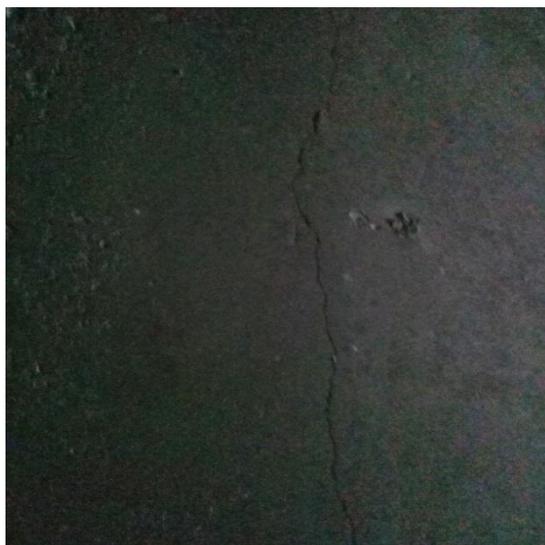


Рисунок 2.7 - Трещины на стенах тоннеля «Истиклол»

В свою очередь, практически 100% зафиксированных волосяных и раскрытых трещин расположены в стенах тоннеля и только частично захватывают свод выработки. Во всех случаях оба типа трещин ориентированы перпендикулярно оси тоннеля и делятся этой осью практически на две равные части. Трещины с раскрытием приводят к формированию вывалов и раковин. Ширина этих трещин составляет 1–8 мм. Встречаются они значительно чаще в местах сквозных швов.

Наиболее распространенными дефектами обделок тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» являются сквозные швы (трещины). Эти дефекты также называют технологическими, холодными, строительными, рабочими швами и швами бетонирования. Данные швы в обделке возникали ещё в период её бетонирования, по ряду причин:

- организационные: окончание рабочей смены, нехватка материалов, ремонт оборудования, несовершенная общая организация работ, технические возможности используемых машин и механизмов;
- технологические: монтаж вышележащей арматуры, лесов и опалубки, ограничение нагрузок на конструкции;
- конструктивные.

Как правило, возводимые конструкции крепи тоннелей бетонуются отдельными сопрягаемыми между собой участками - блоками бетонирования. Кольцевые и горизонтальные холодные швы (трещины) обделки тоннелей образуются, когда каждый последующий слой бетонной смеси укладывают на затвердевший (схватившийся) предыдущий слой бетона. В результате неравномерных по сечению обделки деформаций, возникающих от действия температуры окружающего воздуха, появляются температурные трещины.

Отличительной особенностью холодного шва является то, что сцепление нового бетона с уже затвердевшим бетоном значительно ниже, чем прочность монолитного бетона без холодного шва, вследствие чего снижаются морозостойкость, водонепроницаемость и ухудшается внешний вид конструкций. Это объясняется тем, что через холодные швы происходит инфильтрация

подземных вод, что впоследствии приводит к изменению структуры бетона вплоть до разрушения.

Степень влияния трещин на долговечность сооружения зависит от их расположения, направления и динамики развития. Как известно, бетон хорошо работает на сжатие, менее стоек к изгибающим нагрузкам и значительно хуже противостоит растягивающим напряжениям. В результате релаксации напряжений растяжения, реализующихся в виде микротрещин, зона стыка имеет меньшую плотность и прочность по сравнению с монолитным бетоном и при равных растягивающих напряжениях, трещины, прежде всего, открываются именно по швам.

В данный момент продольные и арочные (дуговые) швы являются более активными трещинами и представляют серьёзную угрозу несущей способности конструкции рассматриваемых тоннелей.

Продольные швы находятся относительно проезжей части на высоте 2,5 м с двух сторон крепи тоннеля «Истиклол». Данный вид швов отсутствует в тоннеле «Шахристан».

Арочные поперечные швы наблюдаются по периметру сечения тоннелей через каждые 3 м по длине тоннеля «Истиклол» и 6 м – тоннеля «Шахристан». Поперечные швы второго тоннеля, в отличие от первого, менее заметны, так как защитный слой крепи выполнен более качественно. В тоннеле «Истиклол» почти 95% холодных швов резко выделяются. Развития системы трещин чаще всего приводит к отслоению бетона из обделки и образованию на его поверхности выбоин.

Основная причина образования отслоения и выбоин - это инфильтрация воды, замерзание её в трещинах и пустотах швов обделки, а так же конструкционные швы не соответствующие проектным и корродировавшая арматура обделки. Практика показывает, что выбоины образуются под воздействием горного давления, динамических нагрузок от движущегося транспорта, знакопеременных температур и ряда других, менее значимых причин.

Выбоины обычно имеют овальную форму или представлены в виде каверн вдоль швов и имеют ширину 10 мм и более при длине 100 мм и более.

По результатам проведенных наблюдений в течение 2014 – 2017 гг. установлены места и площади инфильтрации воды через обделку тоннеля «Истиклол» (таблица 2.3).

Таблица 2.3 - Места и площади инфильтрации воды через обделку тоннеля

№ п/п	Место инфильтрации	Площадь, м ²
1	арочный шов	3,2
2	арочный шов	2,7
3	арочный шов	3,4
4	трещина	1,7
5	трещина	2,1
6	продольный шов	2,7
7	продольный шов	2,4
8	продольный шов	2,8
...
93	арочный шов	3,2
94	арочный шов	3,7
95	продольный шов	1,4
96	продольный шов	2
Среднее		2,518

По результатам проведенных исследований построены диаграммы распределения частоты встречи мест инфильтрации воды по площадям. Это позволит производить предварительный прогноз возможного нарушения обделок и образование наледей (рисунок 2.8).

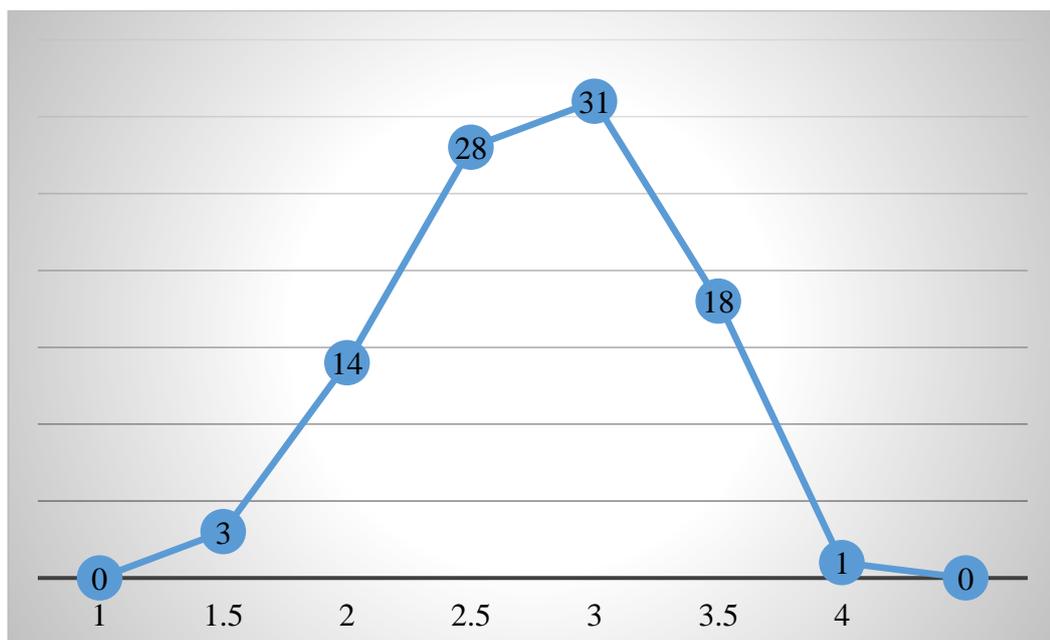


Рисунок 2.8 - Диаграмма частоты площадей мест инфильтрации воды в тоннеле «Истиклол»

Анализ данных диаграммы показал, что площадь мест инфильтрации воды составляет 1,5 – 4 м², а площади основной массы этого типа нарушений (более 70 %) находятся в пределах от 2,2 до 3,5 м² (рисунок 2.8).

О проницаемости швов отделки судят по различным видам водопроявления (течи, капеж, увлажнение и др.). Наблюдения, проведенные в тоннеле «Истиклол» в течение 2014-2017 гг., позволили установить сезонное изменение количества мест инфильтрации воды (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Сезонное изменение количества мест инфильтрации воды в тоннеле «Истиклол» по годам

№ п/п	Период фиксирования	Год обследования			
		2014	2015	2016	2017
1	Март-май	---	93	91	96
2	Июнь-август	51	61	58	54
3	Сентябрь-ноябрь	43	45	56	61
4	Декабрь-Февраль	---	41	43	51

По результатам исследований построены гистограммы количества мест инфильтрации воды по всей длине трассы тоннеля (рисунок 2.9) и количественный показатель источников инфильтрации (рисунок 2.10).

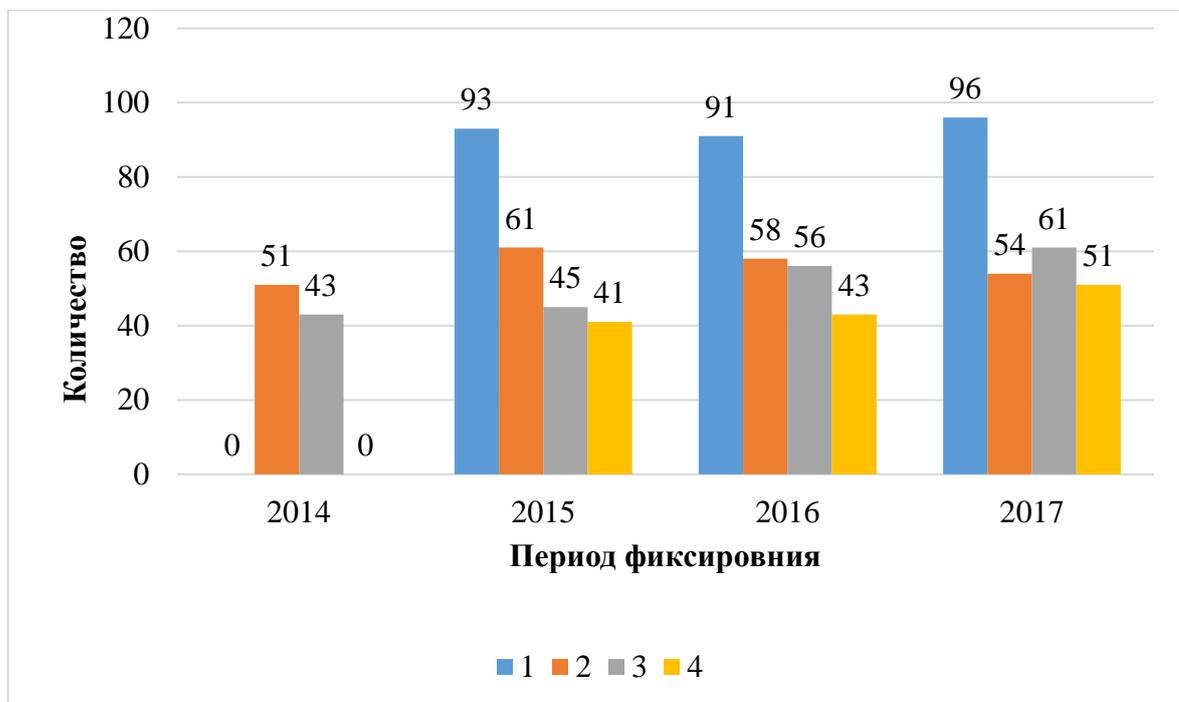


Рисунок 2.9 - Количество выявленных мест инфильтрации воды в несущих конструкциях тоннелей: 1 - март-май; 2 – июнь-август; 3 – сентябрь-ноябрь; 4 – декабрь-февраль

Промышленные наблюдения показали, что интенсивность инфильтрации воды в тоннеле «Истиклол» минимальна в зимний период и достигает максимума в весенний период, увеличиваясь более чем в два раза. В то же время количество мест инфильтрации воды по годам остаётся практически одинаковой.

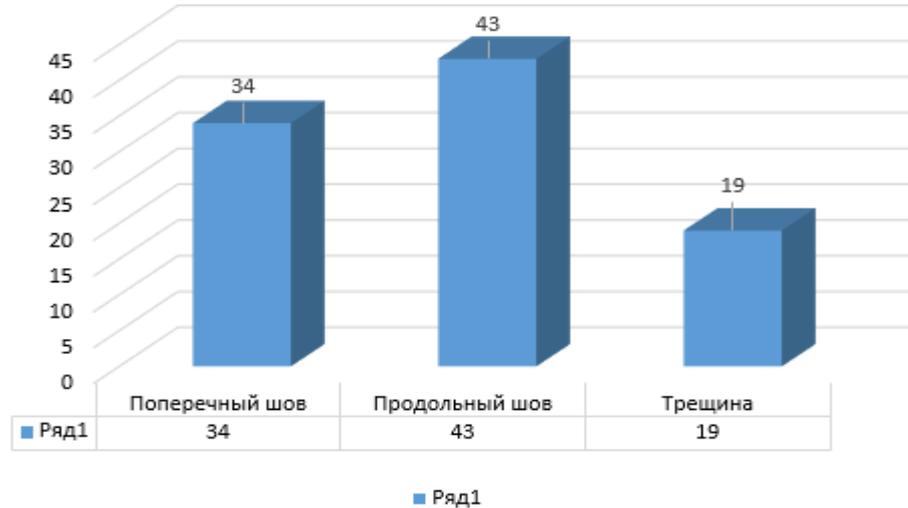


Рисунок 2.10 – Количественный показатель источников инфильтрации

Максимальное количество мест инфильтрации (96 случаев) было зафиксировано в тоннеле «Истиклол» в период с марта по май 2017 г. Установлено, что обделка тоннеля была покрыта влагой на площади 239,3 м².

В тоннеле «Шахристан» зафиксировано 19 мест инфильтрации воды суммарной площадью 42,5 м². При этом основная масса инфильтрации воды идёт через продольные и поперечные холодные швы (рисунок 2.11). Количество и площадь инфильтрационных мест воды и в этом тоннеле зависит от годовых суммарных осадков.

а)



б)



Рисунок 2.11 - Инфильтрация воды через холодные швы тоннеля «Истиклол» 2017 г.

2.4 Образование морозобойных трещин на обделке тоннелей

В бетонных обделках автодорожных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» уже за первые 5-7 лет эксплуатации возник ряд серьезных дефектов, в большей степени из-за воздействия низких температур воздуха в сочетании с интенсивным обводнением.

В зимний период РТ находится под постоянным влиянием действующего Сибирского антициклона. Холодному периоду года свойственны вторжения холодного арктического воздуха, при которых даже на юге Таджикистана температура воздуха в отдельные дни может понижаться от 24 до 30°С мороза. Средняя месячная температура января изменяется от +0,2 до -2,5°С, а в отдельных северных районах РТ понижается до -10,2°С (рисунок 2.12).

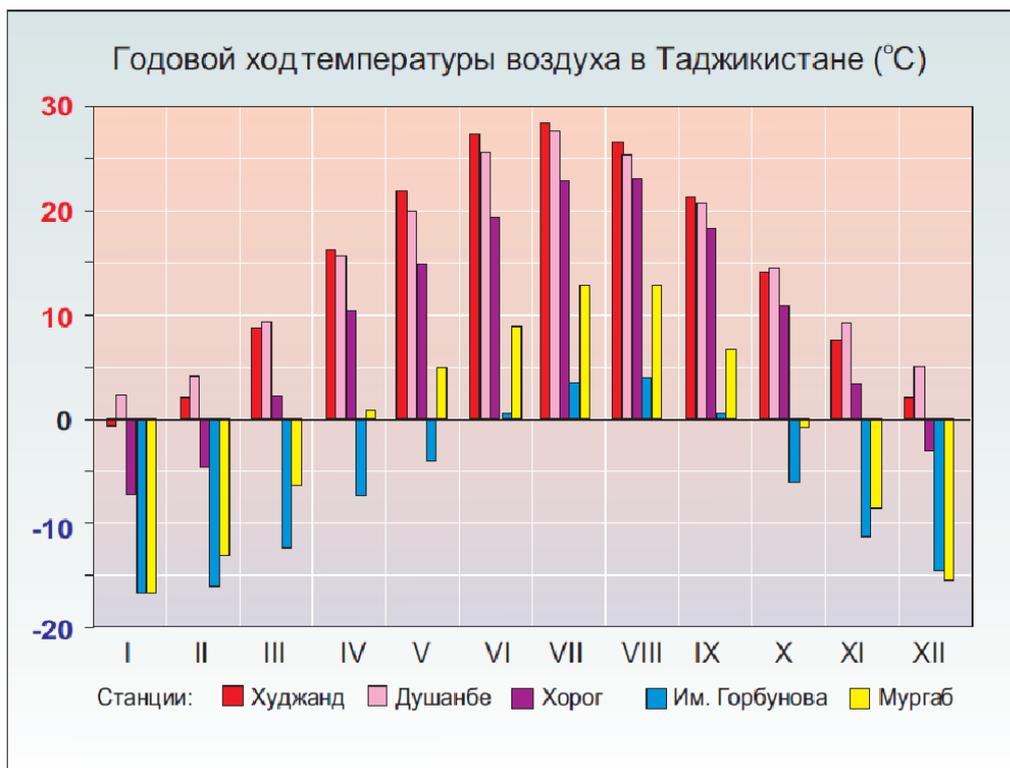


Рисунок 2.12 - Годовое изменение температуры воздуха в Таджикистане (°С)

В долинах высокогорья до высоты 2500 м (Зеравшанская долина, горные районы республиканского подчинения и часть Западного Памира) летом удерживается малооблачная и сухая погода, но более прохладная. Для данной зоны характерно последовательное понижение температуры с высотой [12-13].

Здесь среднемесячные температуры января изменяются в широких пределах: от -1°C в низовьях Зеравшанской долины, где проходит автодорога Душанбе-Худжанд через перевал «Анзоб» и «Шахристан», до -7°C в горах. Относительно высокими зимними температурами отличается вся территория Западного Памира, где в отдельных районах Калайхумб средняя месячная температура воздуха положительная. Абсолютный минимум (-34°C) был зарегистрирован в Тавильдаре.

Территория Анзобского перевала, где находится тоннель «Истиклол», расположена в зоне недостаточно влажного климата с умеренно-теплым летом и умеренно-мягкой зимой. Средняя годовая температура составляет $-1,8^{\circ}\text{C}$. Безморозный период в среднем продолжается 83 дня. Средняя температура самого холодного месяца января $-12,1^{\circ}\text{C}$. Средняя минимальная температура воздуха составляет $-15,8^{\circ}\text{C}$, но при вторжениях больших холодных масс температура воздуха может понижаться до $-24,3^{\circ}\text{C}$. В тоже время, днем в зимние месяцы в отдельные дни воздух может прогреваться до $+5^{\circ}\text{C}$. Средняя температура самого теплого месяца – июля – составляет всего $+9,7^{\circ}\text{C}$. В наиболее жаркие месяцы, в дневное время воздух прогревается до $+20^{\circ}\text{C}$, а абсолютный максимум составляет $+24^{\circ}\text{C}$. В тоже время, если средняя минимальная температура в летние месяцы составляет $+5-6^{\circ}\text{C}$, то в наиболее холодные годы в отдельные дни она может опускаться в ночное время до $-4-5^{\circ}\text{C}$. Абсолютный минимум в летнее время составил -10°C .

На рисунке 2.13 представлен графике изменения среднесуточных годовых температур, построенный по данным МС «Анзобский перевал». Из графика видна тенденция снижения среднесуточной температуры по годам.

Исходя из того, что происходит рост отрицательных температур, следует ожидать ежегодного увеличения количества морозобойных трещин и площадей образования наледей на поверхности мокрых стен тоннелей.

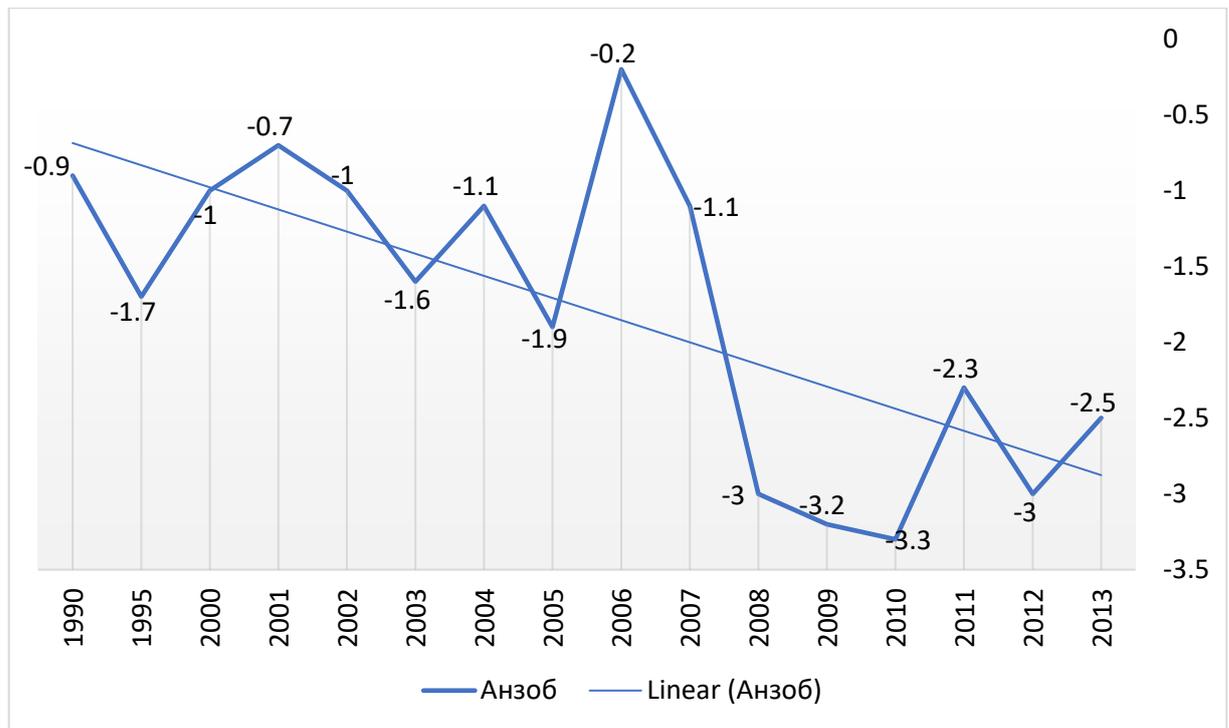


Рисунок 2.13 - Графике изменения среднесуточных годовых температур (по данным МС «Анзобский перевал»)

2.5 Образование наледей

Наледь - ледяное образование в месте течи или капежа, которое может быть действующей (активной), когда приращение тепла от источника превышает его теплопотери и идет процесс нарастания объема льда. Действующую наледь оценивают габаритными размерами и объемом вырубаемого льда. Недействующая наледь - состояние, при котором объем льда не увеличивается. Источник притока воды может полностью прекратить функционирование до момента оттаивания наледи или продолжать действовать под слоем льда.

Крупные течи с большими дебитами в тоннелях «Истиклол» и «Шахристан» способствуют образованию наледей, сохраняющихся в течение всей зимы. В начальный период наступления холодов в наибольшей мере подвергается обмерзанию обделка припортальных колец тоннелей, находящихся под воздействием внешней среды с низкой температурой. Затем порталные участки грунтового массива промораживаются, перекрывая выход грунтовым водам и смещая зону активного наледообразования к середине тоннеля.

В эксплуатационной практике известны случаи длительных перерывов в движении автотранспорта и поездов, вызванных интенсивным наледообразованием. Борьба с наледообразованием и обводненностью тоннелей приобрела особую актуальность в связи с переходом на электрическую тягу, так как даже небольшие струйные течи и незначительные наледи могут привести к короткому замыканию. Наледи-сосульки в своде тоннеля создают угрозу поломки токоприемников электровозов и утечки тока из контактной сети с угрозой для жизни и здоровья людей (рисунок 2.14).

а)



б)



Рисунок 2.14 - Наледообразование и сосульки в середине тоннеля «Истиклол»

Для обеспечения безопасности движения транспорта требуется большие трудозатраты и значительные средства.

Образование наледей существенно активизируется с началом перемерзания дренажных и водоотводных устройств. Способы осушения тоннелей с помощью заобделочных дренажей, дренажных прорезей, каптажных скважин, оправдавшие себя в условиях умеренного климата, оказались неэффективными в тоннелях «Истиклол» и «Шахристон», которые расположены в районе сурового климата. Большое значение для уменьшения наледообразования в тоннеле имеет своевременная очистка ото льда дренажных устройств, водосборных лотков или их утепление, что способствует отводу подземных вод.

Замеры наледей в 37 случаях показали по тоннелю «Истиклол» за 2017 г., что обделка тоннеля покрыта наледями на площади 50,5 м² (таблица 2.5). В

тоннеле «Шахристан» обследовано 5 наледей суммарной площадью 3,2 м². При этом на обоих тоннелях площадь одной наледей составляет 0,1 –2,5 м², а площади основной массы этого типа нарушений (более 70 %) находятся в пределах 1–2 м² (рисунок 2.15).

Таблица 2.5 - Площадь наледей на обделке тоннеля «Истиклол»

№ п/п	Источник наледей-образования,	Площадь, м ²
1	холодный шов	1,11
2	холодный шов	2,30
3	холодный шов	1,85
4	трещина	0,52
5	трещина	0,36
6	холодный шов	1,52
7	трещина	0,79
...
34	холодный шов	2,80
35	трещина	0,65
36	трещина	1,10
37	холодный шов	1,20
Среднее по площади наледей		1,364

По результатам проведенных исследований построены диаграммы распределения частоты наледей по площадям, что позволит производить предварительный прогноз возможного нарушения обделок при воздействиях наледей (рисунок 2.15).

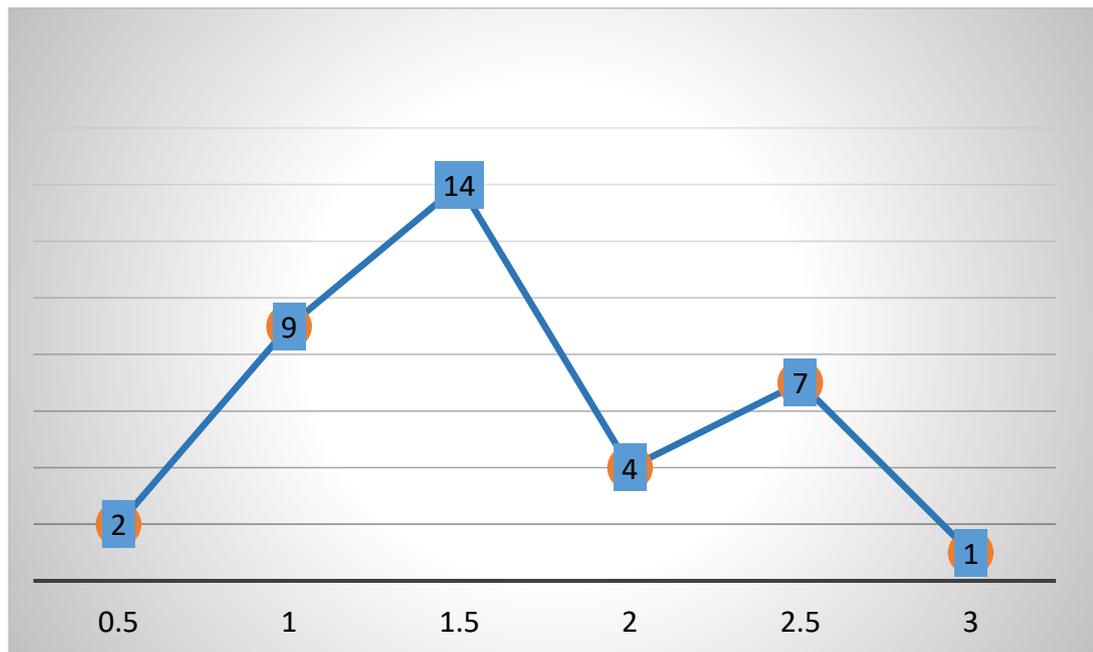


Рисунок 2.15 - Диаграмма частоты площадей наледей в тоннеле «Истиклол»

Практика эксплуатации тоннелей в районах суровой климата показала, что наиболее радикальным мероприятием в борьбе с отрицательными последствиями обмерзания тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» является их капитальный ремонт с устройством гидроизоляции обделки, ограничивающей поступление воды в тоннель.

Для количественной оценки указанных факторов на надежность подземных сооружений выполнен комплекс исследований в области устойчивости горных выработок в различных горно-геологических условиях.

2.6 Сейсмическое воздействие

Тоннели «Истиклол» и «Шахристан» находятся в сейсмоактивном районе. После ряда подземных толчков 7.12.2015 г. было проведено обследование тоннеля «Шахристан». Установлено, что в своде тоннеля на участке от K164+163 до K164+173 на высоте 5,8-6,0 м произошло расслаивание бетона на площади 15-16 м². В месте расслаивания на протяжении 11-12 м образовались воронки, ширина которых составляла от 0,5 до 2,2 м. Толщина расслоившего бетона около 0,45 м (рисунок 2.16).

а)



б)



Рисунок 2.16 - Разрушение стен тоннеля «Истиклол»

На пикетах К164+173 до К164+184 в своде тоннеля появилась трещина длиной 11 м и шириной 4-10 мм на высоте 6м. В промежутке от К164+345 до К164+410 образовались трещины и произошла просадка дорожного покрытия (рисунок 2.15). Продольные трещины в сводах и стенах обделки, направленные вдоль оси тоннелей, возникают при распространении поперечных волн под углом 45° к оси тоннеля и при воздействии продольных волн вдоль оси тоннеля. Это приводит к разрушению сводов тоннелей [17].

На пикете К164+217 поверхность дороги нарушена трещинами шириной 1-2 см. В отдельных местах произошло разрушение лотковой части тоннельной обделки в виде протяжённых трещин (рисунок 2.17, а), а также волнообразных деформаций поверхности основания лотка (рисунок 2.17, б).

а)



б)



Рисунок 2.17 – Сейсмическое воздействие в автодорожном тоннеле «Шахристан»: а- разрушение лотковой части; б - волнообразные деформации

Анализ рабочей документации и изучение проб бетона показали, что работы по строительству тоннеля выполнены в полном соответствии с проектом. Обследование мест разрушений позволило установить, что расслаивание бетона обделки и деформация арматуры, осадка покрытия дороги и изменения в пятах свода произошло вследствие влияния высокого давления горных пород и ряда других внешних факторов.

Наличие трещин, мокрых пятен и наледей на поверхности тоннеля ведет к образованию участков выщелачивания бетона обделки, раковин и вывалов. Опасность для устойчивости обделки представляют раскрывающиеся трещины, особенно в тех случаях, когда они сочетаются с мокрыми пятнами, зонами капежа и течей воды. Поступающая по трещинам и порам вода взаимодействует с цементом и разрушает его.

С течением времени скрытые дефекты к обделке под воздействием неблагоприятных факторов переходят в разряд явных, что ведет к возникновению аварийных ситуаций, требующих принятия безотлагательных действий по предотвращению разрушения обделки.

3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Длительный срок эксплуатации автотранспортных и железнодорожных тоннелей предъявляет повышенные требования к их устойчивости, что в свою очередь определяет эффективность работы выработки.

Как уже отмечалось, на эксплуатационную надежность подземных сооружений определяющее значение оказывает степень устойчивости обделки, зависящая от воздействия факторов природного и техногенного характера.

Правильный выбор типа и параметров крепи на стадии проектирования, применение рациональной технологии строительства подземных сооружений и возведения обделки, выполнение мероприятий по водоулавливанию и водоподавлению в тоннеле, повышению морозостойкости обделки, что обеспечит ее высокое качество обделки и минимум затрат при дальнейшей эксплуатации.

Существует ряд дефектов, снижающих техническое состояние тоннельного перехода: негабаритность тоннеля; отсутствие раструбных участков на входах в тоннель; уменьшенные толщины обделки и защитного слоя бетона; отсутствие гидроизоляции тоннеля и систем сбора и отвода воды из тоннеля; отсутствие сейсмических и температурно-деформационных швов; отсутствие у порталов площадок разворота транспортных средств; отсутствие в сервисных штольнях бетонных полов, стационарного освещения, тамбур-шлюзов с противопожарными дверями.

Проблема эксплуатационной надёжности подземных сооружений решается на основе прогнозирования состояния тоннелей во времени и разработке мероприятий и способов повышения работоспособности обделки.

3.1 Методика оценки технического состояния конструкций и обустройств транспортных тоннелей

В ходе исследований была выполнена оценка технического состояния транспортных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» на протяжении более 5 км с подходами к тоннелям по 150 м.

Работы проводились по усовершенствованной методике оценки транспортно-эксплуатационного состояния горных автодорожных тоннельных переходов, разработанной Федеральным дорожным агентством (Росавтодора) Министерства транспорта Российской Федерации [38].

По результатам обследований, проведенных в 2014-2017 гг., в конструкциях и обустройствах тоннельных переходов обнаружены дефекты. Их идентификация проведена по классификации дефектов [38,54,82,90].

Динамика изменения объёма дефектов в тоннеле «Шахристан» приведена на рисунке 3.1.

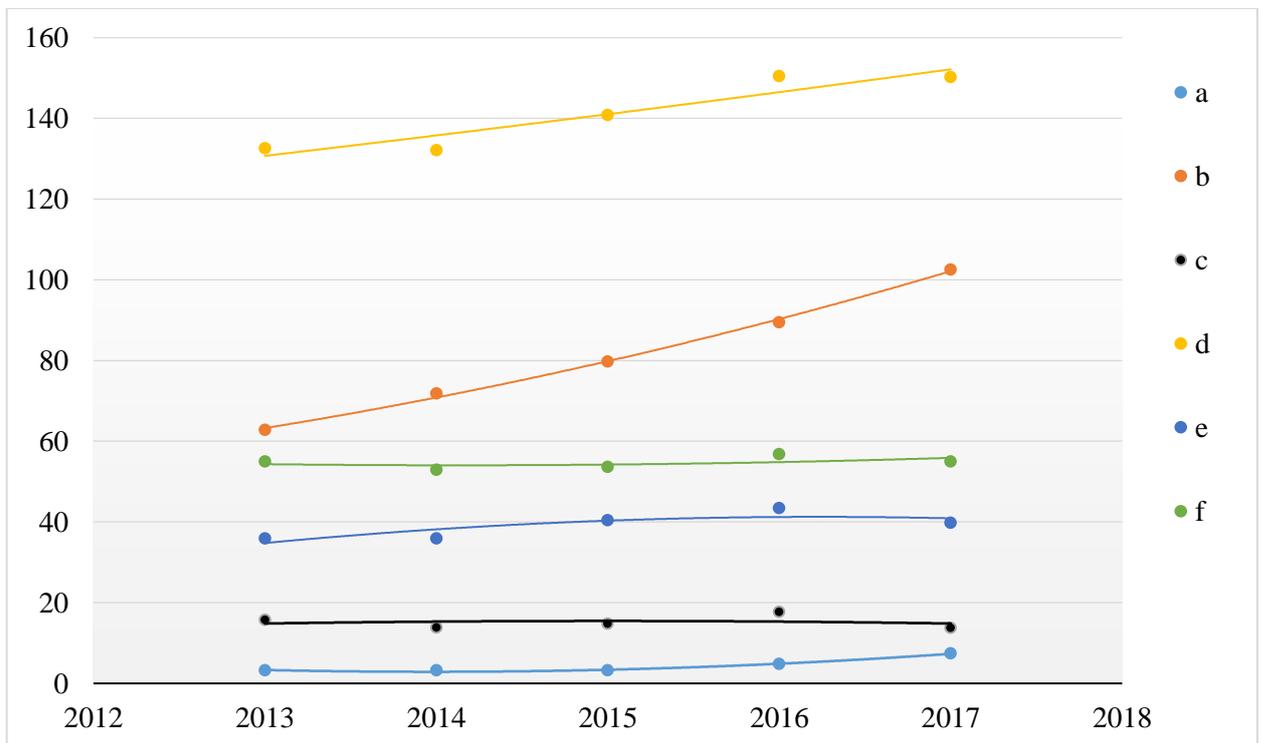


Рисунок 3.1 – Динамика изменения сумма объёма дефектов в отдельной части тоннеля «Шахристан» (a, b ... - категории критичности. См. табл. 3.1)

Оценка технического состояния тоннеля «Истиклол» приведена в таблице 3.1.

По результатам промышленных наблюдений выполнено ранжирование дефектов с использованием коэффициент ранжирования.

Коэффициент ранжирования категорий критичности получен с помощью количественных (в баллах) характеристик показателей надежности и объединенных в группы, соответствующие классификации категорий критичности [54]. Коэффициенты ранжирования являются весовыми коэффициентами (тяжести) дефектов подсистемы (элемента) в пределах одной категории критичности.

В соответствии с классификацией работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования и искусственных сооружений на них рекомендуются следующие категории по ремонтнопригодности:

1. реконструкция или новое строительство;
2. капитальный ремонт;
3. ремонт;
4. содержание.

Таблица 3.1 – Оценка технического состояния транспортного тоннеля «Истиклол» за 2017 г.

№ п/п	Описание дефекта (события)	Категория критичности	Коэффициент ранжирования k_p	Количество дефектов по годам					Категория по ремонтнопригодности
				2013	2014	2015	2016	2017	
<i>a</i>	Порталы								
1	Отслоение отделочных штукатурных покрытий на поверхности портала	C	0,6	2	2	2	3	4	4
2	Нарушение гидроизоляции выносных порталных участков тоннелей с усилением их обводнения после ливней и в период таяния снега	D	1	2	2	2	2	2	4

Продолжение таблицы 3.1

<i>b</i>	Тоннельная обделка из монолитного бетона или железобетона (восприятие внешних нагрузок и воздействий от грунтового массива)								
1	Выступление внутрь очертания габарита приближения строений на 50 мм и более отдельных частей обделки, элементов коммуникаций и наледи на стенах и своде	B	1	33	35	37	40	45	2
2	Наличие поперечных трещин в холодных и деформационных швах с раскрытием более 0,2 мм.	D	1	9	13	15	17	20	4
3	Разбирающийся вручную на глубину более 20 мм деструктивный бетон обделки, размороженный или выщело-ченный	D	0,65	10	12	14	17	22	4
4	Отслоение покрытий бетона обделки.	D	0,55	8	10	13	16	15	4
5	Наличие раковин и каверн на поверхности обделки глубиной более 20 мм	D	0,3	33	35	38	42	50	4
<i>c</i>	Внутритуннельные обустройства (обеспечение заданных параметров функционирования объекта)								
1	Неисправности вентиляционных систем	B	1	2	2	2	2	2	2
2	Неисправности заградительной сигнализации (светофоры, шлагбаумы)	B	0,5	2	2	2	2	2	3
3	Неисправности систем энергообеспечения	C	1	1	1	1	1	1	3
4	Отсутствие системы электрообогрева водоотводных лотков	D	1	0	0	0	0	0	4
5	Замусоренность или заиленность выпусков из заобделочных дрена-жей, перепусков из дренажных штолен и внутритоннельных водоотводных лотков	D	0,95	3	4	5	7	5	4
6	Отсутствие освещения на участке тоннеля	D	0,5	12	12	12	14	12	4

Продолжение таблицы 3.1

<i>d</i>	Обводнение объектов тоннельного сооружения								
1	Течи с выносом грунта из-за обделки.	В	1	4	5	4	4	5	2
2	Действующие наледи на поверхности обделки, в нишах и камерах, увеличивающиеся в объеме	В	0,7	23	20	27	31	30	4/2
3	Течи и капез с попаданием воды на устройства освещения и электромеханического оборудования	В	0,6	15	15	17	21	19	3/2
4	Сырость и отдельный капез, течи отсутствуют	Д	1	88	90	92	95	96	4/2
5	Недействующие наледи толщиной до 50 мм на поверхности обделки	Д	0,65	12	12	13	16	15	4/2
6	Течи с выносом ржавчины	Д	0,45	17	14	16	15	17	4/2
<i>e</i>	Проезжая часть в тоннеле (обеспечение безопасного и плавного движения автотранспорта в тоннеле)								
1	Поперечные трещины с расстоянием между ними от 1 до 40 м при наличии выплесков воды из трещин	В	0,65	1	2	4	4	5	2
2	Трещины (холодные) продольные по оси и краям проезжей части при наличии из них выплесков воды	В	0,6	40	41	43	47	48	4/2
3	Крупные выбоины глубиной более 50 мм (по площади более 1 м ²) с повреждением защитного слоя и обнажением арматуры	С	1	3	3	5	7	12	3/2
4	Одиночные выбоины глубиной 50 мм по площади (до 0,5 м ²) с повреждением защитного слоя и обнажением арматуры	С	0,7	12	10	10	8	7	4/2

<i>f</i>	Прочие элементы (информационные, ограждающие и защитные функции)								
1	Нарушение охранных заграждений и пешеходных тротуаров	C	1	10	8	7	7	10	4
2	Наличие свободного доступа к опасным объектам и электромеханическому оборудованию	C	0,85	40	41	43	47	40	4
3	Отсутствие сигнальной окраски ниш и камер, их нумерации	D	0,4	25	22	21	20	20	4
4	Захламленность ниш, камер и охранных зон	D	0,2	5	6	8	9	15	4

По результатам анализа и идентификации дефектов определена абсолютная оценка технического состояния тоннельного перехода.

Абсолютная оценка $|TC|$ представляет собой сумму всех дефектов конструкций и обустройств тоннельного перехода с учетом их ранжирования по тяжести последствий, что характеризует состояние тоннельного сооружения в определенный момент его функционирования. В связи с этим рост количества дефектов за фиксированный период наблюдений указывает на развитие деструктивных процессов и ухудшение технического состояния, и наоборот, снижение абсолютной оценки характеризует улучшение технического состояния в сравнении с предыдущим периодом. Улучшение или ухудшение технического состояния может быть связано как с изменением внешних воздействий, так и в результате ремонтных мероприятий.

$$|TC| = k_a \sum A + k_b \sum B + k_c \sum C + k_d \sum D, \quad (3.1)$$

где $|TC|$ - абсолютная оценка технического состояния тоннельного перехода; k_a, k_b, k_c, k_d - коэффициенты ранжирования дефектов в соответствующих категориях критичности А, В, С и D.

Динамика изменения суммы объёма дефектов в отдельных частях тоннеля приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Динамика изменения объёма дефектов (ТС) основных обследуемых участков тоннеля «Истиклол»

Наименование основных обследуемых участков тоннеля		Оценки технического состояния тоннеля «Истиклол»									
		2013		2014		2015		2016		2017	
		$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$
1	Порталы	–	$\frac{1,2}{2}$	–	$\frac{1,2}{2}$	–	$\frac{1,2}{2}$	–	$\frac{1,8}{3}$	–	$\frac{2,4}{5}$
2	Обделки тоннеля	$\frac{–}{33}$	$\frac{–}{29,8}$	$\frac{–}{35}$	$\frac{–}{36,8}$	$\frac{–}{37}$	$\frac{–}{42,7}$	$\frac{–}{40}$	$\frac{–}{49,5}$	$\frac{–}{45}$	$\frac{–}{57,55}$
3	Внутри туннельные обустройства	$\frac{–}{3}$	$\frac{1}{11,7}$	$\frac{–}{3}$	$\frac{1}{9,8}$	$\frac{–}{3}$	$\frac{1}{10,8}$	$\frac{–}{3}$	$\frac{1}{13,7}$	$\frac{–}{2}$	$\frac{1}{10,75}$
4	Объекты тоннельного сооружения	$\frac{–}{29,1}$	$\frac{–}{103,5}$	$\frac{–}{28}$	$\frac{–}{104,1}$	$\frac{–}{33,1}$	$\frac{–}{107,7}$	$\frac{–}{38,3}$	$\frac{–}{112,2}$	$\frac{–}{36,8}$	$\frac{–}{113,4}$
5	Проезжая часть тоннеле в	$\frac{–}{24,5}$	$\frac{11,4}{–}$	$\frac{–}{25,9}$	$\frac{10}{–}$	$\frac{–}{28,4}$	$\frac{12}{–}$	$\frac{–}{30,8}$	$\frac{12,6}{–}$	$\frac{–}{32,1}$	$\frac{7,7}{–}$
6	Прочие элементы	$\frac{–}{–}$	$\frac{44}{11}$	$\frac{–}{–}$	$\frac{42,9}{10}$	$\frac{–}{–}$	$\frac{43,6}{10}$	$\frac{–}{–}$	$\frac{47}{9,8}$	$\frac{–}{–}$	$\frac{44}{11}$
Абсолютная оценка технического состояния тоннельного перехода ТС		305,2		309,7		332,5		362,7		368,4	

Примечание: SA, SB, SC, SD - сумма дефектов с соответствующей категорией критичности.

График вероятности (рисунок 3.2) для событий (дефектов) различного типа, произошедших с 2013 г. по 2017 г. был построен и исследован с использованием программного обеспечения MINITAB 2017. Данные графика позволяют проанализировать вероятность обнаружения дефекта определенного значения и выполнить их ранжирование по частоте возникновения.

Было определено среднее и стандартное отклонение. По величине значения (p), можно провести оценку распределения вероятности появления того или иного события. Анализ проводили с 95% доверительным интервалом.

Из рисунка 3.2 видно, что только среди зарегистрированных дефектов типа 1 и типа 2, значение p по тесту Андерсона-Дарлинга ниже 0,05. Это означает, что среднее значение, полученное для данных дефектов, не является истинным

средним значением и не может использоваться для определения вероятности появления дефектов 1-го и 2-го типов.

В то же время другие дефекты (типов 3 - 6), имеют значение p больше 0,05, и вероятность их появления достигает 95%. Следовательно, средние значения, полученные для дефектов (3-6 тип), являются истинным и могут быть использованы для определения вероятности их появления.

Исходя из этого, вначале подлежат ликвидации дефекты 6-го типа, так как они имеют самое высокое значение p среди всех прочих типов дефектов и имеют наивысшую вероятность появления этого конкретного события. В последнюю очередь ремонтные работы будут выполняться на дефектах 2-го, а затем 1-го типа, так как они имеют наименьшее значение p [96].

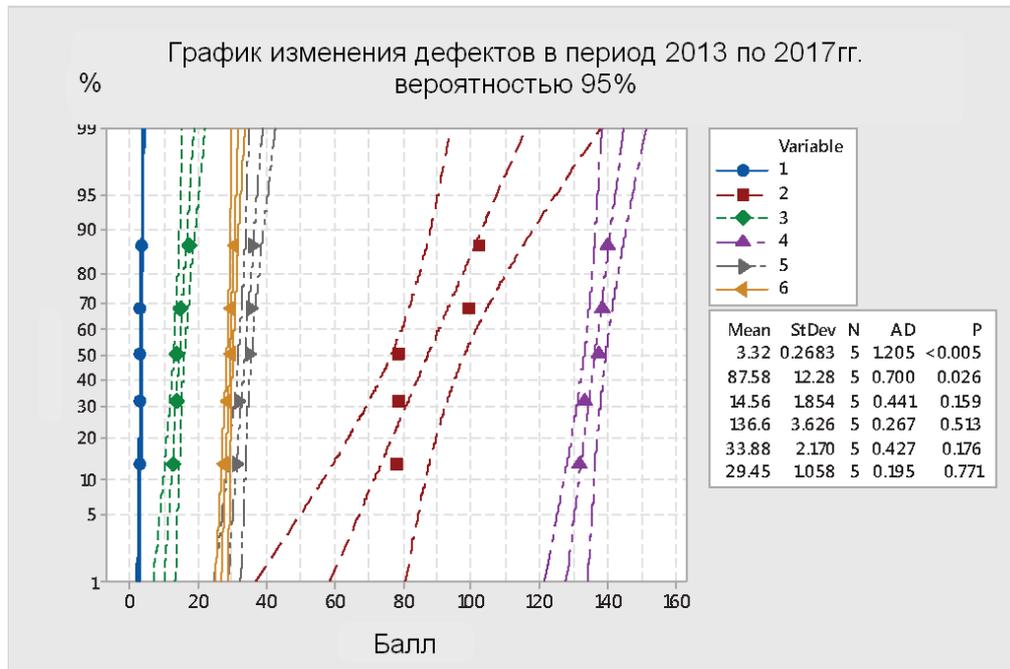


Рисунок 3.2 – График вероятности для событий (дефектов) различного типа:
1 – порталы, 2- обделка тоннеля, 3- внутритуннельные обустройства, 4- обводнение объектов тоннельного сооружения, 5- проезжая часть в тоннеле

Оценка технического состояния (ТС) за рассматриваемый период приведена на рисунке 3.3. Приведенная динамика показывает, что происходит ухудшение технического состояния тоннельного перехода за счёт увеличения количества дефектов категории В и D.

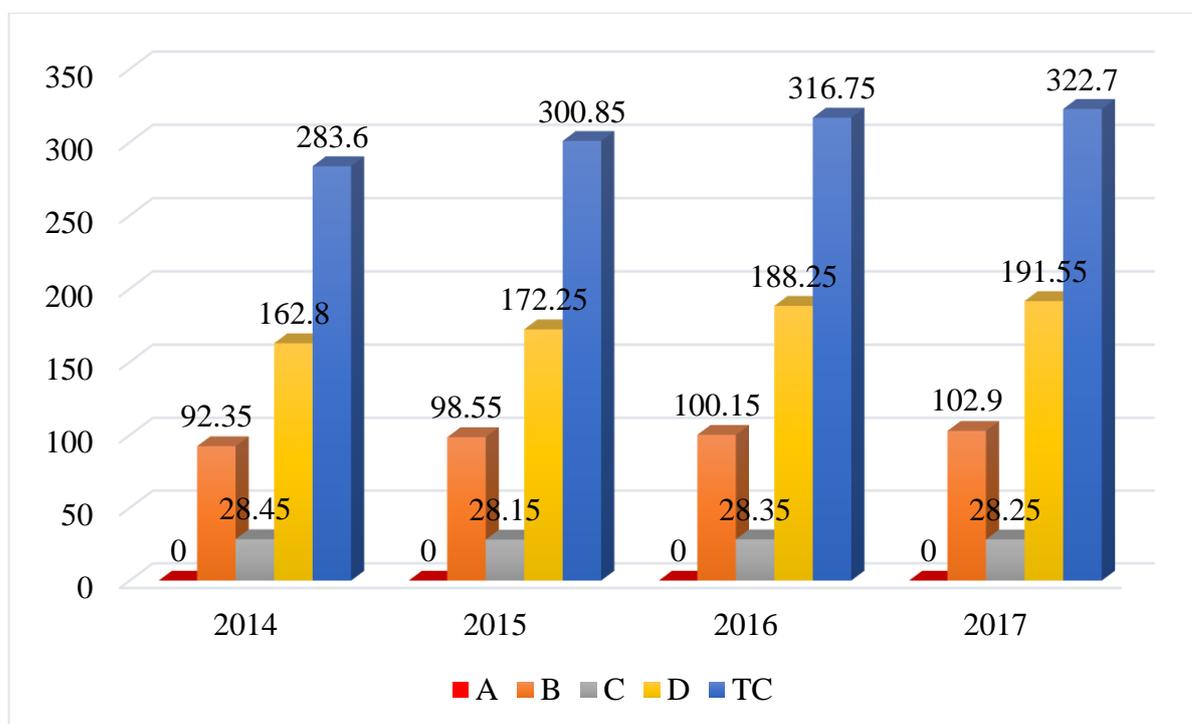


Рисунок 3.3 – Оценка технического состояния транспортного тоннеля «Истиклол» по категории критичности: А - высокий риск, В - значительный риск, С - существенный риск, D - несущественный риск, ТС - техническое состояние

Анализ обнаруженных дефектов по категориям ремонтпригодности в тоннеле «Истиклол» показывает, что на момент обследования конструкции и обустройства тоннельного перехода требуют:

- капитального ремонта (2 категория по ремонтпригодности) в 4 случаях;
- ремонта (3 категория) в 6 случаях;
- ремонта при содержании (4 категория) в 17 случаях.

При проведении оценки технического состояния не было обнаружено дефектов категории А (1 категория по ремонтпригодности) в тоннеле «Истиклол».

Аналогичная оценка технического состояния была выполнена в тоннеле «Шахристан» (рисунок 3.4).

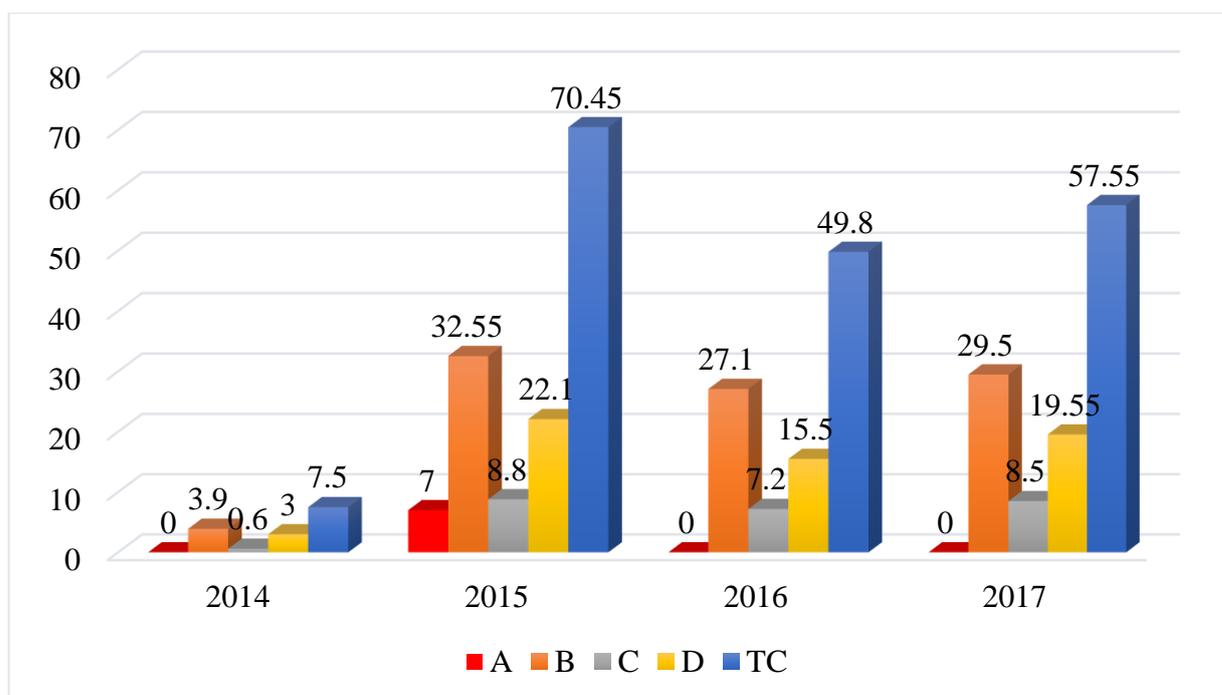


Рисунок 3.4 – Оценка технического состояния транспортного тоннеля «Шахристан» по категории критичности: А - высокий риск, В - значительный риск, С- существенный риск, D - несущественный риск, ТС- техническое состояние

Установлено что, для тоннеля «Шахристан» требуется:

- капитальный ремонт (2 категория по ремонтпригодности) в 6 случаях;
- ремонт (3 категория) в 6 случаях;
- ремонт при содержании (4 категория) в 6 случаях.

При оценки технического состояния за 2017 г. не было обнаружено дефектов категории А (1 категория по ремонтпригодности). Однако, дефект данной категории был обнаружен в 2015г. и были проведены ремонтно-восстановительные работы.

Эффективность содержания тоннельного перехода при эксплуатации может быть оценена нарастанием или снижением количества дефектов 4 категории по ремонтпригодности или категории критичности D для тоннеля «Истиклол».

Дефекты, вызванные обводненностью, могут быть устранены при текущем ремонте, но стабильный ежегодный рост количества водопроявлений и объемов водопритоков в тоннель через образовавшиеся дефекты требует дополнительных мероприятий - осушения обделки и грунтового массива, что относится к

капитальному ремонту (2 категория по ремонтпригодности), выполняемому по специальному проекту. Относительная оценка производится по формуле:

$$TC_0 = \frac{|TC|}{0,01 \times L} = \frac{322,7}{0,01 \times (100 + 4996 + 100)} = 6,21 \text{ балла.} \quad (3.2)$$

По транспортному тоннелю «Шахристан» (длиной 5253 м с подходами по 150 м) оценка технического состояния дефектов за 2017г. показала, что их относительное количество (TC_0) составляет:

$$TC_0 = \frac{|TC|}{0,01 \times L} = \frac{57,55}{0,01 \times (150 + 5253 + 150)} = 1,04 \text{ балла.} \quad (3.3)$$

Это дает основание считать состояние тоннеля «Истиклол» более тяжелым по сравнению с тоннелем «Шахристан».

Таблица 3.3 – Расчёт динамики изменения объёма дефектов (ТС) транспортного тоннеля «Истиклол» за 2013-2017 гг.

Год	Техническое состояние тоннеля, балл.	Абсолютный прирост, балл		Темп роста, %		Темп прироста, %		Абсолютное значение 1% прироста, балл.
		цепной	базисный	цепной	базисный	цепной	базисный	
2013	305,2							
2014	309,7	4,5	4,5	101,47	101,47	1,47	1,47	3,052
2015	332,5	22,8	27,3	107,36	108,81	7,36	8,81	3,097
2016	362,7	30,2	57,5	109,08	117,29	9,08	17,29	3,325
2017	368,4	5,7	63,2	101,57	117,42	1,57	17,42	3,627

Анализируя данные таблицы 3.3, можно сделать следующий вывод - изменения объёмов дефектов (ТС) тоннеля «Истиклол» отличается неустойчивостью и имеет циклический характер, резко повышаясь до 362,7 балла в 2016 г. Темп роста, рассчитанный цепным способом, свидетельствует о том, что максимальное повышение изменения объёмов дефектов (ТС) до 109,08% было в 2016 г. по сравнению с остальными годами, а минимальное повышение было в 2014 г. до 101,47% по сравнению с 2013 г.

На основе проделанных расчётов можно сделать выводы о состоянии среднегодовых показателей динамики изменения объёмов дефектов (ТС) по тоннелю «Истиклол» в целом. Изменения объёмов дефектов характеризуется относительной неустойчивостью рассматриваемой обделки.

Абсолютный прирост, рассчитанный цепным способом, показывает, что максимальное увеличение было в 2016 г. и составило 30,2 баллов по сравнению с 2013 по 2015 годы, а минимальное увеличение в 2014 г. - 4,5 баллов по сравнению с предыдущими годами. Абсолютный прирост, рассчитанный базисным способом, имел максимальное увеличение в 2017 г. и составил 63,2 баллов по сравнению с предыдущим годами.

Темп роста, рассчитанный базисным способом показывает, что рост изменения объёмов дефектов (ТС) тоннеля был максимальным в 2017 г. и составил 117,29 %, а в 2014 г. был минимальным и составил 101,47 % по сравнению с 2013 г. Из расчётов видно, что наиболее неблагоприятные изменения объёмов дефектов (ТС) тоннеля «Истиклол» были в 2016 г. по сравнению с 2013-2015 гг.

Динамика изменения технического состояния тоннеля «Истиклол» представлена в виде линейной диаграммы (рисунок 3.5).

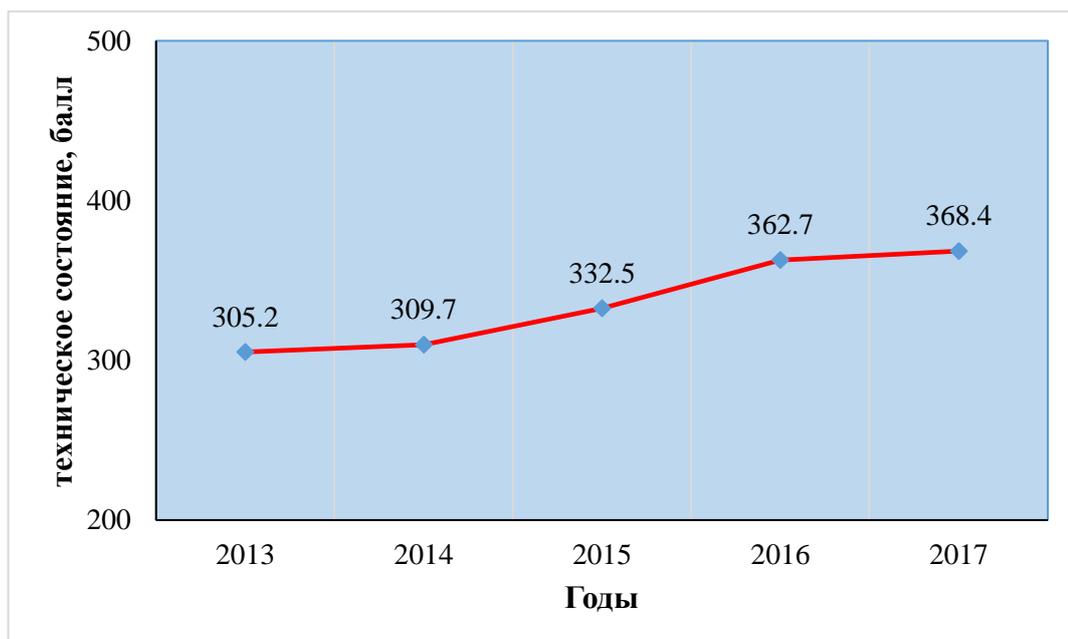


Рисунок 3.5 – Динамика технического состояния тоннеля «Истиклол» за 2013-2017 гг.

Построенный график подтверждает неустойчивость валового сбора. Так с 2013 по 2015 гг. прослеживается планомерное увеличение количества дефектов, а в 2016 резко увеличивалась, в 2017 г. достигло максимального показателя (по сравнению с предыдущими годами).

Анализ динамики изменения объёмов дефектов (ТС) тоннеля «Истиклол» показал:

а) средний абсолютный прирост

$$\Delta \bar{y} = \frac{y_n - y_0}{n - 1} = \frac{368,4 - 305,2}{5 - 1} = 15,8 \text{ балла}; \quad (3.4)$$

б) Расчёт прогноза по средним темпам роста

$$\overline{TP} = \sqrt[n-1]{\frac{y_n}{y_0}} = \sqrt[5-1]{\frac{368,4}{305,2}} = 1,0482 \text{ или } 104,82\%; \quad (3.5)$$

в) Средний темп прироста

$$\overline{TP} - 100\% = 104,82 - 100 = 4,82\%. \quad (3.6)$$

Средние показатели ряда динамики свидетельствуют о том, что ежегодно в течение изучаемого периода количество дефектов (ТС) тоннеля «Истиклол» увеличивалась на 15,8 балла или на 4,82%.

Прогноз изменения объёма дефектов (ТС) тоннеля «Истиклол» на последующие 3 года составляет:

$$y_t = \overline{TP}^k \times y_n = 1,0482^3 \times 368,4 = 424,28 \text{ балла}. \quad (3.7)$$

где k - время упреждения прогноза (число прогнозируемых интервалов времени).

Расчёт прогноза путем выравнивания (сглаживания) динамического ряда также применяется при наличии устойчивой тенденции роста или снижения показателей динамического ряда. При этом тенденция развития прогнозируемого явления приблизительно описывается графиком полиномиального математического уравнения:

$$y = 0,7x^2 - 2803,1x + 3E+06, \quad (3.8)$$

Используя данное выражение, рассчитан прогноз динамики изменения объёмов дефектов для тоннеля «Истиклол» (рисунок 3.6).

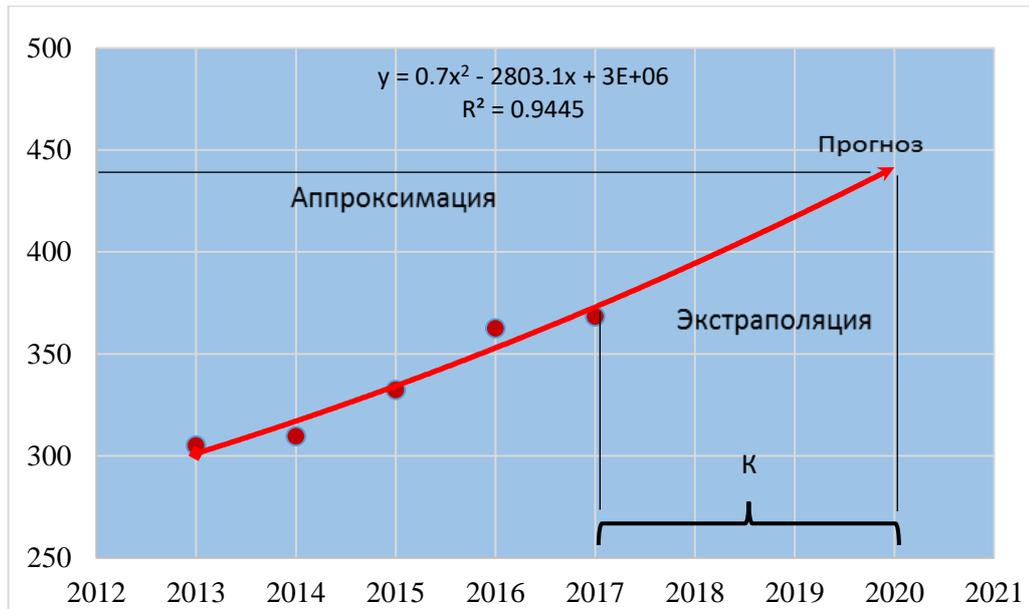


Рисунок 3.6 – Прогноз динамики изменения объёмов дефектов (ТС) тоннеля «Истиклол» на 2018-2021 гг.

Аналогичным (как в тоннеле «Истиклол») образом была выполнена оценка динамики изменения объёма дефектов (ТС) в тоннеле «Шахристан».

Таблица 3.4 – Расчёт динамики изменения объёма дефектов (ТС) основных обследуемых участков тоннеля «Шахристан».

Наименование основных обследуемых участков тоннеля		Оценки технического состояния тоннеля «Истиклол»									
		2013		2014		2015		2016		2017	
		$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$	$\frac{SA}{SB}$	$\frac{SC}{SD}$
<i>a</i>	Порталы	—	—	—	0,6	—	0,6	—	1,8	—	3,5
		—	—	—	—	—	2	—	2	—	7
<i>b</i>	Обделки тоннеля	—	—	—	—	—	1,6	—	1,6	—	1,6
		3,9	3	3,9	3	7,2	4,2	12,15	7,75	12,1	9,4
<i>c</i>	Внутритуннельные обустройства	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	0,8	—	0,8	—	0,8	—
<i>d</i>	Объекты тоннельного сооружения	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	2,7	0,45	7,9	1,35	12,9	3,5
<i>e</i>	Проезжая часть в тоннеле	—	—	—	—	—	3,4	—	3,4	—	3,4
		—	—	—	—	3,7	—	3,7	—	3,7	—
<i>f</i>	Прочие элементы	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Абсолютная оценка технического состояния тоннельного перехода ТС		6,9		7,5		26,65		42,45		57,9	

Динамика изменения объёмов дефектов (ТС) для тоннеля «Шахристан» представлена на рисунке 3.7.

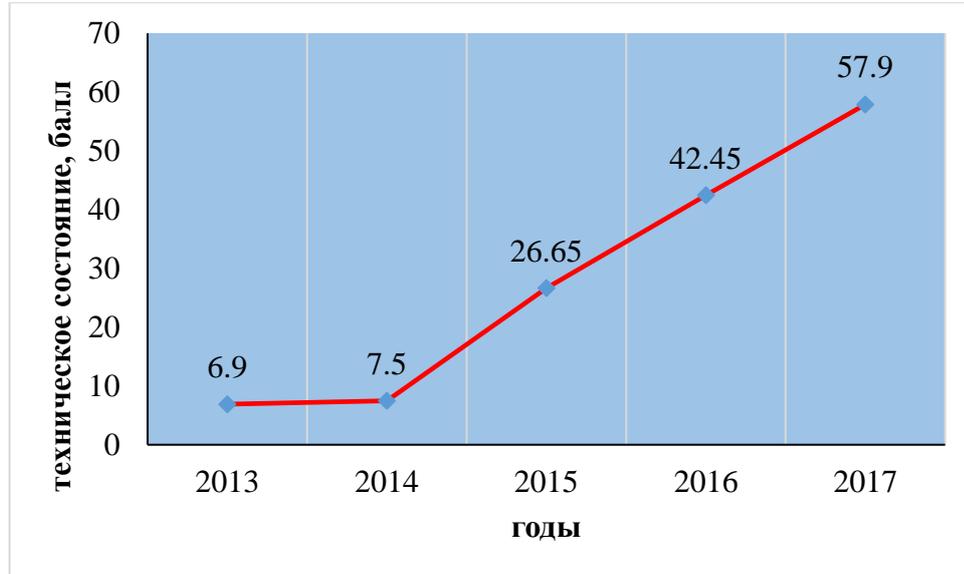


Рисунок 3.7 – Динамика технического состояния тоннеля «Шахристан» Федерации за 2013-2017 гг.

Используя выражение 3.8, рассчитан прогноз динамики изменения объёмов дефектов для тоннеля «Шахристан» (рисунок 3.8).

График прогноза изменения объёма дефектов (ТС) тоннеля «Шахристан» имеет вид:

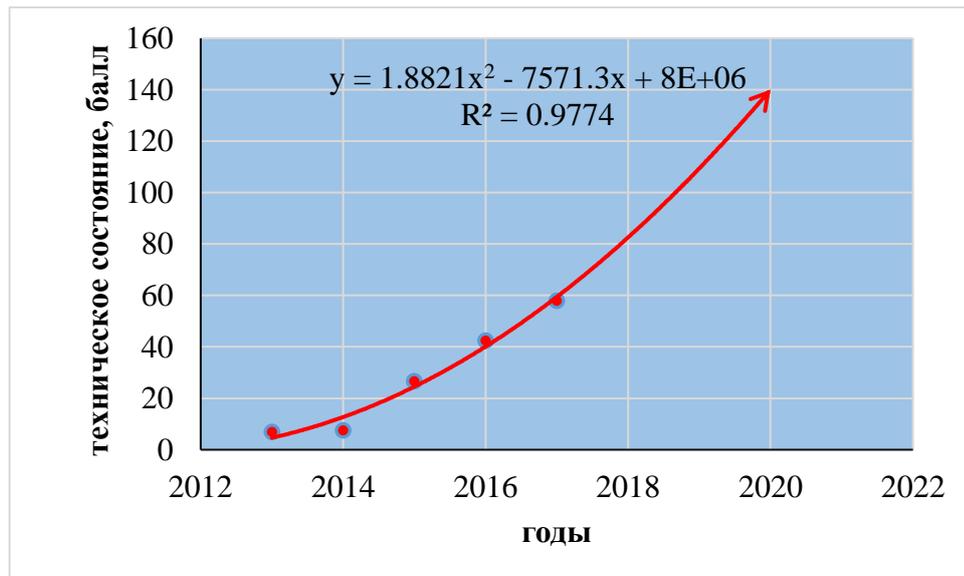


Рисунок 3.8 – Прогноз динамики изменения объёмов дефектов (ТС) тоннеля «Шахристан» на 2018-2021 гг.

Выполненный комплексный анализ оценки технического состояния транспортных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» в период с 2013г. по 2017г. позволил установить, что состояние тоннелей ухудшается с каждым годом и требуется проведение ремонтно-восстановительных работ.

На основе анализа технического состояния тоннелей разработана номенклатура ремонтов тоннельных конструкций и обустройств, применительно к рассматриваемым тоннелям (таблица 3.5).

Таблица 3.5 - Номенклатура ремонтов тоннельных конструкций и обустройств

Тоннельная конструкция, обустройство	Вид дефекта	Основные работы
1	2	3
Обделки тоннелей из монолитного бетона и железобетона. Облицовочные покрытия, в том числе в безобделочных тоннелях	Отслоение бетона обделки	1 Закрепление отслаивающегося куска бетона подхватами на анкерах. 2 Обрушение отслоений в плановом порядке с последующей обorkой полости и навеской сетки на анкерах
	Трещины раскрытием >2 мм стабилизировавшиеся	Разделка трещин с последующей чеканкой специальными составами
	Слабый, выщелоченный, размороженный бетон, раковины, каверны	1 Обorkа слабого бетона. 2 Оштукатуривание материалами проникающего действия (на больших поверхностях - по плоским сеткам)
Обводненность	Течи, капеж, сырость	Организованный отвод воды по шлангам и штробам
	Наледи	1 Околка и вывоз льда из тоннеля 2 Утепление наледиобразующих течей
Дренажные и водоотводные устройства	Неэффективное осушение обделки и грунтового массива	1 Прочистка каптажных скважин. 2 Замена дренирующей засыпки дренажей
	Перемерзание водоотводных лотков	1 Утепление лотков теплоизоляционными материалами. 2 Устройство или ремонт электрообогрева
	Повышение уровня воды в лотках	Очистка лотков от наносов и мусора
	Разрушение мощения нагорных канав и кюветов	Ремонт или устройство мощения

1	2	3
Подходы к тоннелю и порталные выемки	Нависающие камни на откосах, оплывающие откосы	Оборка откосов от нависающих камней. Укрепление откосов согласно состоянию грунтов
	Разрушение мощения и гидроизоляции в запортальной зоне	Восстановление мощения и гидроизоляции
	Трещины в конструкциях порталов и стенок. Разрушение защитного слоя арматуры	Разделка трещин и их чеканка специальными составами. Оштукатуривание мест оголения арматуры материалами проникающего действия. Сплошное покрытие поверхностей гидроизолирующими покрытиями или гидрофобизаторами
Тоннель в целом (в порядке технического обслуживания)	Замусоривание проезда, служебных проходов, тротуаров, камер и ниш и др. Отсутствие знаков, надписей, пикетажа и т.д.	Уборка и вывоз загрязнителей, покраска ниш и камер, порталов, восстановление информационных и указательных знаков и табличек, надписей, дорожных знаков и т.д.

Полученная фактическая картина состояния обделок обеспечивает достоверный подход к проектированию строительства тоннелей, позволяет прогнозировать возможные нарушения обделок, выбирать оптимальную технологию и комплекс оборудования, занятого на ремонтно-восстановительных работах транспортных тоннелей [26].

По результатам проведенного анализа выявлено, что грунтовые воды являются основной причиной появления и развития дефектов в тоннелях. Вода во всех ее состояниях является одним из важнейших деструктивных факторов, уменьшающих срок службы строительных конструкций из любого материала. Поэтому при сооружении тоннелей в каждой климатической зоне проектировщикам и эксплуатационникам приходится решать задачи по защите подземных сооружений от пагубного влияния влаги.

3.2 Водоулавливание агрессивных подземных вод транспортного тоннеля «Истиклол»

При эксплуатации большинства горных тоннелей в Средней Азии сталкиваются с проблемой инфильтрации подземных вод. В некоторых тоннелях не были учтены гидроизоляционные меры при проектировании или при строительстве данного сооружения, что привело к серьезным последствиям при эксплуатации тоннелей. Характерными примерами являются автодорожные тоннели «Истиклол» и «Шахристан» в Республике Таджикистан, которые были сданы в эксплуатацию, но гидроизоляционные работы продолжаются до настоящего времени (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 - Гидроизоляционные работы в тоннеле «Истиклол»

Проектирование тоннеля «Истиклол» было выполнено специалистами московского института «Гидроспецпроект» и проектно-изыскательского института «Таджикгипротрансстрой» в 1980-х годах. Строительство началось в 1988 году, но закончено только в 2006 году.

Основной проблемой тоннеля при эксплуатации является инфильтрация подземных вод через обделку. По гидрогеологическому режиму условия строительства относятся к сложным, в связи с чем при горнопроходческих

работах и при эксплуатации, предусматриваются мероприятия по перехвату и отводу поверхностных вод, а также водопонижению и отводу подземных вод.

Основным видом питания подземных вод территории тоннеля является просачивание атмосферных осадков, то есть экзогенные подземные воды, которые попадают в горные породы, либо при процессах просачивания (инфильтрации поверхностных вод и конденсации водяного пара), либо в результате седиментации (осадконакопления). Минимальная часть воды этой зоны образуется за счёт процессов конденсации (конденсационные подземные воды) и сорбции (поглощение влаги частицами грунта) [47].

В настоящее время в тоннелях отмечается большое количество течей в виде потеков, струйного капежа и мокрых мест на поверхности бетонной отделки. Инфильтрация воды происходит в основном через вертикальные и горизонтальные рабочие швы (рисунок 3.10), трещины и сквозь отделку тоннелей (рисунок 3.11).



Рисунок 3.10 - Инфильтрация воды через горизонтальные рабочие швы тоннеля «Истиклол»

а)



б)



Рисунок.3.11 - Инфильтрация воды через трещины обделки тоннеля «Истиклол»

Тоннель имеет следующие гидрогеологические особенности:

- подземные воды не имеют четко выраженного режима движения;
- характер водопроявлений в значительной мере зависит от условий питания;
- зоны повышенной трещиноватости не имеют четко выраженных границ, т.к. зоны стратиграфических и литологических контактов пород часто совмещаются с тектоническими зонами. Отмечается чередование зон водопроницаемых пород с водонепроницаемыми, т.е. так называемая неупорядоченная трещиноватость;
- сосредоточенные выходы подземных вод по зонам разлома и рассеяние по остальной части тоннелей.

С целью предотвращения и снижения отрицательного влияния подземных вод был применен ряд способов гидроизоляции и водоотведения [14,48,49].

Каптажные скважины – используют для перехвата и отвода рассредоточенных выходов подземных вод, на участках, обводняющих значительные поверхности стен и свода тоннеля с неопределенным режимом движения этих вод в горном массиве и в трещиноватых породах, где водоприток также не упорядочен. Эти скважины представляют собой систему восходящих

дренажных каналов, расположенных над тоннелем и пробуренных со стороны вентиляционного тоннеля (ВТД) «Истиклол». Скважины пробурены веерами в плоскостях, параллельных оси тоннеля. Длина скважины – от 15 до 35 м, диаметр \varnothing 76 мм (рисунок 3.12).

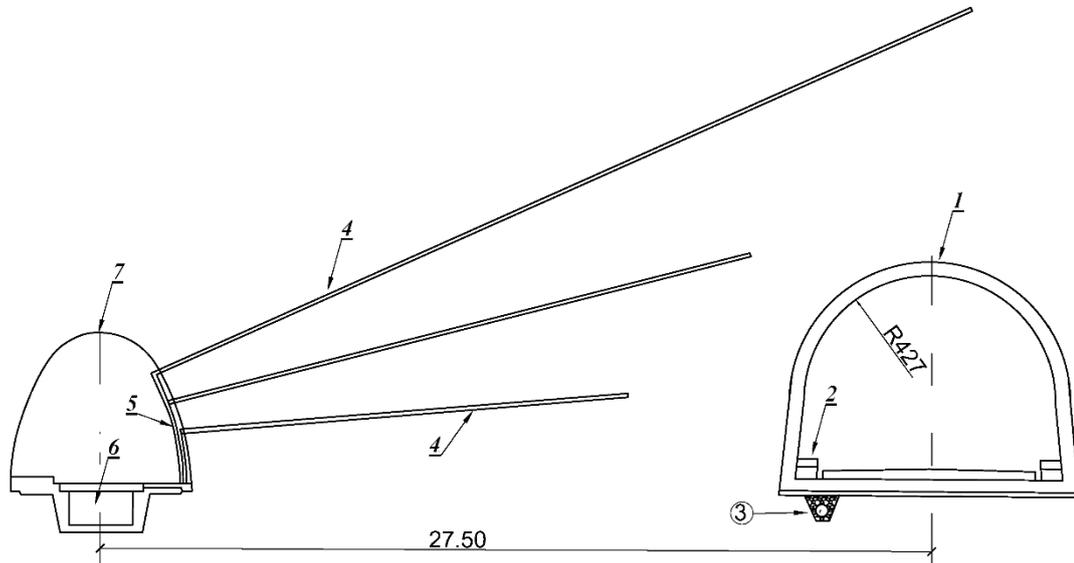


Рисунок 3.12 - Схема устройства каптажных скважин:

1 – транспортный тоннель; 2- пешеходный тротуар; 3- водоотводное дренажное устройство; 4 - водосборные скважины \varnothing 76мм; 5 – жёлоб; 6 - водосборный лоток; 7- вентиляционный тоннель

Для сбора и отвода поступающей из скважин воды система оборудована водосборным колодцем и выпуском из него в водоотводный лоток тоннеля.

Водоотводящие каналы – их устраивают в породах с высокой естественной влажностью для отвода воды в отдельных местных течах. Конструктивно они представляет собой перфорированные трубы ПВХ диаметром не менее 40 мм, установленные сквозь обделку. Один конец дренажной трубки находится с внешней стороны обделки в месте поступления течи, второй - выходит в лоток тоннеля (рисунок 3.13).

Утеплённые водоотводящие трубки каналов - устраивают в районах с суровым климатом, для этого их покрывают слоем теплоизоляции. Теплоизоляция канала состоит из листов пенополиуртана, пенополистирола, минеральной ваты, заключённые в защитный кожух из жести, стеклоткани или фольги стеклоткани

гидроизоляция так же выполняет функции антикоррозионного покрытия после очистки и оштукатуривания обделки (рисунок 3.15).

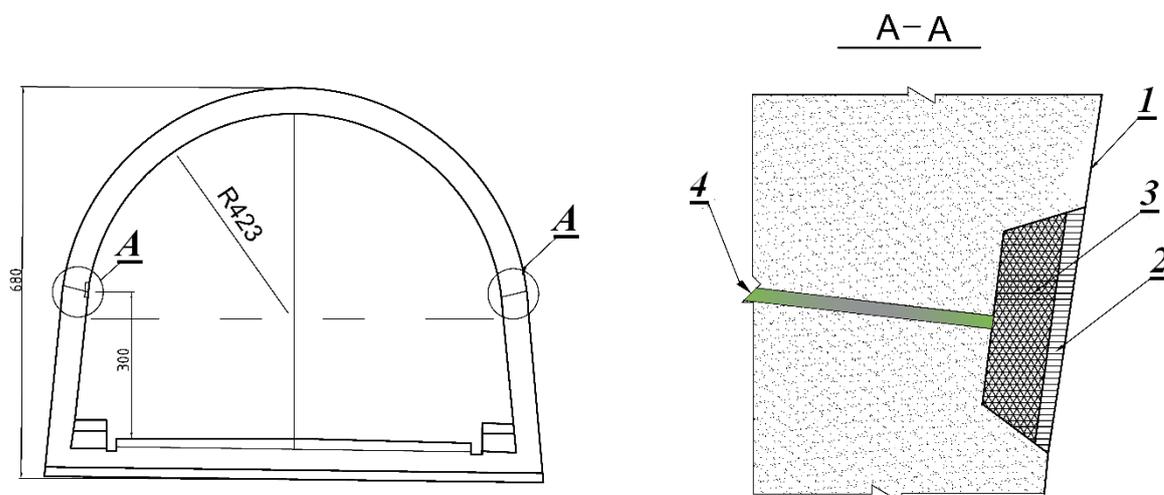


Рисунок 3.15 - Обработка деформационных и строительных швов или трещин гидроизоляционным раствором: 1 - стена тоннеля; 2- антикоррозионное покрытие (штукатурка); 3- водонепроницаемый раствор гидроизоляции; 4 - рабочий шов

Желоба (штрабы) - устраивают с внутренней стороны обделки на участках при сосредоточенном притоке подземных вод с большим гидростатическим давлением (рисунок 3.16). По длине тоннеля, в зависимости от трещиноватости и обводнённости пород, через 8 - 15 м оборудуют поперечные желоба. Из них в радиальном направлении пробуриваются скважины $\varnothing 76$ мм и глубиной до 6 м. Для охвата большого объёма водоносной породы скважины бурят под углом 60 и 120° к продольной оси тоннеля. Вода, поступающая в скважины, попадает в перфорированные трубы из ПВХ, расположенные в поперечных желобах обделки и прикрепленные хомутами к анкерам, заделанным в крепь. Из этих труб вода по оцинкованным листам поступает в водоотводный лоток.

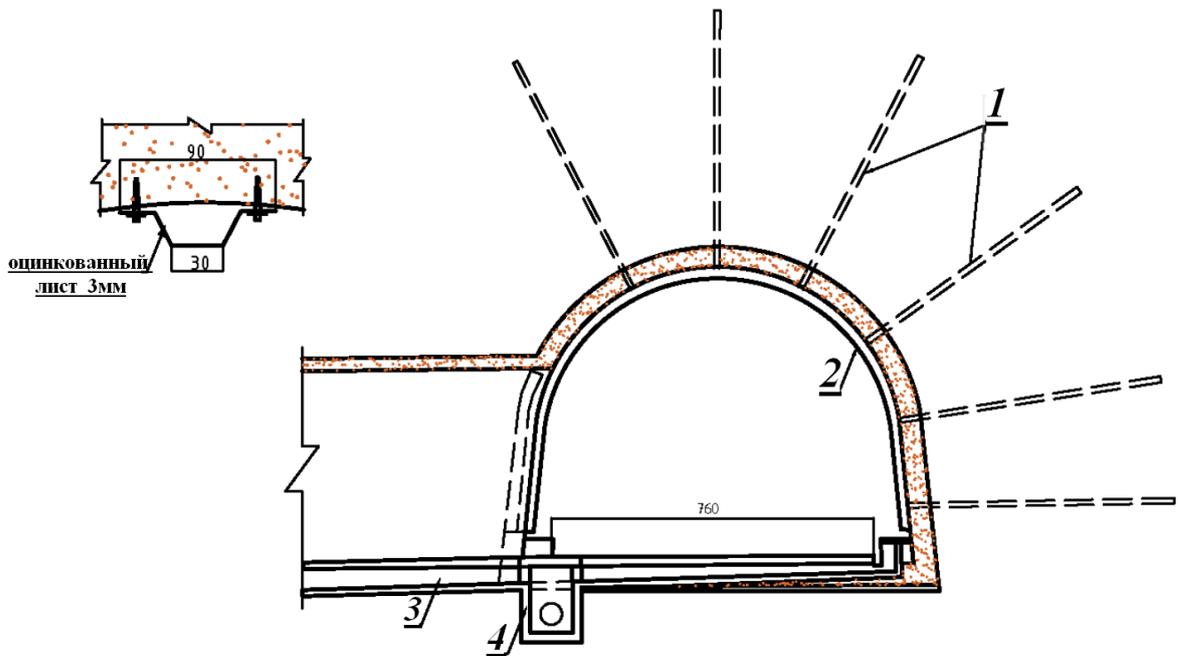


Рисунок 3.16 - Водоотведение инфильтрационных вод по желобам: 1 -шпуровой дренаж; 2 – желоб; 3 - водоотводный лоток до штольни; 4 - водосборный дренаж

В результате внедрения рассмотренных гидроизоляционных мер, инфильтрация воды в тоннели значительно уменьшилась. Однако, наблюдения, проведенные в 2017 году, показали, что на стенах тоннелях «Истиклол» и «Шахристан» отмечается большое количество течей в виде потеков, струйного капежа и мокрых мест. Инфильтрация воды происходит в основном через вертикальные и горизонтальные рабочие швы и, особенно, через деформационные швы.

Также возникают проблемы с использованием желобов, устанавливаемых с внутренней стороны обделки, для водоотведения инфильтрационных подземных вод с большим гидростатическим давлением.

Нерешенность инфильтрация воды в тоннель связана с погодными условиями местности расположения тоннеля, характеризующимися продолжительными временными периодами с отрицательной температурой воздуха.

Территория Анзобского перевала, где расположен тоннель «Истиклол», находится в зоне недостаточно влажного климата с умеренно теплым летом и умеренно мягкой зимой. Безморозный период продолжается, в среднем, 83 дня.

Средняя годовая температура составляет минус 1,8°C. Средняя температура самого холодного месяца января составляет минус 12,1°C, но при вторжениях больших холодных масс воздуха может понижаться до минус 24,3°C. В тоже время днем воздух в зимние месяцы в отдельные дни может прогреваться до +5°C. Средняя температура самого теплого месяца июля составляет всего +9,7°C. В отдельные дни она может опускаться в ночное время до минус 4-5°C, а абсолютный минимум в летнее время составил минус 10°C.

Такие метеорологические условия определяют образование наледей на поверхности мокрых стен и проезжей части тоннеля, а также замерзание воды в рабочих и деформационных швах.

Замерзшая вода разрушает бетонную обделку на контактах деформационных и рабочих швов и создает предаварийную ситуацию на транспортных путях тоннеля (рисунок 3.17).

а)



б)

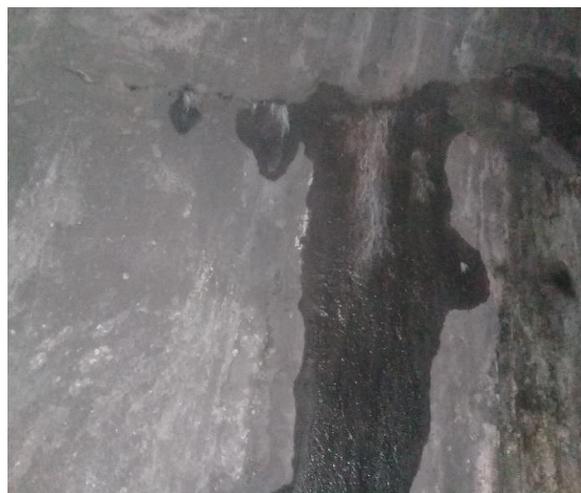


Рисунок 3.17 – Образование морозобойных трещин и наледей:
а – наледь-образование при инфильтрации воды через деформационные и рабочие швы,
б - инфильтрация воды через трещины тоннеля «Истиклол»

Известные способы борьбы с инфильтрацией воды из деформационных и рабочих швов предусматривают локализацию воды внутри швов или в породах за контуром обделки.

Для этого используются герметики, которыми заполняют швы [83-85] или ленты, наклеиваемые на обделку с полным перекрытием швов по их длине и ширине [85].

Данные материалы должны соответствовать следующим требованиям:

- быть непроницаемыми для воды;
- обладать эластичностью и достаточно высокой прочностью, чтобы восстанавливать свои первоначальные свойства при циклических изменениях температуры среды;
- не затвердевать до хрупкого состояния при отрицательных температурах и не размягчаться до неприемлемой консистенции при высоких положительных температурах;
- не оказывать неблагоприятного воздействия на материал обделки тоннеля;
- обладать значительным сроком службы и, при необходимости, обеспечивать возможность их замены.

В условиях положительных температур воздуха такие способы показывают высокую эффективность борьбы с инфильтрацией воды из швов.

При отрицательных температурах воздуха изолирующие материалы должны также обеспечивать не замерзание воды внутри швов, чтобы исключить её разрушающее воздействие на обделку тоннеля. Известные материалы не обладают всей суммой требуемых свойств.

С целью исключения замерзания поступающей в тоннель воды возможно проведение следующих работ: искусственное увеличение дебита воды, принудительный подогрев поступающей воды или конструктивное утепление швов.

Искусственное увеличение дебита воды до объёмов, исключаящее замерзание движущегося потока воды, предусматривает бурение дополнительных дренажных скважин, а также увеличение сечения дренажных водоотводящих лотков. При этом дренажные скважины необходимо располагать по деформационным и рабочим швам. В условиях действующего тоннеля работы по искусственному увеличению дебита воды провести технически сложно, а надёжность такой системы не гарантирует её работоспособность.

Для принудительного подогрева воды, поступающей в тоннели, используют подогреваемые желоба, обустройстваемые по всей длине швов [85]. В качестве подогревающего элемента обычно используется токопроводящий изолированный кабель или провод. Типичная конструкция подогреваемого желоба приведена на рисунке 3.18.

Очевидным недостатком таких конструкций является наличие электрических нагревательных кабелей (проводов). Экономичная эксплуатация подобной системы с подогревающими проводами потребует приобретение и установку дополнительных устройств – термодатчиков, блоков контроля и автоматического управления для изменения температуры провода по мере необходимости. Для обеспечения безопасной эксплуатации, предотвращения поражения током людей и возгораний необходим тщательный монтаж системы обогрева, а также установка автоматических устройств защиты от замыканий.

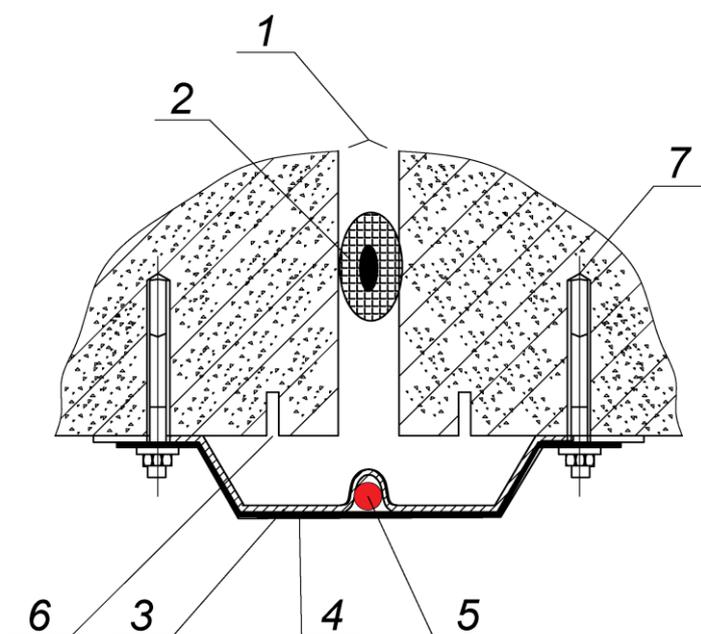


Рисунок 3.18 – Конструкция желоба в водоотводящих системах деформационных швов с подогревом воды: 1 – деформационный шов; 2 – эластичный наполнитель шва; 3 – гидроизоляционная лента; 4 – лист нержавеющей стали; 5 – элемент системы подогрева; 6 – капельник; 7 – болт анкерный

Система с принудительным подогревом воды сложна в техническом выполнении. Кроме того, надежность этого способа напрямую связана с бесперебойной подачей электроэнергии на подогревающие провода. При отключении электроэнергии в системе и замерзании воды в желобах, возможно

возникновение аварийной ситуации при эксплуатации тоннеля. Анализ практики применения системы нагрева желоба кабелем показал, что данный способ требует значительных затрат, однако не обеспечивает необходимой надежности работы.

Конструктивное утепление швов – наиболее простой, экономичный и надежный способ исключить замерзание воды в деформационных швах. Этот способ, в зависимости от давления воды в породах за контуром обделки, может обеспечить полную изоляцию воды в деформационных швах без её доступа в тоннель или перепуск воды в дренажную систему.

При этом конструкции таких утепляющих систем должны соответствовать требованиям, предъявляемым условиям по использованию герметиков и изоляционных лент.

Проведенный анализ состояния тоннелей показал, что они требуют разработки новых методов защиты от подземных вод, особенно в суровых климатических условиях высокогорья. Эти решения должны обеспечить эффективную защиту конструкции подземных сооружений, быть технологичны при возведении и долговечны в эксплуатации.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ ВОДОСБОРНЫХ СИСТЕМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

В настоящее время существует ряд методов сбора и отвода воды при инфильтрации её в тоннелях. Наиболее распространенным способом является установка водосборных желобов. Типы и размеры систем желобов из неопрена, стали, стекловолокна, гибкого или жёсткого поливинилхлорида (ПВХ), которые применяют в настоящее время, зависят от сложности их монтажа и объёма инфильтрационных вод. Большое внимание уделяется герметизации желоба путем механического сжатия его краёв, что предотвращает просачивание за пределы впадин [45,46].

Эта практика была использована в тоннелестроении, как сравнительно недорогой способ сбора воды, поступающей через обделку тоннеля. Вода по желобам и трубам поступает в существующую дренажную систему проезжей части для последующего вывода её за пределы тоннеля. Однако данный способ утилизации инфильтрационной воды имеет существенные недостатки при применении в суровых климатических условиях.

4.1 Водосборные системы в условиях отрицательных температур

Применение новых методов защиты подземных сооружений от подземных вод, в том числе в суровых климатических условиях позволяет успешно применять более эффективную технологию защиты и обеспечения долговечной работоспособности обделки этих сооружений. В этих условиях необходимо обеспечить снижение температуры внутренней поверхности стены тоннеля для обеспечения минимальной теплоотдачи подземных вод (теплопотери воды) при соприкосновении со стеной во время инфильтрации воды через деформационные

швы. При этом необходимо учитывать изменения параметров теплоизоляционного слоя, особенно ширину защитной зоны деформационных швов.

Для предотвращения образования морозобойных трещин и наледей разработана теплоизоляционная конструкция на основе различных материалов, с учетом климатических условий местности и назначения сооружения. Данная конструкция предназначена для предотвращения конденсации влаги на поверхности изоляции, замерзания воды внутри конструкции в течение всего холодного периода, сохранения температуры носителя в заданных пределах в соответствии с технологическими требованиями (рисунок 4.1).

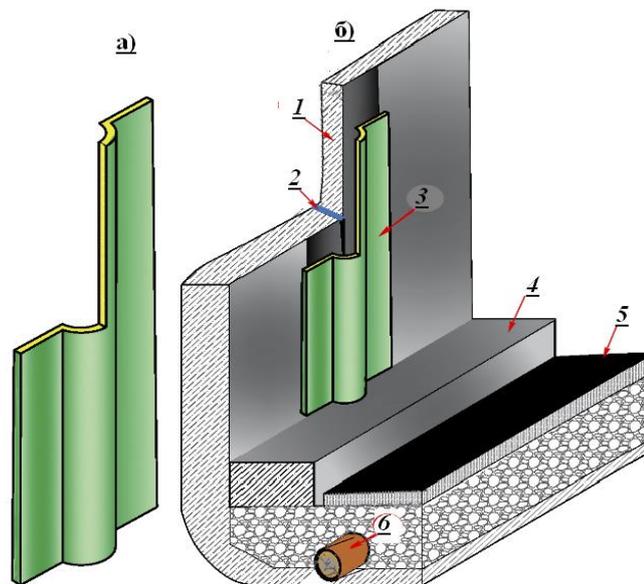


Рисунок 4.1 - Установка водосборной системы (желоб) на деформационных швах, А – теплоизолированный желоб, Б – установка желоба, где 1-стена тоннеля, 2-деформационный шов, 3-желоб, 4- пешеходный тротуар, 5- проезжая часть автомобилей, 6-дренажная труба

Водоотводящие каналы покрывают слоем теплоизоляции из пенополиуретана, пенополистирола или минеральной ваты и заключают в защитный кожух из жести, стеклоткани или фольги стеклоткани. Эта конструкция закрепляется к поверхности выработки в местах деформационных швов. В ряде случаев, на данные трубы не предусматривается теплоизоляция, например, при водоотведении на транспортном тоннеле «Истиклол».

На основе анализа условий образования морозобойных трещин и наледей разработана методика определения конструктивных размеров защитной зоны деформационных швов от промерзания (рисунок 4.2).

Как известно перенос тепла может происходить в результате непосредственной передачи энергии от частиц, обладающих большей энергией, к частицам с меньшей энергией. Большинство строительных материалов относятся к твердым телам. Поэтому при теплотехнических расчётах можно считать, что в них распространение тепла происходит только путем теплопроводности. Следовательно, можем воспользоваться законом Фурье [39], согласно которому плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры.

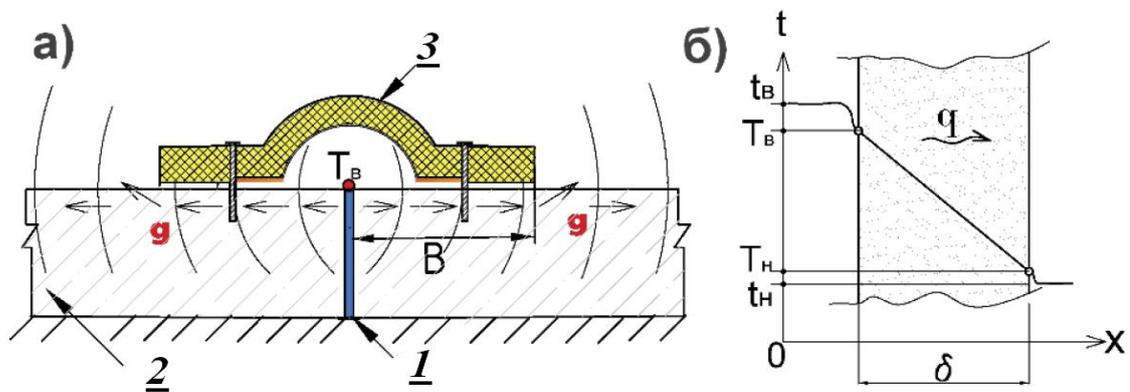


Рисунок 4.2 - Расчётная схема определения конструктивных размеров защитной зоны деформационных швов от промерзания а - схема теплоотдачи воды, протекающей через деформационных швов. 1-деформационный шов, 2-стена тоннеля, 3-теплоизолированный водосборный желоб, б- расчётная схема для определения величины B - ширины плеча защитной зоны деформационных швов от промерзания ($B=\delta$) при условии $T_B \geq 0^\circ\text{C}$., t_B и t_H - температуры внутреннего и наружного воздуха, T_B и T_H – температуры внутренней и наружной поверхности обделки

Для предотвращения замерзания воды внутри желоба в холодный период года температура внутреннего воздуха желоба (t_B) должен быть выше температуры воздуха внутри тоннеля (t_H), то есть между температурами внутренней и наружной поверхностей наружного ограждения имеет место $t_H < t_B > 0^\circ\text{C}$. В свою очередь, между температурами наружной поверхностей стены тоннеля и внутренней ограждающей желобом поверхность стены, должно выполняться требование, когда $T_H < T_B > 0^\circ\text{C}$. Поверхностные температуры,

отличающиеся от окружающих температур, приводят к условию возникновения конвекции вблизи данных поверхностей [40,41]. Температуру внутренней поверхности $T_B > 0^\circ\text{C}$, ограждающей конструкции желобом следует определять по формуле СНиП 2.04-03-2002 [42]:

$$T_B = t_B - \frac{n(t_B - t_H)}{R_0 \alpha_B}, ^\circ\text{C}, \quad (4.1)$$

где t_B - расчётная температура внутреннего воздуха, $^\circ\text{C}$, принимаемая согласно ГОСТ 12.1.005–88 и нормам проектирования соответствующих зданий и сооружений; n - коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху; t_H - расчётная зимняя температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; α_B - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций; R_0 - сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, определяется по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + R_K + \frac{1}{\alpha_H}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}, \quad (4.2)$$

где R_K - термическое сопротивление R , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, слоя многослойной ограждающей конструкции, а также однородной (однослойной) ограждающей конструкции следует определять по формуле [42-44]:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}, \quad (4.3)$$

где λ - расчётный коэффициент теплопроводности материала слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; δ - толщина стены, м.

Для предотвращения потери температуры среды до значений, приводящих к замерзанию воды, температуру внутренней поверхности стены следует принимать $T_B \geq 0^\circ\text{C} = \text{const}$. С учетом этого определяется ширина плеча защитной зоны деформационных швов от промерзания (B) по выражению, $B = \delta$:

$$B = \delta = \frac{\lambda n(t_B - t_H)}{\alpha_B(t_B - T_B)} - \frac{\lambda(\alpha_H + \alpha_B)}{\alpha_H \alpha_B}, \text{м}. \quad (4.4)$$

Применение теплоизоляционного слоя шириной равной ширине плеча защитной зоны деформационных швов, включая водоотводные желоба,

предотвращает не только промерзание, но и сохраняет начальную температуру инфильтрационной воды. Сам желоб образует на поверхности бетона высокопрочное покрытие, защищающее бетон и препятствующее вымыванию активных веществ, даже при значительном напоре воды, исключает образование наледей и морозобойных трещин.

4.2 Методика расчёта и параметров теплоизолированных водосборных желобов

Учитывая специфические климатические условия, опасность сейсмических воздействий, а также сложность рельефа разработана новая конструкция водоотводного лотка с теплоизоляцией и получен на неё патент [86]. Этот комбинированный вариант конструкции водосборной системы обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими системами водосборных устройств, обеспечивающих перехват инфильтрационных вод из деформационных швов тоннелей.

Теплоизолированный водоотводный лоток, выполненный в виде заключенного между гидроизоляционными пластинами блока с водоотводным руслом и бортиками (ширина плечи защитной зоны), отличающийся от ранее применяемых тем, что между гидроизоляционными пластинами размещен теплоизоляционный материал (рисунок 4.3).

Использование предлагаемого устройства позволяет снизить трудоемкость его установки и обслуживания за счёт упрощения конструкции.

Размещение между гидроизоляционными пластинами теплоизоляционного материала позволяет обеспечить в пространстве русла желоба температуру, исключая замерзание воды. Тем самым отпадает необходимость в наличии нагревательных элементов, что упрощает конструкцию устройства и снижает трудоемкость его обслуживания.

Расчёт по предлагаемым формулам толщины теплоизоляционного материала по руслу и бортикам, а также ширины бортиков, позволяет определить

толщину теплоизоляционного материала и размеры устройства, исключая замерзание воды в пространстве русла лотка. При этом учитываются температура внешней среды, температура поступающей воды, свойства теплоизоляционного материала и материала, на котором размещается устройство.

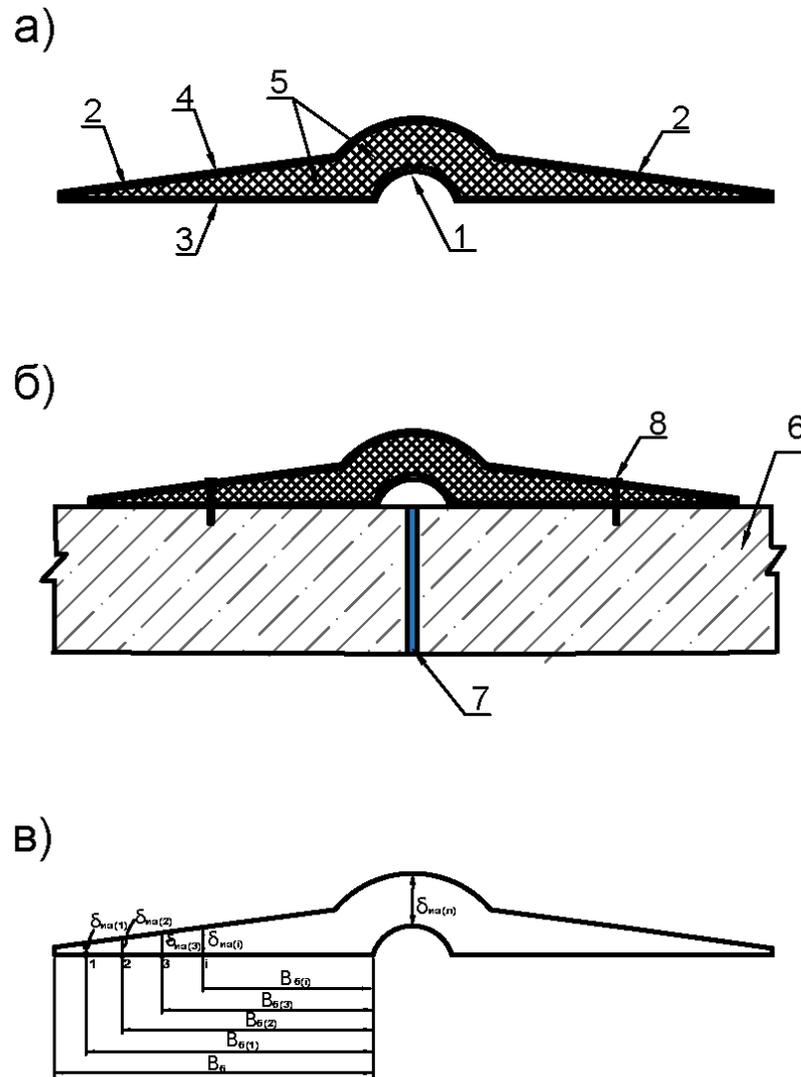


Рисунок 4.3 – Водосборный утеплённый желоб: а – общая конструкция; б - установка на поверхности; в - расчётная схема. 1 - водоотводное русло; 2 – бортики; 3 и 4 - внутренняя и внешняя гидроизоляционные пластины из листового железа; 5 - теплоизоляционный материал (пенополистерол); б – поверхность обделки; 7- деформационный шов; 8 – крепёжные дюбели

Толщина теплоизоляционного материала в месте водоотводного русла определяется по выражению:

$$\delta_{\text{из(л)}} = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{B_{\text{б}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \right) \cdot \lambda_{\text{из}}, \text{ м}; \quad (4.5)$$

а в месте бортика – по формуле:

$$\delta_{\text{из}(1)} = \left(\frac{B_6}{\lambda_{\text{ст}}} - \frac{B_{6(i)}}{\lambda_{\text{ст}}} \right) \cdot \lambda_{\text{из}}, \text{ м.} \quad (4.6)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала поверхности, на которой расположено устройство, Вт/(м °С); $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи материала поверхности внутри лотка, на которой расположено устройства, Вт/(м²·°С); $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности (вокруг устройства) ограждающей конструкции по положительным температурам, Вт/(м²·°С); $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала, Вт/(м²·°С); B_i – ширина плеча защитной зоны на i -ом участке, м; B – ширина плеча защитной зоны, м.

Монтаж водосборного утеплённого лотка осуществляется из отдельных готовых блоков, размещая их на стенке тоннеля вдоль деформационного шва, через который просачивается вода. Ширина русла лотка должна быть не менее ширины деформационного шва.

Длину отдельного блока водоотводного лотка принимают экспериментально, исходя из удобства изготовления, транспортирования и установки блоков.

Закрепление блока на стенке тоннеля ведётся с использованием пластиковых дюбелей, которые также будут препятствовать воздействию холода на материал стены тоннеля через крепежные элементы.

На сводчатой кровле тоннеля используют водоотводные лотки конфигурации, обеспечивающей плотное прилегание лотка к поверхности стены тоннеля по своду.

Контроль использования устройства сводится к визуальному наблюдению за целостностью внешней гидроизоляционной пластины лотка.

При соответствии объёма русла желоба и объёма поступающей воды обеспечивается размещение и свободное протекание воды по руслу.

Использование предлагаемой конструкции водоотводного лотка позволяет снизить трудоёмкость его монтажа и обслуживания за счёт упрощения конструкции.

4.3 Исследование параметров теплоизоляционного желоба

Определение параметров теплоизоляции защитной зоны деформационного шва тоннелей от промерзания рассмотрено для условия эксплуатации транспортного тоннеля «Истиклол» в холодный период. Для расчётов принята максимальная отрицательная температура наружного воздуха, зафиксированная в зимний период - $t_H = -25^\circ\text{C}$. Температура воздуха внутри тоннеля равна температуре инфильтрационной воды и составляет $t_6 = +4^\circ\text{C}$. Приняты следующие исходные данные: коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху $n = 1$, коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций $\alpha_B = 8,7$, расчётный коэффициент теплопроводности теплоизоляции $\lambda_{из} = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, расчётный коэффициент теплопроводности стены $\lambda_{жб} = 1,65 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции по летним условиям, $\alpha_H = 23 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ [101,102].

Для предотвращения потери температуры среды до значений, приводящих к замерзанию воды, температуру внутренней поверхности стены следует принимать $T_B \geq 0^\circ\text{C} = const$.

Ширина плеча защитной зоны деформационных швов (рисунок 4.3) от промерзания определяется по формуле:

$$B_6 = \frac{\lambda \cdot n \cdot (t_B - t_H)}{\alpha_B \cdot (t_B - T_B)} - \frac{\lambda \cdot (\alpha_H + \alpha_B)}{\alpha_H \cdot \alpha_B} = \frac{1,65 \cdot 1 \cdot (4 - (-25))}{6,75 \cdot (4 - 0)} - \frac{1,65 \cdot (23 + 6,75)}{23 \cdot 6,75} = 1,45 \text{ м.}$$

Проверяем температуру внутренней поверхности шва при найденной ширине плеча защитной зоны, при которой должно выполняться условие $T_B \geq 0^\circ\text{C}$.

$$T_B = t_B - \frac{n \cdot (t_B - t_H)}{\left(\frac{1}{\alpha_B} + \frac{B}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_H}\right) \cdot \alpha_B} = 4 - \frac{1 \cdot (4 - (-25))}{\left(\frac{1}{6,75} + \frac{1,456}{1,65} + \frac{1}{23}\right) \cdot 6,75} = 0,00^\circ\text{C} = 0^\circ\text{C}.$$

Условие соблюдается.

Далее определяются параметры теплоизоляции плеча защитной зоны деформационного шва.

Расчётное сопротивление теплопередачи защитной зоны деформационного шва

$$R_B = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{B}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_H} = \frac{1}{6,75} + \frac{1,456}{1,65} + \frac{1}{23} = 1,07, \text{ м}^2\text{C/Вт.}$$

Толщина теплоизоляции для лотковой части

$$\delta_{из(л)} = \left(\frac{1}{\alpha_B} + \frac{B}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_H} \right) \cdot \lambda_{из} = \left(\frac{1}{6,75} + \frac{1,456}{1,65} + \frac{1}{23} \right) \cdot 0,05 = 0,05 \text{ м.}$$

Толщину теплоизоляционного слоя при i – ом изменении ширины плеча (B_i) защитной зоны деформационного шва (рисунок 4.3)

$$\delta_{из(i)} = \left(\frac{B}{\lambda_{CT}} - \frac{B_{б(i)}}{\lambda_{CT}} \right) \cdot \lambda_{из}, \text{ м}$$

$$\delta_{из(1)} = \left(\frac{B}{\lambda_{CT}} - \frac{B_{б(1)}}{\lambda_{CT}} \right) \cdot \lambda_{из} = \left(\frac{1,456}{1,65} - \frac{1,248}{1,65} \right) \cdot 0,05 = 0,016 \text{ м}$$

Дальнейшие расчёты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расчёт изменения ширины защитной зоны в зависимости от толщины утеплителя

№ п/п	Ширина плеча защитной зоны, В, м	Ширина бортика в i -ом участке, V_i , м	Расчётный коэф. теплопроводности, $\lambda_{ст}$	Расчётный коэффициент теплопроводности теплоизоляции, $\lambda_{из}$	Толщина теплоизоляционного слоя при i – ом изменении ширины плеча защитной зоны деформационного шва, $\delta_{из(i)}$
0	1,456	1,456	1,65	0,05	0,010
1		1,248			0,016
2		1,040			0,022
3		0,832			0,028
4		0,624			0,034
5		0,416			0,041
6		0,208			0,047
7		0,000			0,054

На рисунке 4.4 приведена зависимость ширины защитной зоны от толщины утеплителя.

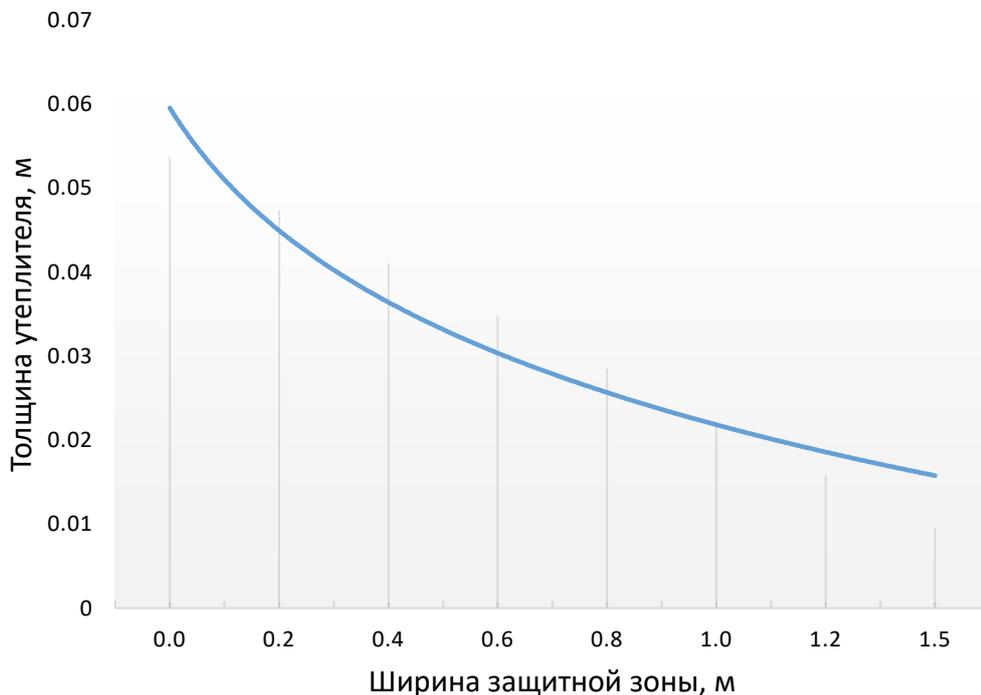


Рисунок 4.4 - Зависимости ширины защитной зоны от толщины утеплителя

Из графика видно, что толщина утеплителя прямо пропорциональна ширине защитной зоны шва в условиях тоннеля «Истиклол» и описывается зависимостью:

$$\delta_{из} = -0,021\ln(x) + 0,059 \quad (4.7)$$

Расчёт изменения температуры внутренней поверхности железобетонной обделки тоннелей в зависимости от её толщины приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Расчёт изменение температуры внутренней поверхности от толщины железобетонной обделки тоннелей

№ п/п п/п	Ширина плеча защитной зоны В, м	Ширина бортика в <i>i</i> -ом участке В _{<i>i</i>} , м	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности стены, α _н	Температура внутри шва, <i>t</i> _в , °С	Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности шва, α _в	Изменение температуры при <i>i</i> – ом изменении ширины плеча защитной зоны деформационного шва, Т _в , °С
0	1,456	1,456	23	4	6,75	0,00
1		1,248				-0,53
2		1,040				-1,23
3		0,832				-2,17
4		0,624				-3,54
5		0,416				-5,68
6		0,208				-9,52
7		0,000				-18,42

На рисунке 4.5 приведена зависимость температуры внутренней поверхности железобетонной обделки тоннелей от ширины защитной зоны.

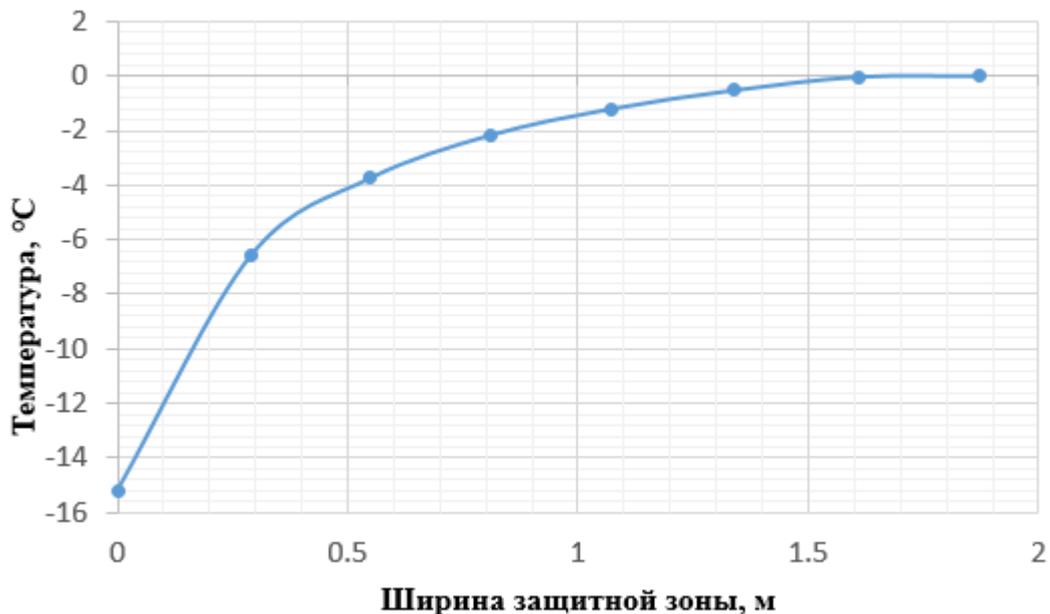


Рисунок 4.5 - Зависимость температуры внутренней поверхности железобетонной обделки тоннелей от ширины защитной зоны

Данный график показывает, что с ростом ширины защитной зоны температура поверхности железобетонной обделки тоннелей повышается. Эта зависимость определяется по формуле:

$$y = -6,98x^2 + 19,86x - 13,61 \quad (4.8)$$

Расчёт изменения толщины теплоизоляционного слоя при изменении коэффициента теплопроводности стены приведён в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчёт изменения толщины теплоизоляционного слоя при изменении коэффициента теплопроводности стены

№ п/п п/п	Ширина плеча защитной зоны, В, м	Ширина бортика в <i>i</i> -ом участке, В _{<i>i</i>} , м	Расчётный коэф. теплопроводности стены, λ _{ст}	Расчётный коэффициент теплопроводности теплоизоляции, λ _{из}	Толщина теплоизоляционного слоя при <i>i</i> – ом изменении ширины плеча защитной зоны деформационного шва, δ _{из(<i>i</i>)}
0	1,87	1,61	2,04	1,86	0,236
1			1,84		0,260
2			1,64		0,297
3			1,44		0,335
4			1,24		0,390
5			1,04		0,465
6			0,84		0,576
7			0,64		0,744

На рисунке 4.6 приведена зависимость толщины утеплителя от изменения коэффициента теплопроводности стены.

Изменение толщины теплоизоляционного слоя зависит от коэффициента теплопроводности стены и определяется по формуле:

$$y = -0,43\ln(x) + 0,51 \quad (4.9)$$

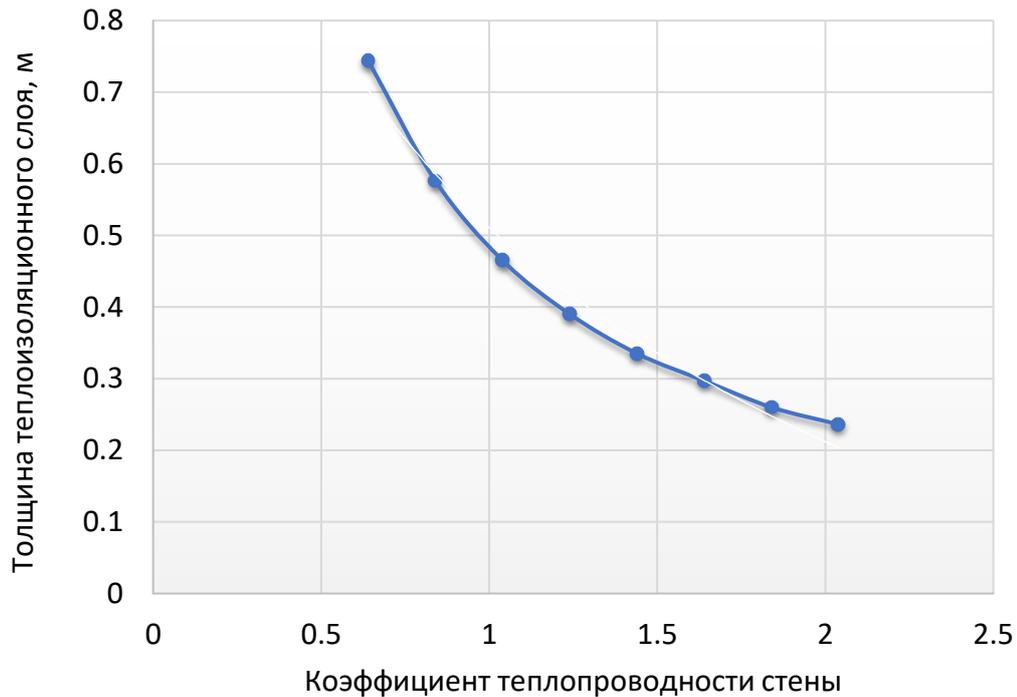


Рисунок 4.6 – Зависимость толщины утеплителя от коэффициента теплопроводности стены

Приведенные зависимости позволяют определить ширину защитной зоны, при которой в условиях отрицательных температур в тоннеле температура внутренней поверхности стены будет соответствовать условию $T_{в} \geq 0^{\circ}\text{C} = const$, т.е. поступающая вода не будет замерзать.

4.4 Методика расчёта утепления лотков при внутритуннельном водоотводе

Опыт эксплуатации тоннелей в районах с суровым климатом показывает, что, если своевременно не повышать эффективность мероприятий по борьбе с неблагоприятными влияниями подземных вод, трудности содержания тоннелей существенно возрастают. Основными мероприятиями для решения данной проблемы является снижение обводнённости и тепловая защита тоннеля.

Мероприятия, по снижению обводнённости эксплуатируемого тоннеля относятся к работам по капитальному ремонту и требуют правильного выбора способа осушения обделки тоннеля, которые включают [48]:

- отвод грунтовых вод от обделки тоннеля с помощью дренажных выработок и/или заполнение трещин и искусственное упрочнение окружающих тоннель грунтов тампонажными растворами;

- усиление водонепроницаемости обделки тоннеля посредством правильного подбора состава бетона обделки и растворов для нагнетания за обделку с применением специальных цементов и добавок, а так же устройства рулонной полимерной изоляции по первичной (временной) крепи из набрызгбетона или чернового бетона и устройство внутреннего торкрет-покрытия;

- организованный прием грунтовых вод внутрь тоннеля за счёт применения специальных устройств (дренажных поперечных прорезей в грунте за обделкой, дренажных камер и др.) на коротких участках тоннеля в сочетании с усилением водонепроницаемости обделки по всей длине тоннеля.

При организованном приеме грунтовые воды внутри тоннеля по перепускам стекают в дренажные лотки. В условиях отрицательных температур водоотводные лотки перепусков и тоннеля защищают от промерзания, а в перепусках устраивают утепленный тамбур. Практика эксплуатации тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» показала, что перемерзание дренажных и водоотводных устройств, приводит к образованию наледей на проезжей части дороги и повышает опасность передвижения транспортных средств.

Образование наледей существенно активизируется с началом перемерзания дренажных и водоотводных лотков. Большое значение для уменьшения наледобразования в тоннеле имеет своевременная очистка ото льда дренажных устройств или их утепление. Обычно для предотвращения образования наледей выходы заобделочных дренажей и водоотводных лотков утепляют, например, листами вспененным или экстрадированным пенополистеролом, а также используют электропрогрев.

В настоящее время для сохранения положительного температурного режима в дренажных системах строящихся тоннелях чаще предусматривают применение нагревательных элементов в виде греющих кабелей и лент. Как правило, кабель

укладывают по дну лотков и покрывают цементно-песчаной стяжкой с целью защиты их от механических повреждений. Однако данные конструкции защиты от воздействия отрицательных температур имеют сложные конструкции, и требует трудоемкого обслуживания, связанного с постоянным контролем их работоспособности.

Поэтому для упрощения конструкции защиты от промерзания водоотводных лотков и снижения трудоемкости их обслуживания предложены новые конструкции. Лотки покрыты теплоизоляционными материалами, размещенными между гидроизоляционными пластинами (рисунок 4.7). Применение данного способа защиты водоотводных лотков от промерзания позволяет повысить эффективность и обеспечить долговечность работоспособности конструкции подземных сооружений.

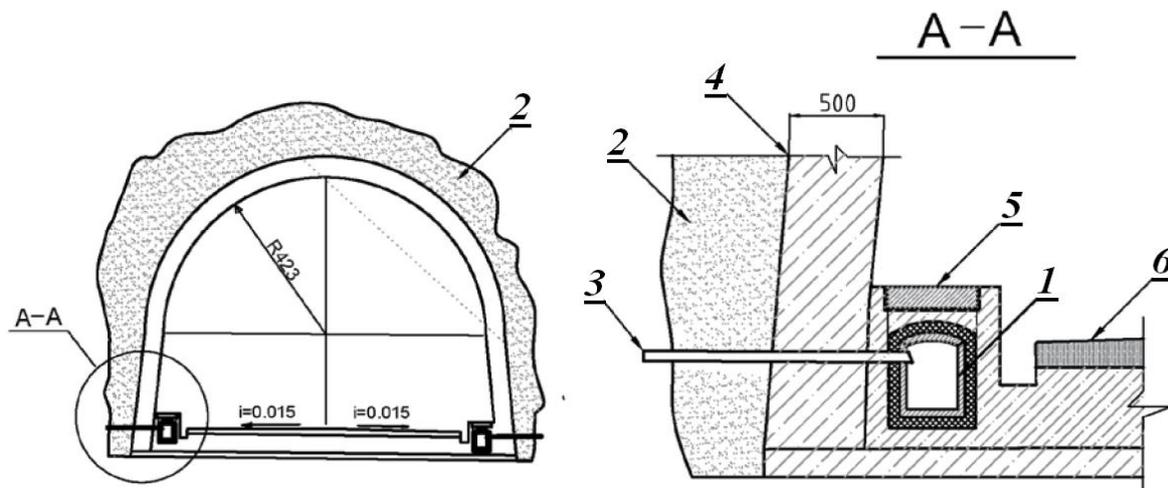


Рисунок 4.7 – Размещение водоотводных лотков под пешеходным тротуаром транспортного тоннеля «Истиклол». 1 – лоток; 2 – забутовочная порода; 3 – дренажная скважина; 4 – обделка тоннеля; 5- пешеходный тротуар; 6 - транспортная дорога.

При утеплении лотка необходимо обеспечить минимальное снижение температуры внутренней поверхности стены лотка для обеспечения минимальной теплоотдачи подземных вод (теплопотери воды) при их соприкосновении со стеной во время движения.

На рисунке 4.8 приведена расчётная схема определения толщины теплоизоляции. Как известно перенос тепла происходит в результате непосредственной передачи энергии от частиц, обладающих большей энергией, к

частицам с меньшей энергией. Большинство строительных материалов относятся к твердым телам. Поэтому при теплотехнических расчётах можно считать, что в них распространение тепла происходит только путем теплопроводности. Следовательно, можем воспользоваться законом Фурье [39], согласно которому плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры.

Конструкция лотка и плоская стенка состоит из разнородных слоев. На рисунке 4.8 показана трехслойная стенка водоотводного лотка с толщиной каждого слоя $\delta_1 \dots \delta_3$ и коэффициентом теплопроводности соответственно $\lambda_1 \dots \lambda_3$.

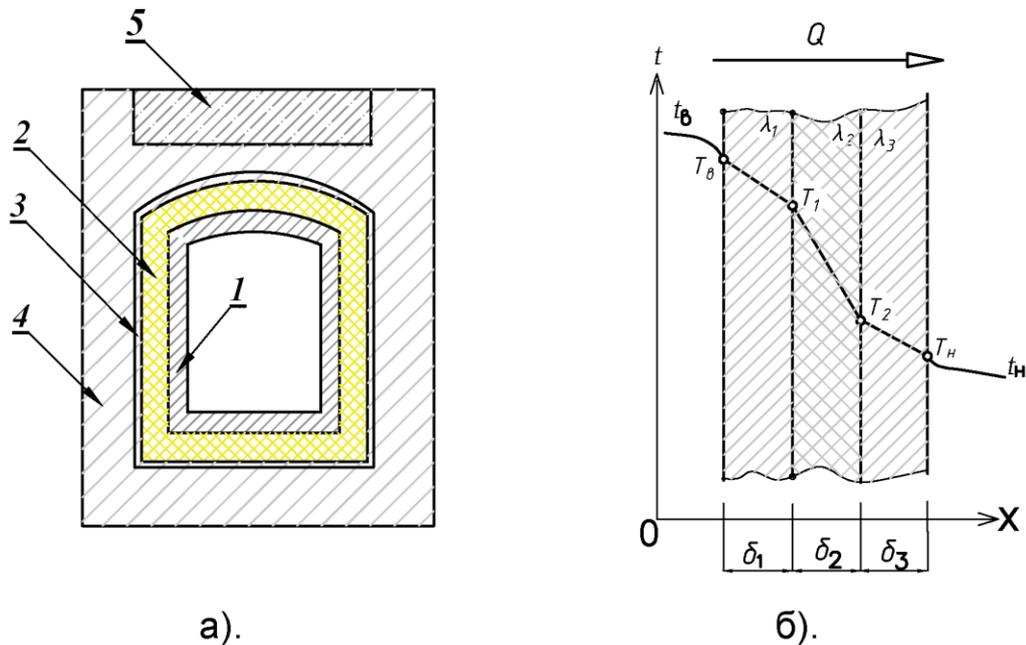


Рисунок 4.8 - Конструкция лотка (а) конструкция водоотводного лотка; (б) расчётная плоская многослойная стенка. 1- лоток; 2-теплоизоляция; 3-гидроизоляционная пластина; 4-плоская стенка; 5-лук

Располагаться теплоизоляционный слой должен внутри конструкции. Такое расположение материала обеспечивает его максимальную эффективность.

В качестве теплоизоляционного материала применяют жесткие и полужесткие минераловатные плиты, пенополистирол (литой и плитный), пенопласт (литой и плитный) и пенополиуретан.

Методика теплотехнического расчёта заключается в определении экономически целесообразного сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций R_0 следует принимать не менее требуемых значений $R_0^{тр}$, определяемых исходя из комфортных условий лотка по формуле (1) и условий энергосбережения по таблице 1а, б [101,102].

Требуемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, отвечающих комфортным условиям, определяем по формуле:

$$R_0^{тр} = \frac{n(t_b - t_n)}{\Delta t^H \cdot \alpha_b}, \quad (4.10)$$

где n - коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по таблице 3 [101,102]; t_b - расчётная температура внутреннего воздуха, °С, принимаемая согласно нормам проектирования лотка; t_n - расчётная зимняя температура наружного воздуха, °С, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки; Δt^H - нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции, принимаемый по таблице 2 [101,102]; α_b - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, принимаемый по таблице 4 [101,102].

Сопротивление теплопередаче R_0 , (м²·°С)/Вт ограждающей конструкции следует определять по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (4.11)$$

где α_b - то же, что в формуле (4.10); R_k - термическое сопротивление ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт, определяемое для многослойной по формуле 4.12; α_n - коэффициент теплоотдачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт принимается по таблице 6 [101,102].

Термическое сопротивление R_k , (м²·°С)/Вт ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями согласно (1) определяется как сумма термических сопротивлений отдельных слоев:

$$R_k = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{в.п.}, \quad (4.12)$$

где R_1, R_2, \dots, R_n - термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, определяемые по формуле 4.13; $R_{\text{в.п}}$ - термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки.

Термическое сопротивление R , $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, слоя многослойной конструкции, а также однородной (однослойной) ограждающей конструкции определяем по формуле:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (4.13)$$

где δ - толщина слоя, м; λ -расчётный коэффициент теплопроводности материала слоя, с учетом условий эксплуатации ограждающих конструкций, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$.

Так как толщины наружной δ_1 и внутренней δ_3 конструкции лотка известны, то толщина теплоизоляции δ_2 будет равна:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_k + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}. \quad (4.14)$$

Отсюда

$$\delta_2 = \lambda_2 \cdot \left(R_0 - \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} - \frac{\delta_3}{\lambda_3} - \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \right). \quad (4.15)$$

Для последующих расчётов следует применять максимальное значение из R_0 , $R_0^{\text{тр}}$ и $R_0^{\text{пр}}$.

Для уточнения работоспособной толщины утеплителя, обеспечивающей необходимую температуру для безопасного водоотвода в лотке, определяется температура внутренней поверхности лотка по формуле:

$$T_{\text{в}} = t_{\text{в}} - k \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot R_{\alpha_{\text{в}}}, \quad \text{°C} \quad (4.16)$$

где k - коэффициент теплопередачи, характеризующий интенсивность процесса теплопередачи через плоские системы, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}, \quad (4.17)$$

где $R_{\alpha_{\text{в}}}$ - термическое сопротивление теплоотдачи плоской стенки:

$$R_{\alpha_{\text{в}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}, \quad (4.18)$$

Результат расчёта температуры внутренней поверхности лотка должен составлять $T_{в} \geq 0$ °С.

Обеспечение комфортных условий эксплуатации лотка означает то, что принятая конструкция ограждений должна обеспечить необходимую температуру для предотвращения замерзаний воды в лотке.

4.5 Электронагревающий водоотводной лоток

Учитывая специфические климатические условия была разработана новая конструкция водоотводного лотка, снабженного электрическим нагревательным кабелем и оснащенного корытообразным теплоотражающим элементом. На данную конструкцию лотка получен Патент РФ на изобретение [103].

Этот комбинированный вариант конструкции водосборной системы обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими системами водосборных устройств, обеспечивающих перехват инфильтрационных вод из деформационных швов тоннелей.

Водоотводной лоток выполнен в виде заключенного между гидроизоляционными пластинами блока с водоотводным руслом и бортиками и снабженного электрическим нагревательным кабелем, кроме того, лоток дополнительно оснащен корытообразным теплоотражающим элементом, выполненным в виде желоба с сечением параболы и закрепленным внутри лотка по его оси и по всей его длине, а нагревательный кабель расположен по центру на расстоянии половины высоты желоба.

Оснащение лотка корытообразным теплоотражающим элементом, выполненным в виде желоба с сечением параболы, обеспечивает концентрацию теплового луча от нагревательного кабеля по ширине поступающего в лоток потока воды.

Нагревательный кабель, расположенный по центру на расстоянии половины высоты желоба способствует свободному сбору тепловых лучей противоположного сечения кабеля от деформационного шва направляющую в

сторону протока воды (рисунок 4.9). На рисунке 4.10 приведена схема работы устройства отражателя тепла.

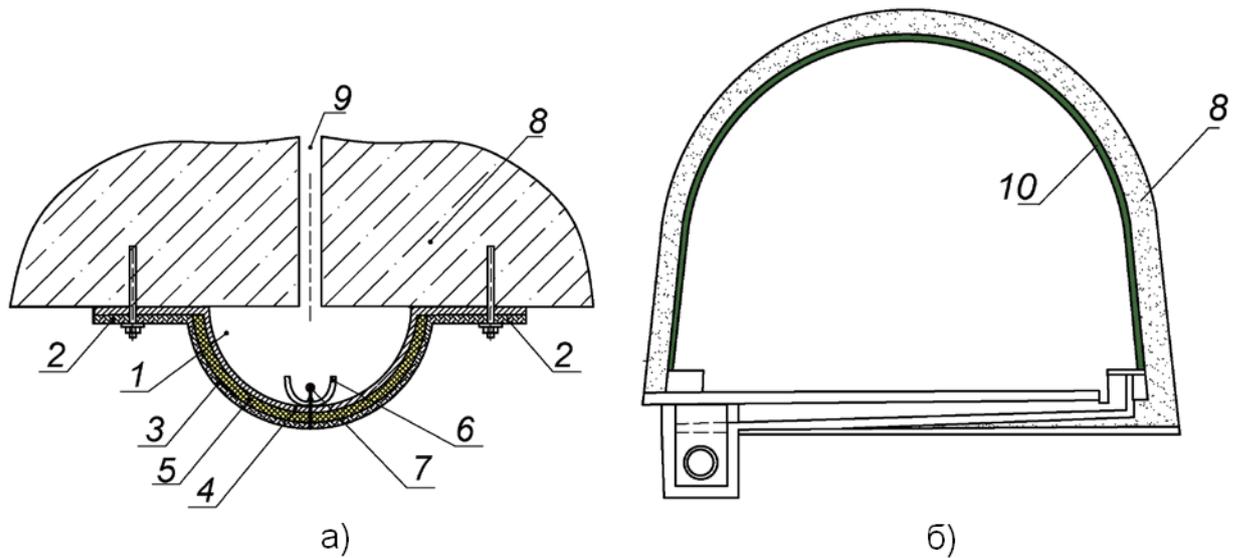


Рисунок 4.9 – Водоотводной лоток с электронагревателем, а) – вид устройства водоотводного лотка с теплоотражателем в разрезе, б) – положение устройства на стенке тоннеля. 1 - водоотводное русло; 2 – бортики; 3 – внутренняя и 4 - внешняя гидроизоляционные пластины; 5 - теплоизоляционный материал; 6 -отражающий элемент; 7 - нагревательный кабель; 8 – стенка (обделка) тоннеля; 9 - деформационный шов; 10 - блок лотка.

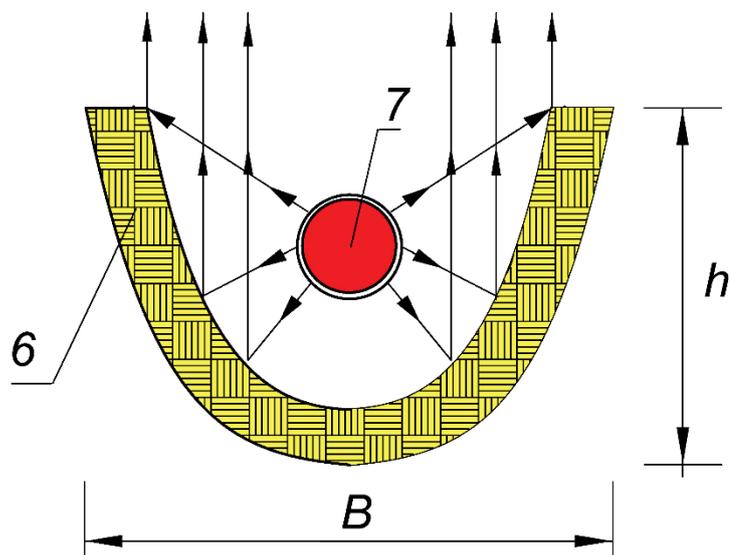


Рисунок 4.10 – Схема работы устройства отражателя тепла

Ширина теплоотражателя должна быть не менее или равна ширине деформационного шва. Теплоотражатель и нагревательный кабель укладывают прямо в центр обогреваемого участка шва по всей длине лотка.

Длину отдельного блока водоотводного лотка принимают экспериментально, исходя из удобства изготовления, транспортирования и установки блоков. На сводчатой кровле тоннеля используют водоотводные лотки конфигурации, обеспечивающей плотное прилегание лотка к поверхности стены тоннеля по своду.

Контроль использования устройства сводится к визуальному наблюдению за целостностью теплоотражателя и нагревательного кабеля лотка.

Использование предлагаемого устройства позволяет обеспечить повышение эффективности работы лотка за счёт концентрации теплового луча от нагревательного кабеля по всей ширине поступающего в лоток потока воды.

5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТОННЕЛЯХ «ИСТИКЛОЛ» И «ШАХРИСТАН» РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Расчёт экономической эффективности предлагаемой системы водоотведения по предотвращению наледей-образования путем теплоизоляции защитных зон и лотков транспортного тоннеля в условиях высокогорья проведён на примере транспортного тоннеля «Истиклол». Определены стоимости работ по уборке льда и по обустройству лотков.

Уборка льда выполняется вручную, с помощью лопаты, а разбивка – специальными кирками. В транспортном тоннеле «Истиклол» очистка территорий часто является обязательным мероприятием, которое регламентируется специальными технологическими планами. Своевременная уборка гарантирует безопасность передвижения пешеходов и транспорта, обеспечивает свободный доступ ко всем зданиям и другим объектам, находящимся рядом. Это наиболее дешёвый, но медленный и трудоемкий процесс.

Таким образом, при оценке экономической эффективности результатов исследования было выполнено сравнение затрат, определённых по единичным расценкам на строительно-восстановительные работы РТ [97-100] и соответствующим государственным элементным сметным нормам (ГЭСН). Затраты на очистку тоннеля ото льда, отгрузку и отведение за пределы тоннеля были предоставлены планово-экономическими отделами министерства транспорта РТ (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Локальный ресурсный сметный расчёт уборки льда

№ п/п пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, сомони	
				на ед.	всего	на единицу измерения	общая
	2	3	4	5	6	7	8
1	ЭСН1-192-4 (к-1,55-на ОЗП)	Разработка льда вручную	100 м3		0,05		
		Затраты труда рабочих (ср 3)	чел.час	551,8	27,59	10,01	276,2
2	ЭСН1-195-4 (к-1,55-на ОЗП)	Погрузка льда вручную в транспортные средства	100 м3		0,05		
		Затраты труда рабочих (ср 1,5)	чел.час	156,457	7,82285	8,77	68,6
3	СССЦ№ п/п1	Вывоз льда на 1 км	тн		5	1,32	6,6
		в том числе заработная плата				345	
	РДС РТ 81- 217-2011	Накладные расходы	66%				228
	РДС РТ 81- 217-2011	Сметная прибыль	70%				241
		ФСЗН от Фот	25%				86
		ВСЕГО по смете					906

Основание:

Сметная стоимость – 0,906 тыс.сомони.

Средства на оплату труда – 0,345 тыс.сомони.

Сметная трудоёмкость – 35,41 чел.ч.

Локально-ресурсная смета составлена в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 1-й квартал 2019г.

На основе предоставленных данных по проведению ремонтно-восстановительных работ на транспортных тоннелях «Истиклол» и «Шахристан», а также по действующим сметным нормам на строительные-монтажные работы Республики Таджикистан были рассчитаны затраты на монтаж теплоизоляционных водоотводных лотков (таблица 5.2 и 5.3).

Таблица 5.2 – Устройство водоотводного лотка в условиях тоннеля «Истиклол»

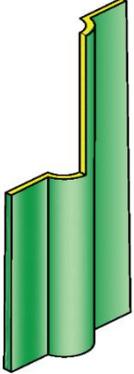
№ п/п п/п	Устройство сборного водоотводного лотка		
1	Площадь сечения лотка	$S = 0,17 \text{ м}^2$	
2	Высота лотка	$H = 1,5 \text{ м}$	
3	Диаметр русла лотка	$D = 350 \text{ мм}$	
4	Стальной лист для русла лотка с бортами <i>hхв, м</i>	$1,5 \times 0,95 \text{ м}$	
5	Стальной лист огнезащитного покрытия <i>hхв, м</i>	$1,5 \times 2,8$	
6	Количество лотков для одного шва длиной 18 м	$N = 12 \text{ шт.}$	
7	Ширина защитной зоны	$B = 2,9 \text{ м}$	
8	Радиус полуцилиндра лотка	$R_1 = 0,175 \text{ м}$	
9	Наружный радиус полуцилиндра	$R_1 + \delta_{\text{из}} = 0,23 \text{ м}$	
10	Объем теплоизоляции	$V = 0,255 \text{ м}^3$	
11	Толщина стали водоотводного русла	$\Delta = 4 \text{ мм}$	
12	Толщина огнезащитной стали покрытия	$\Delta = 2 \text{ мм}$	

Таблица 5.3 – Локальный ресурсный сметный на изготовление и монтаж теплоизоляционных водоотводных лотков

№ п/п пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, сомони	
				на ед.	всего	на единицу измерения	общая
	2	3	4	5	6	7	8
1	ЭСНм38-6-1	Изготовление водоотводного лотка L-1.5 м	1 т		0,110		
		Затраты труда рабочих (ср 3,8)	чел.ч	161	17,67	11,03	194,90
		Затраты труда машинистов	чел.ч	11,6	1,27	15,14	19,27
	1. 021102	Краны на автомобильном ходу 10 т	маш.ч	8,1	0,89	151,96	135,09
	2. 040300	Автоматы сварочные с номинальным сварочным током 450-1250 А	маш.ч	61	6,69	33,48	224,14
	3. 040504	Аппараты для газовой сварки и резки	маш.ч	1,8	0,20	1,82	0,36
	4. 330206	Дрели электрические	маш.ч	0,2	0,02	1,83	0,04
	5. 330301	Машины шлифовальные электрические	маш.ч	0,3	0,03	2,32	0,08
	6. 330500	Машины листогибочные специальные (валцы)	маш.ч	1,4	0,15	11,6	1,78
	7. 330900	Ножницы листовые	маш.ч	2,1	0,23	40,77	9,40

		кривошипные (гильотиновые)					
	9. 400002	Автомобили бортовые грузоподъемностью до 8 т	маш.ч	0,5	0,05	74,78	4,10
	10. 101- 0324	Кислород технический газообразный	м ³	1,1	0,12	7,9	0,95
	11. 101- 1515	Электроды диаметром 4 мм Э46	т	0,043 8	0,00	15000	72,11
	12. 542- 0042	Пропан-бутан, смесь техническая	кг	0,3	0,03	7,9	0,26
		Лист металлический толщиной 2 мм	т	п	0,065	9420	612,30
		Лист металлический толщиной 4 мм	т	п	0,045	9420	421,55
		в том числе заработная плата				214	
	РДС РТ 81-217- 2011	Накладные расходы	66%				141
	РДС РТ 81-217- 2011	Сметная прибыль	70%				150
		ФСЗН от Фот	25%				54
2	ЭСН26- 22-2	Изоляция водоотводного лотка из минеральная вата	1 м ³		0,17		
		Затраты труда рабочих (ср 3,1)	чел.ч	22	3,740	10,11	37,81
		Затраты труда машинистов	чел.ч	0,4	0,068	15,14	1,03
	1. 332101	Установки для изготовления бандажей, диафрагм, пряжек	маш.ч	0,59	0,100	2,1	0,21
	2. 400001	Автомобили бортовые грузоподъемностью до 5 т	маш.ч	0,4	0,068	59,22	4,03
	3. 104- 9167	Изделия теплоизоляционные из минеральная вата	м ³	1,05	0,179	370	66,05
	4. 113- 0304	Клей резиновый № п/п 88-Н	кг	12,7	2,159	46	99,31
		в том числе заработная плата				39	
	РДС РТ 81-217- 2011	Накладные расходы	100%				39
	РДС РТ 81-217-	Сметная прибыль	70%				27

	2011						
		ФСЗН от Фот	25%				10
3	ЭСН8-3-7 (к-1,55-на ОЗП)	Гидроизоляция обмазочная битумная в 2 слоя	100 м ²		0,011 3		
		Затраты труда рабочих (ср 3,9)	чел.ч	32,86	0,371	11,15	4,14
		Затраты труда машинистов	чел.ч	0,31	0,004	15,14	0,05
	1. 121011	Котлы битумные передвижные 400 л	маш.ч	1,95	0,022	22,66	0,50
	2. 400001	Автомобили бортовые грузоподъемностью до 5 т	маш.ч	0,2	0,002	59,22	0,13
	3. 101- 0073	Битумы нефтяные строительные марки БН-90/10	т	0,016	0,000	6000	1,08
	4. 101- 0322	Керосин для технических целей марок КТ-1, КТ-2	т	0,024	0,000	8800	2,39
	5. 101- 0594	Мастика битумная кровельная горячая	т	0,24	0,003	7000	18,98
	6. 101- 1757	Ветошь	кг	0,1	0,001	9	0,01

4	ЭСН9- 56-2 (к-1,55- на ОЗП)	Монтаж водоотводного лотка L-1.5 м	1 т		0,110		
		Затраты труда рабочих (ср 3)	чел.ч	78,72 45	8,640	10,01	86,49
		Затраты труда машинистов	чел.ч	0,480 5	0,053	15,14	0,80
	1. 021141	Краны на автомобильном ходу 10 т	маш.ч	0,12	0,013	145,42	1,92
	2. 030404	Лебедки электрические, тяговым усилием до 31,39 (3,2) кН (т)	маш.ч	10,53	1,156	8,25	9,53
	3. 040504	Аппараты для газовой сварки и резки	маш.ч	1,86	0,204	1,82	0,37
	4. 041000	Преобразователи сварочные с номинальным сварочным током 315-500 А	маш.ч	2,03	0,223	9,35	2,08
	5. 041400	Печи электрические для сушки сварочных материалов с	маш.ч	0,14	0,015	6,5	0,10

		регулируем температурой в пределах 80-500 гр. С					
6.	330301	Машины шлифовальные электрические	маш.ч	0,41	0,045	2,32	0,10
7.	400001	Автомобили бортовые грузоподъемностью до 5 т	маш.ч	0,19	0,021	59,22	1,23
8.	101-0324	Кислород технический газообразный	м ³	1,5	0,165	7,9	1,30
9.	101-1515	Электроды диаметром 4 мм Э46	т	0,0014	0,000	15000	2,30
10.	101-9412	Шлифкруги	шт.	0,1	0,011	6	0,07
11.	113-0021	Грунтовка ГФ-021 красно-коричневая	т	0,00031	0,000	24140	0,82
12.	113-0156	Растворитель марки Р-4	т	0,0006	0,000	15000	0,99
13.	542-0042	Пропан-бутан, смесь техническая	кг	0,45	0,049	7,9	0,39
		в том числе заработная плата				87	
РДС РТ 81-217-2011		Накладные расходы	108%				94
РДС РТ 81-217-2011		Сметная прибыль	95%				83
		ФСЗН от Фот	25%				22
		Итого по смете:					2685
		НДС	18%				483
		ВСЕГО по смете 1 шт водоотводного лотка					3168
		ВСЕГО по всему периметру одного деформационного шва (12шт водоотводного лотка)					38014

Основание:

Сметная стоимость – 42,33 тыс.сомони.

Средства на оплату труда – 2,743 тыс.сомони.

Сметная трудоёмкость – 254,99 чел.ч.

Трудозатраты механизаторов – 12,51 чел.ч.

Локально-ресурсная смета составлена в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 1-й квартал 2019г.

Согласно существующим ЕР РТ и ГЭСН стоимость выполняемых работ по разделке и уборке льда из тоннеля за сутки составляет 906 сомони на 5,0 м³ льда (6400 руб.).

Учитывая, что продолжительность периода отрицательных температур составляет в среднем 90 суток затраты на борьбу с обледенением соответственно составят 81,54 (576,0 тыс. руб.) тыс. сомони на 1,0 км тоннеля.

По длине тоннеля число деформационных швов составляет 1 шт. на 1 км. Изготовление и монтаж водоотводного лотка по периметру одного деформационного (рабочего) шва по локально-ресурсным сметам по текущим (прогноznым) ценам первого квартала 2019 г. составляет 42,33 тыс. сомони (298,0 тыс. руб.).

Технико-экономическое сравнение существующего положения в действующем тоннеле «Истиклол» и применения предлагаемой конструкции водоотводного лотка показало, что происходит уменьшения затрат по содержанию на 39,21 тыс. сомони (278,0 тыс. руб.) на 1,0 км тоннеля.

Из всего вышеизложенного следует, что использование утеплённых лотков для водоотведения при строительстве и эксплуатации тоннелей, расположенных в условиях высокогорья позволит снизить затраты на их содержание, а так же повысить безопасность и работоспособность подземных транспортных сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся самостоятельной законченной квалификационной работой, дано решение актуальной научно-технической задачи - обоснования параметров геотехнологии строительства капитальных горных выработок в суровых климатических условиях высокогорья, имеющих важное значение при эксплуатации транспортных тоннелей Республики Таджикистан.

Основные выводы, научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Обоснованы отличительные признаки и выполнена систематизация горно-геологических, технологических и климатических факторов, влияющих на работоспособность тоннелей, расположенных в условиях высокогорья.

2. Разработан новый подход к оценке горно-геологических, технологических и климатических факторов, с последующим количественным учётом и прогнозированием их влияния на подземное сооружение и, вследствие этого, повышения качества принимаемых технических и технологических решений, как на стадии проектирования, так и непосредственно при строительстве и эксплуатации тоннелей в сложных условиях высокогорья.

3. Проведенными опытно-промышленными исследованиями выявлены причины возникновения и развития дефектов обделки во времени в тоннелях, расположенных в сложных условиях высокогорья.

4. Путём математического моделирования получены аналитические зависимости параметров, утеплённых водоулавливающих и водоотводных лотков, основанные на учёте коэффициента теплопроводности применяемого материала и температуры внутренней поверхности обделки тоннелей;

5. Разработаны способы предотвращения образования морозобойных трещин и наледей в тоннелях на основе использования новых конструкций теплоизолированных водоулавливающих и водоотводных лотков (патент РФ № п/п 185730 от 20.04.2018 г. «Водоотводный лоток» и положительное решение на

выдачу патента РФ от 05.03.2019 г. «Водоотводный лоток транспортных тоннелей»).

6. Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается представленным объёмом исследований, выполненных на основе научных трудов и результатов инженерных изысканий, проведенных в районе исследования, а также подтверждённой принятой методологической базой, основанной на фундаментальных и достоверно изученных положениях. В основу диссертации положены результаты, полученные в рамках полевых и научно-практических исследований о влиянии факторов на безопасность, бесперебойность и устойчивость транспортных тоннелей «Истиклол» и «Шахристан» при эксплуатации.

7. Результаты выполненных исследований могут быть использованы в практике научно-исследовательских и проектных организаций при выборе и обосновании технологических схем строительства тоннелей, контроля их технического состояния и принятия оперативных решений для предотвращения и ликвидации аварийных ситуаций, а также в качестве методического обеспечения при организации учебного процесса по подготовке горных инженеров специализации «Шахтное и подземное строительство».

8. Ожидаемый расчётный экономический эффект от внедрения результатов исследований на транспортном тоннеле «Истиклол» для периода эксплуатации в условиях отрицательных температур высокогорья оценивается в 39,21 тыс. сомони (278,0 тыс. руб.) на 1,0 км тоннеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. - М.: УРАН ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2009.- 68 с.
2. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. при участии А. Э. Куплиса, В. Ф. Сарабеева, В. В. Торгалова. «Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов» // - 2-ое изд. доп. - М.: ТИМР, 2000.
3. Шамелис И. М. «Тоннели и их восстановление», Часть II. - Л.: РТА, 1956
4. Дорман, И.Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. - М.: ТИМП, 2000. 307с 2-е доп. и перераб. Изд.
5. Asakura T., Tsukada K., Matsunaga T., Matsuoka S., Yashiro K., Shiba Y., and Oya T. Damage to mountain tunnels by earthquake and its mechanism. Proceedings of JSCE (Japan Society of Civil Engineers) 659, 2000, p. 27-38.
6. Kontogianni V., Stiros S. Earthquakes and Seismic Faulting - Effects on Tunnels, Turkish Journal on Earth Sciences, Vol. 12, 2003, pp. 153-156.
7. Lanzano G., Bilotta E., Russo G. Tunnels under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods. Strategy for Reduction of the Seismic Risk (Fabbrocino & Santucci de Magistris eds.). 2008. pp 65-74. ISBN 88-88102-15-3.
8. Wang W.L., Wang T.T., Su J.J., Lin C.H., Seng C.R., Huang T.H. Assesment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake, Tunneling and Underground Space Technology, 16, 2001, p.133-150.
9. Zheng Shengbao, Jiang Shuping, Wang Xiaowen, Lin Zhi. The Theory Research of Tunnels Seismic Damage. Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice, AISC 162, pp. 1-11.
10. Z.Z. Wang, Z. Zhang. Seismic damage classification and risk assessment of

mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45, 2013, p. 45-55.

11. Zhang J., Mei Z., Quan X. Failure Characteristics and Influencing Factors of Highway Tunnel Damage due to Earthquakes. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 18, 2013, p. 973-986.

12. Национальный план действий Республики Таджикистан по смягчению последствий изменение климата. Под ред. Махмадалиева Б. У., Новикова В. В., Каюмова А. К. и др. Душанбе, 2003. – 264 с.

13. Турснoв А. А. Управление работоспособностью автомобилей в горных условиях эксплуатации: Дис... докт. тех. наук, Душанбе, 2003. – 356 с.

14. С. А. Компаниец, А. К. Поправко, А. А. Богородецкй. Проектирование тоннелей. Москва 1973 стр

15. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I-C.. Seismic design and analysis of underground structure. *Tunn. Undergr. Sp.Technol.* 16, 2001, 247–293.

16. Dowding C.H., Rozen A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking, American Society of Civil Engineers, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.104, 1978, p. 175-191.

17. Power M.S., Rosidi D., Kaneshiro J.Y. Seismic vulnerability of tunnels and underground structures revisited, *Proceedings of North American Tunneling '98*, Newport Beach, CA, Balkema Rotterdam, 1998, p. 243-250. 65

18. Май Дык Минь. Расчёт тоннелей на сейсмические воздействия. Москва 2014.

19. Damages of the Shaohuoping road tunnel near the epicenter/ Hai-Tao Yua, Yong Yuan, Xian Liu, Yu-Wen Li and Sui-Wang Ji / *Structure and Infrastructure Engineering* Vol. 9, No. 9, September 2013, 935–951.

20. Seismic damage mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake/ Yusheng Shen, Bo Gao , Xiaoming Yang, Shuangjiang Tao. *Engineering Geology* 180 (2014) 85–98.

21. Антонов А. Ю. О некоторых факторах, влияющих на статическую работу тоннельной обделки//Метрострой. 1963г.

22. Булычев Н.С. Природа инженерно-геологических явлений при проходке и эксплуатации капитальных горных выработок // Инженерно-геологические прогнозы при разведке глубоких горизонтов месторождений твердых полезных ископаемых. – М: Недра, 1969. – С. 27-29.
23. Картопольцев, В.М. Тоннели [Текст] : монография / В.М. Картопольцев, А.В. Картопольцев. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. – 300 с.
24. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: Учебник для вузов.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Недра, 1994,— 382 с.
25. Пиньковский Г.С., Безазьян А.В. Определение прочностных характеристик горных пород при естественной влажности // Уголь Украины, 1979, № п/п8. – С. 21-22.
26. А.П. Васильева. Ремонт и содержание автомобильных дорог II том. Москва 2004.
27. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М., «Углетехиздат», 1954, 379с.
28. Рукин В.В. Руппенейт К.В. Механизм воздействия обделки напорных тоннелей с массивом горных пород. М., «Наука», 1969, 156с.
29. Аннин Б.Д. Одна плоская упругопластическая задача при экспоненциальном условии текучести. // Механика твердого тела, 1966, № п/п3, с. 122-123.
30. Хасанов Н.М. Обеспечение сейсмостойкости подземных и надземных транспортных сооружений. «Бишкек», 2014, 101с.
31. Горбушко. Р.М. Информационное инженерно-геологическое обеспечение проходки тоннелей комбайнами с пригрузом забоя: на примере г. Москвы. «Москва», 2007, 146с.
32. Дашко Р.Э. О.Ю. Александрова. Котюков П.В. А.В. Шидловская Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. «Санкт-Петербург», 2011.
33. Дашко Р.Э. Котюков П.В. Инженерно-геологическое обеспечение

эксплуатационной надежности подземных транспортных сооружений в Санкт-Петербурге. «Санкт-Петербург», 2011.

34. Дашко Р.Э. Котюков П.В. Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей. «Санкт-Петербург», 2013.

35. Дашко Р.Э. Котюков П.В. Исследование биоагрессивности подземной среды Санкт-Петербурга по отношению к конструкционным материалам транспортных тоннелей и фундаментов. «Санкт-Петербург», 2007.

36. Кудрявцев А.В. Обоснование надежности технологических схем строительства и эксплуатации тоннелей. «Красноярск», 2009, 155с.

37. Инженерно-геологические условия горных тоннелей Транссиба на Малом Хингане. «Хабаровск», 1999, 115с.

38. Методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния горных автодорожных тоннельных переходов. ОДМ 218.4.001-2009г.

39. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

40. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики: Монография М.: "Издательство Машиностроение-1", 2004. 172 с.

41. Основы строительной теплофизики: учеб. пособие / Ю. И. Толстова, р. н. Шумилов; М-во образования и науки рос. Федерации, урал. федер. ун-т; [науч. ред. а. с. носков]. — Екатеринбург: изд-во урал. ун-та, 2014. — 104 с

42. СНиП рк 2.04-03-2002 Строительная теплотехника Дата введения — 01.03.2003 г.

43. Мирам, А. О. Техническая термодинамика. Тепломассообмен: учеб. издание / А. О. Мирам. – М.: АСВ, 2011. – 352 с.

44. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Минск: Высшая школа А, 2010. – 320 с.

45. Шилин А.А., Зайцев М.В., Золотарев И.А., Ляпидевская О.Б. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительстве и ремонте. Тверь, издательство "Русская торговая марка", 2003, - 399с.

46. Рекомендации по проектированию гидроизоляции подземных частей зданий и сооружений. Рекомендации разработаны в «ЦНИИпромзданий» (к.т.н. А.М. Туголуков], Ю.В. Фролов) Москва 2009г.
47. Гледко Ю.А. Гидрогеология. Минск «Вышэйшая школа», 2012г.
48. А.А. Фугенфиров. Проектирование транспортных тоннелей. Омск 2007г.
49. В.Ф. Илюшин. В.М. Насберг. Г.А. Беручашвили. Н.А. Веретенникова. Шпуровой дренаж и противодиффузионная цементация в подземных гидротехнических сооружениях. Москва «Энергия» 1978.
50. Е.М. Пашкин. Инженерно-геологические исследования при строительстве туннелей. «Геореконструкция» Санкт-Петербург 2013.
51. Инженерно-геологический отчёт участка тоннеля «Истиклол». Компания «Собир Байналмилал» февраль 2005.
52. СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия. М.: Стройиздат, 2003 (перезд.).
53. Строительные работы по реабилитации и частичной реконструкции автодороги Таджикистан-Узбекистан. Участок-В Душанбе-Чанак. «Первый институт по проектированию и изысканию автодорог Китая», 2007.
54. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов.
55. Шабынин, Л.Л. Гидрогеологические условия Северо-Муйского тоннеля БАМ / Л.Л. Шабынин. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – 94 с.
56. Верховин, И.И. Условия обводненности Северо-Муйского тоннеля / И.И. Верховин, М.А. Тугарина, Ю.Н. Диденков, Л.Л. Шабынин, А.М. Реуцкая, М.А. Алтынникова, А.Ю. Легун // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № п/п 4 (8). – С. 152-159.
57. Дмитриев, А.Г. Геофизическое обследование основания пути в Северо-Муайском тоннеле / А.Г. Дмитриев, О.Н. Тирский, Н.М. Быкова, Ю.А. Хрюкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № п/п 4 (8). – С. 124-132.

58. Семенов, Р.М. Оценка сейсмоопасности Северо-Муйского района / Р.М. Семенов, О.П. Смекалин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2005. – № п/п 4 (8). – С. 114-119.
59. Ниязов. Д.Б История развития сейсмологии и сейсмостойкого строительства в Таджикистане в XX веке. – Душанбе: 2005г.
60. Саньков В.А., Коваленко С.Н., Днепровский Ю.И. и др. Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона — Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1991. 111с.
61. Лысиков Б.А., Каплюхин А.А. Использование подземного пространства Донецк: Норд-Пресс, 2005. - 390 с.
62. Yashiro, K. Model test on behavior of tunnels under deformation of the ground upon earthquake / Karuhide Yashiro, Naoki Fachibara, Yoshiyuki Kajima, Masaichi Nonomura, Toshihiro Asakura // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 63-71.
63. Doi, T. Numerical analysis on seismic behavior of ground-lining interaction for NATM tunnels / Tadashi Doi, Kazuo Nishimura, Tsuyoshi Domon // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 209-213.
64. Asakura, T. Study on behavior of lining during earthquakes in shallow tunnel / Toshihiro Asakura, Youshiuji Kojima, Masaichi Nonomura, Hidetsug Miabayashi, Atsumi Isogai // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 209-213.
65. Tachibana, N. A study of damage of mountain tunnels caused by 1995 South Hyogo prefecture earthquake and 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake / Naoki Tachibana, Yoshiyuki Kojima, Karuhide Yashiro, Toshihiro Asakura, Masaichi Nonomura // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 215-219.
66. Kobayashi, M. A study of seismic displacement of cut and cover tunnel on longitudinal section / Masahiko Kobayashi, Yasumiki Yamamoto, Shogo Otake, Yousuke Inoue, Fukutaro Umebayashi // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2009 – P. 263-268.
67. Kusaka, A. Seismic behavior of mountain tunnel affected by difference of

lining structure / Atsushi Kusaka, Hideto Mashimo, Nobuharu Isago, Katsunori Kadoyu // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2010 – P. 1-8.

68. Matsumoto, K. Shallow tunnel construction right under important structures / Koji Matsumoto, Nagatika Uryu, Hideo Endo, Akira Sato // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2009 – P. 1-8

69. Uryu, N. Tunnel excavation in a squeezing ground and on unconsolidated gravel layer / Nagachika Uryu, Kouzou Menda, Masahiro Hashizume, Hideo Kinashi // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2009 – P. 55-61

70. Terashima, Y. Development of tunnel face monitoring system and case study on poor ground / Yoshihiro Terashima, Isao Ogawa, Koko Kumagai, Hiroaki Matsuda, Tamiyuki Maraoka // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2010 – P. 219-223.

71. Yamada, H. Design and construction of auxiliary method for weakly ground condition with large displacement / Hiroyuki Yamada, Yoshifumi Kato, Shuuichi Omura, Satoshi Kubota // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 51-58

72. Tokudome, O. Countermeasure to prevent displacement in weak mudstone ground influenced by faults and folds / Osamu Tokudome, Toshirou Ootsu, Masaaki Hirose, Kazuya Sawada // Proceedings of tunnel engineering, JSCE (5), 2007 – P. 29-34

73. Geniş, M. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Doeukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey / M. Geniş, H. Basarir, A. Ozarslan, E. Bilir, E. Balaban // Engineering geology. – 2007. – Volume 92, Issues 1-2. – P. 14-26.

74. Basarir, H. Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey / Hasan Basarir // Engineering geology. – 2006. – Volume 8, Issue 4. – P. 225-237.

75. Sopaci, E. Engineering geological investigations and the preliminary support design for the proposed Ordu Peripheral Highway Tunnel, Ordu, Turkey / Evrim Sopaci, Haluk Akgün // Engineering Geology. – 2008. – Volume 96, Issues 1-2. – P. 43- 61.

76. Gurung, N. Observations of deformation and engineering geology in the

Lam Ta Khong tunnel, Thailand / Netra Gurung, Yushiro Iwao // Engineering Geology. – 1998. – Volume 51, Issue 1. – P. 55-63.

77. Ефимова М.Р. Общая теория статистики: Учебник. / М.Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.М. Румянцев. -2-е изд., испр. и доп. -М.: ИНФРА-М, 1999. -416 с.

78. Общая теория статистики: Статистическая методология в изучении коммерческой деятельности: Учебник / Под ред. О.Э. Башина, А.А. Спирина. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистка, 2006. – 440 с.

79. Статистика: Учебник / О.А.Бессчетная, А.Н. Гончаров, Г.Л. Горбачева и др.; Под общ. ред. А.Е. Сурикова. – М.: Издательство РАГС, 2005. – 656 с.

80. Статистика: Учебник /В.Г. Минашкин, Р.А. Шмойлова, Н.А. Садовникова, Е.С. Рыбанова; Под ред. В.Г. Минашкина.– М.: Проспект, 2005. – 266 с.

81. Статистика: Учебное пособие / Харченко Л.П., Долженкова В.Г., Ионин В.Г. и др.; Под ред. канд. экон. наук В.Г. Ионина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.:ИНФРА-М, 2001. – 384 с.

82. Руководство по техническому диагностированию автодорожных тоннелей Москва 2001.

83. В.Ф. Илюшин. В.М. Насберг. Г.А. Беручашвили. Н.А. Веретенникова. Шпуровой дренаж и противofильтрационная цементация в подземных гидротехнических сооружениях. Москва «энергия» 1978г.

84. Проект по реконструкции тоннеля «Истиклол». Компания по строительству плотины и оросительных сооружений «Собир». РТ.2014г.

85. А.А. Шилин, М.В. Зайцев, И.А. Золотарёв, О.В. Лебедевская. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительствеи ремонте. Твер 2013г.

86. Пат. № 185730 Российская Федерация, МПК E21F 16/02, Водоотводный лоток/ Тешаев У.Р.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет».- № п/п 2018114855, заявл. 20.04.2018; опубл. 17.12.2018.

87. Дефекты бетонных и железобетонных конструкций <http://helpiks.org/6-54648.html>.
88. Тешаев У.Р., Вохмин С.А., Хасанов Н.М.. Анализ динамики роста давления при замерзании забутовочных горных пород транспортных тоннелей. IV Международной (X всероссийской) конференции НАСКР-2018 «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».
89. Хасанов Н.М., Абдужабаров А.Х., Тешаев У.Р.. Сейсмостойкость конструкций водопропускных сооружений и подземных переходов. Вестник гражданских инженеров, 205-209. Санкт-Петербург 2017
90. Assessment of defects in mountain roadway tunnel due to various natural and operational factors – Istiqlol (Republic of Tajikistan). Umardzhon R. Teshaeв, Sai Krishna Padamata, Sergey A. Vokhmin, Yuri P. Trebush, Nurali M. Khasanov. National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan series of geology and technical sciences Volume 5, Number 431 (2018)
91. Тешаев У.Р. Хасанов Н.М. Процессы и параметры сдвижения горных пород и земной поверхности. Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив-2016», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2016 г.
92. Тешаев У.Р. Вохмин С.А. Факторы, влияющие на устойчивость обделки тоннелей. Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив-2016», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2016 г.
93. Тешаев У.Р. Вохмин С.А. Сейсмические воздействия на подземные сооружения в горных районах Республике Таджикистан. Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив-2016», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2016 г.
94. Тешаев У.Р. Хасанов Н.М. Проектирование и строительство гидротехнических тоннелей и подземных машинных залов ГЭС. Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив-2016», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2016 г.

95. Тешаев У.Р. Хасанов Н.М. Методы предварительного укрепления горных пород в зонах тектонических нарушений. Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный-2016», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2016 г.

96. Sander Greenland, Stephen J. Senn, Kenneth J. Rothman, John B. Carlin, Charles Poole, Steven N. Goodman, Douglas G. Altman // Eur J Epidemiol. 2016; 31: 337-350.

97. Элементные сметные нормы (ЭСНм РТ-2011) Сборник № п/п38 Изготовление технологических металлических конструкций.

98. Элементные сметные нормы (ЭСН РТ-2007). Сборник № п/п26 Теплоизоляционные работы.

99. Элементные сметные нормы (ЭСН РТ-2007). Сборник № п/п8 Конструкции из кирпича и блоков.

100. Элементные сметные нормы (ЭСН РТ-2007). Сборник № п/п1 Земляные работы.

101. СНиП II-3-79* Строительная теплотехника. –М.: Минстрой России, 1995.-29с.

102. СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология и геофизика. –М.: Стройиздат, 1983.-56с.

103. Пат. № 2687693 Российская Федерация, МПК E21F 16/02, Водоотводный лоток транспортных тоннелей/ Вохмин С.А., Тешаев У.Р.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет».- № п/п 2018125410, заявл. 10.07.2018; опубл. 15.05.2019.