

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»

На правах рукописи



ВАКУЛЕНКО ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО
ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЕЙ В
ВОДОНОСНЫХ ПОРОДАХ

Специальность:

25.00.22 «Геотехнология (открытая, подземная и строительная)»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Шуплик М.Н.

Москва

2019

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Анализ современных схем искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах	12
1.1 Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве . . .	12
1.2 Особенности способа замораживания горных пород при проходке тоннелей	20
1.3 Анализ исследований и производственного опыта по замораживанию горных пород при проходке тоннелей	25
1.3.1 Отечественный опыт строительства	25
1.3.2 Мировой опыт	28
1.4 Основные выводы по главе, цель и задачи исследований	36
Глава 2. Исследование процесса формирования ледопородного ограждения при горизонтальном замораживании	38
2.1 Оценка влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ледопородного ограждения вокруг тоннеля	38
2.2 Сравнительный анализ расчётных формул по определению времени замораживания при отсутствии движения подземных вод	42
2.3 Исследование процесса формирования ледопородного ограждения вокруг тоннеля после окончания подачи холодоносителя в замораживающие колонки	53
2.4 Выводы по главе	59
Глава 3. Исследование закономерности напряженно-деформированного состояния системы крепь-ледопородное ограждение при проходке тоннелей в водоносных породах	60

3.1	Экспериментальные исследования по определению характеристик прочности и деформируемости горных пород в условиях трёхосного сжатия	60
3.1.1	Методика проведения испытаний и обработка результатов выполненных исследований	64
3.1.2	Результаты выполненных исследований	69
3.2	Моделирование устойчивости тоннелей в замороженных породах с использованием программного комплекса «Rocscience»	76
3.2.1	Особенности моделирования в «Rocscience RS2»	76
3.2.2	Моделирование напряжения горных пород в ненарушенном массиве	78
3.2.3	Моделирование ледопородного ограждения в «Rocscience RS2»	81
3.2.4	Моделирование распределения смещений крепи тоннеля	83
3.2.5	Моделирование устойчивости незакрепленного тоннеля	83
3.2.6	Моделирование устойчивости тоннеля, закрепленного монолитной железобетонной крепью	84
3.2.7	Моделирование устойчивости тоннеля под защитой ЛПО, опирающегося на слой скальных пород (мрамор) .	86
3.2.8	Моделирование устойчивости тоннеля, пройденного в моренных отложениях	86
3.2.9	Исследование распределения смещений в крепи тоннеля, пройденного в моренных отложениях	87
3.2.10	Анализ влияния свойств горных пород на смещения крепи тоннеля	89
3.3	Выводы по главе	91
Глава 4. Рекомендации по технологии производства работ по замораживанию при проходке тоннелей в водоносных породах		92
4.1	Общие рекомендации по использованию способа искусственного замораживания при строительстве тоннелей в водоносных породах	92

	Стр.
4.2 Прекращение работ по замораживанию и ликвидация ледопородного ограждения	95
4.3 Анализ рисков применения технологии искусственного замораживания	96
4.4 Обоснование рекомендаций по технологии проходки тоннеля Бергосен (Норвегия) с применением способа искусственного замораживания горных пород	99
4.4.1 Геология и гидрогеология области строительства тоннеля	99
4.4.2 Проектирование ледопородного ограждения для тоннеля Бергосен	103
4.4.3 Стоимость работ по замораживанию	107
4.4.4 Риски применения способа искусственного замораживания для формирования ЛПО в тоннеле «Бергосен»	108
Заключение	109
Список литературы	111
Приложение А. Сравнение проектов по искусственному замораживанию горных пород в странах Скандинавского полуострова	119
Приложение Б. Параметры, определяемые для проектирования ледопородного ограждения	120
Приложение В. Справка о внедрении рекомендаций по технологии искусственного замораживания горных пород	121
Приложение Г. Параметры для определения времени замораживания при проектировании ЛПО для тоннеля Бергосен	122

Введение

Способ искусственного замораживания в настоящее время в основном применяется при строительстве вертикальных выработок в неустойчивых обводнённых породах. Однако, существует практика использования этого способа при строительстве тоннелей при пересечении ими водоносных пород. Опыт применения горизонтального замораживания в последние годы помимо России имеет место в Норвегии, Швеции, Финляндии, Японии, США и других странах. С учётом развития городской среды, сокращения свободных площадей и сложностью реализации работ по замораживанию горных пород с земной поверхности, замораживание горизонтальными колонками является перспективным методом специального строительства.

Несмотря на имеющийся накопленный опыт и перспективы использования способа искусственного замораживания для проходки горизонтальных выработок, данная схема не получила большого распространения из-за ряда факторов, ограничивающих её применимость.

В частности, в современной практике проектирования горизонтального замораживания не учитывается влияние теплопритока от земной поверхности на характер формирования ЛПО. Существующие методы определения времени замораживания для создания ЛПО проектной толщины были разработаны применительно к ЛПО, создаваемым с помощью замораживающих колонок в скважинах, пробуренных с поверхности земли. Обоснованность их применения к ЛПО, сформированным с помощью колонок, расположенных вдоль оси тоннеля, не установлена. Точность определения продолжительности замораживания в значительной степени зависит от надежности определения теплофизических свойств горных пород. В практике современного подземного строительства на приоритетное место ставят наиболее эффективные способы его реализации за кратчайшие сроки. Зачастую для определения времени замораживания выбирают такие методы расчета, которые за кратчайшее время обеспечивают наименьшие финансовые затраты. При этом не учитывают насколько такие методы подходят для конкретного случая. В результате оказывается, что расчётное время не соответствует условиям замораживания и в итоге необходимо нести дополнительные расходы. Таким образом можно

сказать, что время является важным фактором, влияющим на стоимость производства работ по замораживанию горных пород.

Одним из основных параметров, определяющих экономическую целесообразность применения способа замораживания, является толщина ледопородных ограждений. Завышение или занижение толщины ледопородных ограждений ведет или к значительному увеличению объема замороженных горных пород, или к разрушению ледопородного ограждения и прорыву подземных вод. Как в первом, так и во втором случае это приводит к значительному увеличению стоимости и срока строительства подземного сооружения. Особенно важное значение приобретает вопрос определения толщины ограждения при освоении месторождений, залегающих на больших глубинах, где имеет место большой расход энергии при замораживании 1 м³ ледопородного массива. На основании принятой толщины ледопородного ограждения осуществляются все последующие теплотехнические и технологические расчеты процесса замораживания. Определение толщины ледопородного ограждения с учетом указанных факторов является весьма сложной задачей, поэтому её решение, учитывая инженерный характер и большой разброс значений исходных параметров, осуществляется приближенными методами.

В работах по исследованию горизонтального замораживания горных пород при строительстве тоннелей отсутствует методика по определению устойчивости таких ЛПО в зависимости от заданной толщины, не рассмотрено влияние свойства самопроизвольного увеличения толщины ЛПО на закономерность его формирования. Анализом устойчивости подземных сооружений с применением ЛПО занимались ученые Института мерзлотоведения им. Обручева С. С. Вялов и Ю. К. Зарецкий. В методике, представленной авторами, были учтены реологические свойства замороженных пород. Расчет смещений выполнен по двум предельным состояниям – по деформациям и по прочности. В расчетах авторы учитывали реологические свойства замороженных пород [1]. Модель упруго-пластично-вязкой неоднородной среды была разработана И. В. Баклашовым и Б. А. Картозия. В данной модели предлагается учитывать прочность и деформацию неоднородности среды в явном виде. З. К. Ранев разработал методику по определению толщины и деформаций ЛПО для шахтных стволов [2]. В его работе было показано, что предлагаемые методы не учитывают ряд специфических особенностей напряженно-деформированного

состояния ЛПО, обусловленных технологией его образования и возможностью перехода замороженных пород в запредельное состояние (разупрочнение пород). Методика расчета смещений ЛПО кольцевого сечения была сформулирована В. Н. Пуголовкиным [3].

Несмотря на накопленный опыт, определение устойчивости является актуальной задачей. На сегодняшний день нет исследований устойчивости ЛПО некруглой формы для тоннелей, а существующие методики не позволяют вести корректный расчет смещений и устойчивости для таких ЛПО.

Методика расчета ЛПО для горизонтальных выработок, разработанная И.Д. Насоновым, М.Н. Шупликом, В.И. Ресиним и В.Н. Пуголовкиным, представленная в пособии [4], наиболее полно отражает этапы расчета ЛПО с учетом реологических свойств горных пород. При этом также остаются неучтенными такие параметры, как определение устойчивости ЛПО, в том числе некруговой формы, способность ЛПО к увеличению толщины после завершения активной фазы замораживания, определение времени замораживания, учитывая специфику горизонтального замораживания.

Несмотря на имеющийся опыт и большие перспективы его использования, исследований по определению особенностей теплотехнических параметров процесса замораживания, оценки эффективности его применения, рисков по его использованию крайне недостаточно. В связи с этим, обоснование параметров технологии искусственного замораживания горных пород горизонтально направленными замораживающими колонками при проходке тоннелей в водоносных горных породах является актуальной научной задачей, что имеет важное значение для развития технологии тоннелестроения.

Целью данной работы является обоснование параметров технологии искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах на основе установления зависимости влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ЛПО, исследования свойства самопроизвольного увеличения размеров ЛПО после завершения активной фазы замораживания горных пород и оценки закономерности напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО».

Поставленная в работе цель потребовала решить следующие **задачи**:

- выполнить анализ теоретических и экспериментальных исследований искусственного замораживания горных пород при проходке горизонтальных выработок в водоносных породах;
- исследовать влияние теплопритока от земной поверхности на формирование ЛПО вокруг тоннеля;
- исследовать закономерности формирования ледопородного ограждения во времени;
- исследовать возможность применения существующих расчетных формул по определению времени замораживания для шахтных стволов к замораживанию горизонтальными колонками при проходке тоннелей;
- исследовать влияние тепловой инерции на закономерность формирования ледопородного ограждения;
- разработать методику по исследованию реологических свойств мерзлых пород в условиях объемного напряженного состояния и методику компьютерного моделирования оценки напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО»;
- разработать рекомендации по технологии искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах.

Научная новизна:

- определена минимальная глубина заложения тоннеля, при которой теплоприток от земной поверхности не влияет на равномерность формирования ЛПО вокруг выработки;
- установлено свойство самопроизвольного увеличения размеров ЛПО после завершения активной фазы замораживания, позволяющее прогнозировать и обеспечивать достижение его проектных параметров;
- разработана методика математического моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего тоннель, а также методика исследования реологических свойств мерзлых пород в условиях объемного напряженного состояния;
- установлены закономерности совместного деформирования системы «крепь-ЛПО» и предложена их математическая интерпретация, обеспечивающая разработку прогноза смещения крепи и ЛПО в конкретных температурных условиях.

Теоретическая и практическая значимость:

- расширен диапазон знаний по закономерностям формирования ледопородного ограждения и напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО»;
- уточнён механизм формирования ЛПО для условий горизонтальной схемы замораживания в части закономерностей формирования ледопородного ограждения и напряжённо-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО»;
- разработаны рекомендации по технологии горизонтального замораживания водоносных пород в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий строительства.

Методы исследований. Комплексные аналитические и экспериментальные исследования с использованием анализа накопленного научного и практического опыта, математической статистики, компьютерного моделирования и экспериментальных работ в лабораторных условиях.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что для определения времени замораживания при создании горизонтальных ледопородных ограждений проектных размеров наиболее близкие результаты даёт балансовый метод расчета, что подтверждается отечественной и зарубежной практикой строительства тоннелей.
2. Установлено влияние теплопритока от земной поверхности на процесс формирования ледопородного ограждения (ЛПО) при строительстве тоннельных выработок с применением горизонтальных замораживающих колонок. Доказано, что теплоприток от поверхности земли не влияет на неравномерность формирования толщины ЛПО при выполнении неравенства $H/D \geq (1,5 - 2) \times \lambda$.
3. Установлены закономерности формирования толщины ледопородного ограждения (ЛПО) во времени. Показано, что толщина ЛПО может самопроизвольно увеличиваться после прекращения подачи холодоносителя в замораживающие колонки. Такие закономерности наблюдаются при большой толщине ЛПО (более трёх метров) независимо от температуры замораживания или при низких температурах замораживания (менее минус 40 °С) независимо от толщины ЛПО.

4. Установлены закономерности напряжённо-деформированного состояния системы «крепь-ледопородное ограждение» для массива крепких дезинтегрированных пород, сущность которых заключается в том, что при сочетании в единой деформируемой системе таких разнородных по реологическим свойствам материалов как замороженная порода (ЛПО) и бетон (крепь) критерии устойчивости системы, а, следовательно, и параметры ЛПО определяются из условий деформационной способности крепи в конкретных температурных условиях и уровня напряжённо-деформированного состояния массива пород. Наибольшее влияние на устойчивость крепи тоннеля оказывает значение модуля Юнга. Уменьшение данного параметра на 20% приводит к увеличению смещения крепи в 1,5 раза.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждаются корректной постановкой задачи исследований, анализом и обобщением теоретических и экспериментальных работ, достаточным и представительным объемом проведенных исследований (30 экспериментов, проведенных на образцах различных горных пород), опробованными методами математического моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива и использованием сертифицированного оборудования, положительными результатами внедрения научных разработок и принятых на их основе технических решений как в России (ООО «Газпром геотехнологии»), так и за рубежом (тоннель «Бергосен» в Норвегии).

Личный вклад автора состоит в оценке выполненных ранее исследований в области искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах, корректной постановке задач, использованием теоретических и экспериментальных методик для обоснования полученных в работе результатов, выводов и рекомендаций. Разработаны методики оценки реологических свойств мерзлых пород и компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «крепь – ЛПО». Выполнен большой объем экспериментальных работ в лабораторных условиях на образцах мерзлых пород. Результаты обработки и анализа проведенных исследований опубликованы в печати и доложены на международных конференциях.

Реализация выводов и результатов работы. «Рекомендации по технологии искусственного замораживания горных пород при проходке

тоннелей в водоносных породах» приняты к использованию ООО «Газпром геотехнологии» для определения реологических свойств мерзлых пород по разработанной автором методике при проектировании подземных резервуаров на полуострове Ямал.

Рекомендации по технологии горизонтального замораживания водоносных пород в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий строительства приняты к использованию Норвежским университетом естественных и технических наук «NTNU» для проекта строительства тоннеля «Бергосен», Норвегия.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на международной научной конференции «AIC 2018 – Transportation Infrastructure Engineering in Cold Regions», г. Сисимиут, Гренландия, 1-3 мая 2018, а также на международном симпозиуме «Неделя горняка 2019», г. Москва, Россия, 30 января-3 февраля 2019.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 1 – в базе данных SCOPUS, 1 – в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и четырех приложений. Полный объём диссертации составляет 122 страницы, включая 59 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 81 наименование.

Глава 1. Анализ современных схем искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах

1.1 Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве

Способ искусственного замораживания горных пород получил широкое распространение в подземном строительстве. Его применяют при возведении подземных сооружений в неустойчивых водоносных породах. Также он применяется и в устойчивых, но сильно трещиноватых породах с большой водообильностью. Для охлаждения горных пород используют холодильные установки с системой погружаемых в породу труб (замораживающих колонок), по которым циркулирует холодоноситель, с температурой $-20 \div -40$ °С (рассольный способ замораживания), или хладагент, который непосредственно испаряется в замораживающей колонке при температуре от -35 до -196 °С (безрассольный способ замораживания) [5].

Данный способ существует уже более 130 лет, и неслучайно, что за это время он претерпел многие изменения. Появилась четко сформированная научная база, описывающая все аспекты данного процесса. Создано мощное оборудование, высокопроизводительные замораживающие станции, изучены нестационарные процессы теплообмена в массиве горных пород и замораживающих колонках, разработаны инженерные методы расчета проектирования ледопородных ограждений и холодильного оборудования. К настоящему времени с его помощью в различных городах бывшего Советского Союза и России построено 132 наклонных эскалаторных тоннеля протяженностью более 8 км, 162 ствола, 53 котлована и более 6 км станционных и перегонных тоннелей метрополитенов, около 12 км коллекторных тоннелей, осуществлено замораживание в условиях залегания водоносных пород на глубине до 820 м, при температуре среды до $+35$ °С, наличии фильтрующих пород и минерализации подземных вод [6].

Исследование истории развития научных основ и технологических особенностей данного способа позволяет выявить его недостатки, проследить

пути, по которым происходило их решение и, в итоге, более точно оценить направление дальнейших исследований в этой области.

Способ искусственного замораживания горных пород состоит в том, что в водоносных породах вокруг запроектированного сооружения образуется временное ледопородное ограждение, защищающее выработку от проникновения воды на время проходческих работ. Образование ледопородного ограждения достигается тем, что по контуру намеченной к проходке выработки бурят скважины, по которым циркулирует охлажденный до отрицательной температуры холодоноситель. Охлаждение холодоносителя происходит на поверхности земли с помощью холодильных машин [7].

В России способ был впервые применен в 1928 г. для проходки ствола №2 Соликамского калийного рудника. Одновременно с этим стволом там же проходилась ствол №1 с применением способа цементации водоносных пород. Опыт проходки этих стволов должен был показать, какому из способов следует отдать предпочтение при проходке других стволов шахт. Все преимущества оказались на стороне способа замораживания и при последующих работах стволы Березниковского калийного рудника проходили только с применением способа замораживания [8].

В течение длительного времени способ замораживания пород при помощи рассола был единственным. В 1938 г. был предложен способ безрассольного замораживания — непосредственным испарением хладагента в замораживающих колонках. С ростом масштаба и глубин применения способа замораживания развивались научно-исследовательские работы в этой области, большая часть которых проведена в Лаборатории специальных способов проходки горных выработок и водопонижения ИГД им. А. А. Скочинского, большой вклад в развитие способа искусственного замораживания горных пород внесли работы, выполненные в Московском Государственном Горном Университете [9; 10].

Техника способа замораживания усложнялась и совершенствовалась по мере увеличения глубины замораживания, которая достигла на калийной шахте в Канаде 914 м. Работы по строительству данного объекта производились в период с 1954 по 1959 годы. В Англии, на одной из угольных шахт, в конце 60-ых годов, производилось замораживание на глубине от 550 до 975 м. В отечественной практике максимальная глубина замораживания составляет

620 м, выполненная при строительстве Яковлевского рудника КМА, в период с 1974 по 1987 годы [11].

Таким образом, к семидесятым годам XX века способ искусственного замораживания горных пород сформировался с точки зрения технологии и производства работ. Был накоплен значительный опыт по проектированию и строительству, однако теоретические основы метода были развиты еще очень слабо, ввиду крайней сложности описываемых физических процессов.

Значительный вклад в развитие способа искусственного замораживания горных пород внесли многие отечественные ученые, в частности Я. О. Дорман, В. А. Казарян, И. О. Королев, И. Д. Насонов, Н. Г. Трупак, Х. Р. Хакимов, М. Н. Шуплик и другие. Из зарубежных авторов следует отметить труды Дж. С. Харриса, Х. Л. Йессберга, Т. Йоханссона, Ф. Санджера и Ф. Сэйлса. Изучению свойств мерзлых горных пород и устойчивости выработок, пройденных в замороженных породах посвящены работы Н. И. Абрамкина, В. Ж. Аренса, И. В. Баклашова, С. С. Вялова, Э. Д. Ершова, Ю. К. Зарецкого, Б. А. Картозия, Г. П. Кузьмина, Ю. М. Либермана, М. С. Плешко, Н. А. Цытовича, О. Б. Андерсланда, А. Л. Берггрен, Б. Ладаного.

Анализ существующих способов замораживания показал, что наиболее широкое применение получил рассольный способ замораживания пород. Остальные же применяются в ограниченных объемах, в основном, когда нет возможности применить рассольный способ, либо в аварийных случаях при замораживании. В настоящее время ведутся исследования новых перспективных способов искусственного замораживания, таких как замена холодоносителя с хлорида кальция на менее токсичные соединения, а также новые конструктивные решения для замораживающих колонок, позволяющие эффективнее использовать холодоноситель [12].

Основным параметром, определяющим экономическую целесообразность применения способа замораживания, является толщина ледопородных ограждений. Завышение или занижение толщины ледопородных ограждений ведет или к значительному увеличению объема замороженных горных пород, или к разрушению ледопородного ограждения и прорыву подземных вод. Как в первом, так и во втором случае это приводит к значительному увеличению стоимости и срока строительства подземного сооружения. Особенно важное значение приобретает вопрос определения толщины ограждения при

освоении месторождений, залегающих на больших глубинах, где имеет место большой расход энергии при формировании ледопородного массива. На основании принятой толщины ледопородного ограждения осуществляются все последующие теплотехнические и технологические расчеты процесса замораживания. Определение толщины ледопородного ограждения с учетом указанных факторов является весьма сложной задачей, поэтому её решение, учитывая инженерный характер и большой разброс значений исходных параметров, осуществляется приближенными методами [13]. Точность определения продолжительности замораживания в значительной степени зависит от надежности определения теплофизических свойств горных пород.

Следует иметь в виду, что тоннели пересекают большое количество разнообразных горных пород с различными физико-химическими свойствами, которые порождают и исключительную изменчивость их теплофизических свойств. Эти свойства существенным образом зависят от таких параметров, как влажность (льдистость), температура, плотность. Все это в значительной степени затрудняет подготовку справочных материалов по теплофизическим свойствам замороженных горных пород. Трудность еще заключается и в том, что, в отличие от однородных сплошных твердых тел, горные породы являются многокомпонентными и многофазными физико-химическими системами. Они состоят из множества частиц различной формы и размеров или же пронизаны сложной системой пор и трещин, заполненных водой. Поровая влага имеет решающее значение, в формировании теплофизических свойств горных пород.

Горные породы в процессе их замораживания приобретают новые свойства, которые обуславливаются двумя основными факторами, сопровождающимися формированием криогенной текстуры и структуры мерзлых пород: перераспределением и переходом поровой влаги в лёд. К основным теплофизическим характеристикам замороженных горных пород, которые необходимы при расчете процесса искусственного замораживания, относятся: коэффициент теплопроводности, характеризующий способность горной породы проводить тепловую энергию под действием градиента температур, теплоемкость, характеризующая теплоаккумулятивные свойства среды, коэффициент температуропроводности, который определяет скорость изменения температурного поля среды.

Следует отметить, что данных о теплофизических свойствах горных пород, особенно замороженных, ещё недостаточно. Это связано с трудностью получения в лабораторных условиях образцов пород в естественном состоянии и с ненарушенной структурой, а также с трудностями, возникающими при проведении самих опытов по определению теплофизических свойств породы, так как при их проведении трудно бывает выдержать определенный температурный режим.

Анализ проектирования процесса замораживания показывает, что надежность расчетных методов и, в конечном счёте, успех замораживания в значительной степени зависят от того, насколько правильно и научно обоснованно будут определены такие параметры, как средняя температура ледопородного ограждения, удельный тепловой поток, которые, в свою очередь, функционально связаны с температурой стенки и с коэффициентом теплоотдачи в замораживающих колонках. Все эти параметры тесно взаимосвязаны как между собой, так и с прочностными и конструктивными параметрами ледопородного ограждения. Поэтому дальнейшее совершенствование способа замораживания невозможно без детального исследования основных теплотехнических параметров в их взаимоувязке.

Для исследования развития температурного поля во времени и пространстве необходимо комплексно решать задачу внутреннего и внешнего теплообмена, поскольку температура на наружной поверхности замораживающей колонки является граничным условием для двухмерной задачи теплообмена в определенном горизонтальном слое породы. Существенное осложнение вносит в задачу рассредоточенность источников холода, а также различная температура в разных точках поперечного сечения ледопородного ограждения. Наконец, следует учитывать то важное обстоятельство, что задача в тепловом отношении не является осесимметричной вследствие взаимовлияния замораживающих колонок, расположенных кольцом вокруг выработки. Асимметрия усугубляется отклонением замораживающих скважин от горизонтали.

Среди отечественных ученых следует отметить труды Н. Г. Трупака, И. А. Чарного, Х. Р. Хакимова, И. Г. Портнова и др. Работа Н. Г. Трупака «Замораживание горных пород при проходке стволов шахт» 1954 года стала фундаментом дальнейших теоретических исследований в области искусственного замораживания горных пород в России [8]. Попытки более полного учета

динамики процесса были предприняты И. А. Чарным и Х. Р. Хакимовым. Для решения задачи применяется метод последовательной смены стационарных режимов, заключающийся в том, что распределение температур в зоне замороженных и охлажденных пород определяется логарифмическими функциями, удовлетворяющими уравнению установившейся теплопередачи, а зависимость от времени вводится параметрически через радиус промерзания. По методу Х. Р. Хакимова непосредственному решению поддается также только осесимметричная задача, поэтому расчет замораживания кольцом колонок проводится в два этапа: до соприкосновения отдельных ледопородных цилиндров, образующихся вокруг каждой колонки (без учета их взаимного влияния), и от момента смыкания до образования общего ограждения с заданной толщиной стенки, путем замены в расчетной схеме отдельных замораживающих колонок сплошным полым цилиндром, средний диаметр которого равен диаметру кольца колонок [14].

Расчетные формулы получаются громоздкими и малоудобными для вычислений. Во всех упомянутых решениях температура рассола считается постоянной во времени, что также далеко от практических условий замораживания. При замораживании пород на большие глубины встает задача определения внутреннего теплообмена рассола в колонке на заданном горизонте. Первое по времени решение этой задачи дано Лебретоном в 1885 году. Далее Бике в 1933 году уточняет решение Лебретона введением в расчетные формулы коэффициента теплоотдачи от поверхности труб к рассолу и с учетом возможной теплоизоляции питающих труб. Более строгое решение задачи получено Хейзе и Дрекопфом, опубликованное в 1922 году. В их методике распределение температур определяется решением системы двух дифференциальных уравнений первого порядка при условии линейного распределения температуры внешней среды по глубине.

Аналитическим методам свойственны существенные недостатки, приводящие к занижению расчетной прочности ледопородного ограждения и к увеличению проектных сроков замораживания, причем чем больше глубина замораживания и чем выше естественная температура пород, тем более чувствительной становится погрешность аналитических методов. Сложность и недостаточная точность аналитических решений заставила ученых прибегнуть к методам физического моделирования. Среди таких методов в 60-70 годах некоторое распространение получил метод гидравлических аналогий

проф. В. С. Лукьянова, разработанный для данной цели в Институте горного дела им. А. А. Скочинского. Метод гидравлических аналогий проф. В. С. Лукьянова основан на математическом подобии процесса распространения тепла в горных породах и процесса перетекания жидкости в системе сообщающихся сосудов [15]. Однако данные методы моделирования не нашли большого распространения в виду стремительного роста численных методов моделирования, связанного с появлением высокоэффективных вычислительных машин.

В 70-80 годы численные методы моделирования процесса замораживания проводились для решения узких задач в виду того, что вычисления были долгими и дорогостоящими. На основе упрощенных математических моделей выводились некоторые формулы для решения конкретных задач, которые предлагалось использовать в практике. Однако, чаще всего из-за их громоздкости и узости диапазона применения в практике проектирования они не применялись.

Развитие численных методов привело к коренному перелому в аналитических исследованиях. Не разрешаемые аналитически задачи описания процессов теплообмена, задачи неравномерного распределения прочности в ледопородном ограждении на настоящем этапе развития вычислительной техники легко решаются с большой точностью. Большие изменения произошли при проектировании процесса замораживания, если раньше проектирование предлагалось проводить по неким зависимостям, полученным на обобщенных моделях, то теперь появилась возможность проводить математическое моделирование для каждого объекта, учитывая его конкретную специфику. Это стало возможным благодаря широкому внедрению высокопроизводительных вычислительных машин и современных программных комплексов. На современном этапе развития науки главные центры фундаментальных исследований перемещаются из научно-исследовательских институтов в крупные высшие учебные заведения. Методика расчета процесса замораживания численными методами разработана в Московском Государственном Горном Университете, большое внимание этому уделяется в Северо-Восточном федеральном университете имени М. К. Аммосова [16].

В практике современного подземного строительства на приоритетное место ставят наиболее эффективные способы его реализации за кратчайшие сроки. Зачастую для определения времени замораживания выбирают

такие методы расчета, которые за кратчайшее время обеспечивают наименьшие финансовые затраты. При этом не учитывают насколько такие методы подходят для конкретного случая. В результате оказывается, что расчётное время не соответствует условиям замораживания, и в итоге необходимо нести дополнительные расходы. Таким образом можно сказать, что время является важнейшим фактором, влияющим на стоимость производства работ по замораживанию горных пород, а к его расчету необходимо относиться так же ответственно, как и к определению параметров, описанных выше.

На сегодняшний день существуют разные методики расчета времени активного замораживания для создания ледопородных ограждений. Разработаны нормативные документы с приведенными в них формулами для расчета времени (Временные методические рекомендации по определению оптимальных параметров технологии замораживания пород при сооружении стволов шахт «ВИОГЕМ»; Технологические схемы замораживания горных пород при проходке вертикальных стволов шахт Донбасса «ВНИИОМШС»; Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей «ВСН 189-78»). Проблема определения времени замораживания рассмотрена в научно технической литературе Н. Г. Трупаком, И. Д. Насоновым, Х. Р. Хакимовым, М. Н. Шупликом, Я. А. Дорманом, И. О. Королевым и другими видными отечественными учеными. Данный вопрос был рассмотрен на международной конференции по замораживанию грунтов, проходившей в Бохуме в 1978 году [17]. Исследованию определению времени замораживания посвящены труды Ф. Й. Санджерса, Ф. Х. Сэйлса, Д. С.Харриса, О. Б. Андерсланда, Б. Ладаного и других ученых.

Анализ имеющихся нормативных документов и научных работ по замораживанию горных пород показал, что аналитические формулы для расчета времени замораживания выводятся с учетом совершенно разных предпосылок. Но они не в полной мере учитывают все исходные данные. В каждом методе фигурируют факторы, оказывающие различное влияние на конечный результат, т. е. в большей или меньшей степени влияют на время замораживания. Такая ситуация связана с тем, что до сих пор не существует классического решения задачи о фазовом переходе между жидкой и твердой средой – так называемой задачи «Стефана», а все решения основываются на принятых

допущениях. В связи с этим по имеющимся формулам невозможно со 100% точностью определить, за какое время сомкнется ледопородное ограждение.

Дальнейшее совершенствование расчетных зависимостей для определения времени замораживания должно быть основано на разработке программного обеспечения с помощью которого можно было бы вести расчеты по методикам, которые на данный момент сложны для расчетов.

Таким образом, в результате анализа развития способа искусственного замораживания горных пород при строительстве подземных сооружений, а также экспериментальных и теоретических исследований, связанных с определением времени замораживания, показано, что актуальность развития и совершенствования способов и схем искусственного замораживания горных пород резко возросла в связи с увеличением реализации таких проектов, таких как метрополитены, авто и железнодорожные тоннели, кабельные и коллекторные тоннели. Обоснована тенденция развития численных методов моделирования для процесса замораживания горных пород, обозначена возможность производить математическое моделирование для каждого конкретного объекта. Предложены основные направления для дальнейшего совершенствования способа искусственного замораживания горных пород.

1.2 Особенности способа замораживания горных пород при проходке тоннелей

При использовании способа искусственного замораживания в качестве метода закрепления водонасыщенных горных пород при проходке тоннелей необходимо выбрать одну из технологических схем расположения замораживающих колонок, представленных на рисунках 1.1 – 1.3. Замораживание может быть осуществлено при помощи вертикальной или горизонтальной схемы. При вертикальной схеме скважины для замораживающих колонок бурятся с поверхности земли перпендикулярно или под наклоном к тоннелю (рисунок 1.1). Горизонтальная схема применяется при невозможности использовать вертикальную схему или при прохождении тоннеля через массив обводнённых горных пород значительного объёма, когда применение горизонтальной схемы замораживания экономически целесообразно. На рисунке 1.2

показаны варианты расположения колонок при горизонтальной схеме замораживания. Колонки могут располагаться: а) параллельно оси выработки, б) расходящимся пучком, в) параллельно оси выработки вне его сечения. При длине зоны замораживания, превышающей 20 м, необходимо использовать последовательную схему расположения замораживающих колонок, которая представлена на рисунке 1.3 [18].

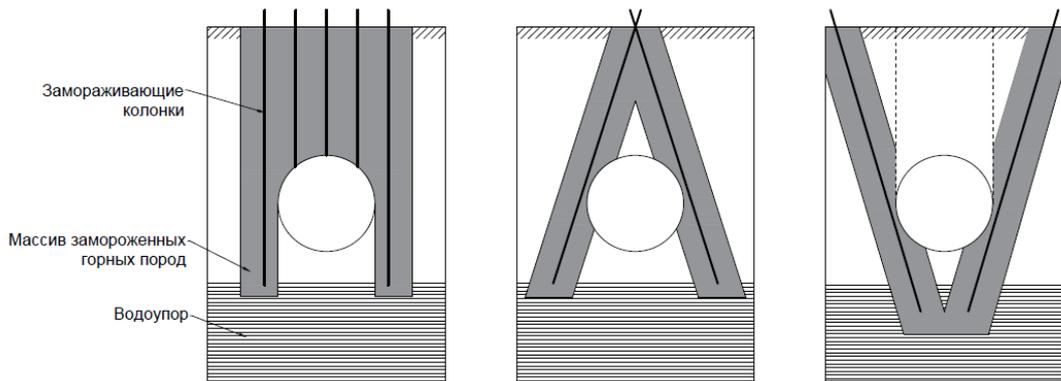


Рисунок 1.1 — Схемы для создания ЛПО с поверхности земли

Принципиальные отличия вертикального замораживания с формированием ЛПО вокруг стволов и наклонных выработок от горизонтальной схемы для создания ЛПО вокруг тоннелей заключаются в том, что при замораживании вертикальными или наклонными замораживающими скважинами замораживающая станция находится на поверхности земли. При использовании горизонтальной схемы, когда замораживающие колонки расположены параллельно оси тоннеля, эффективная работа замораживающей станции поддерживается при её нахождении в выработке, что, однако, усложняет её эксплуатацию и увеличивает стоимость работ по замораживанию. Экономическая целесообразность применения способа замораживания с земной поверхности и способа горизонтального замораживания отражена в работах Н. Г. Трупака, С. А. Маршака и Д. И. Малиованова [19—21].

При этом С. А. Маршак определил границы использования вертикальной схемы замораживания при расстоянии от поверхности земли до выработки не свыше 25-30 м (для Мосбасса). Исследованиями расчета толщины ЛПО горизонтальной формы занимались Карасев Ф. А., Пуголовкин В. Н., Гелескул В. Н. [3; 22; 23].

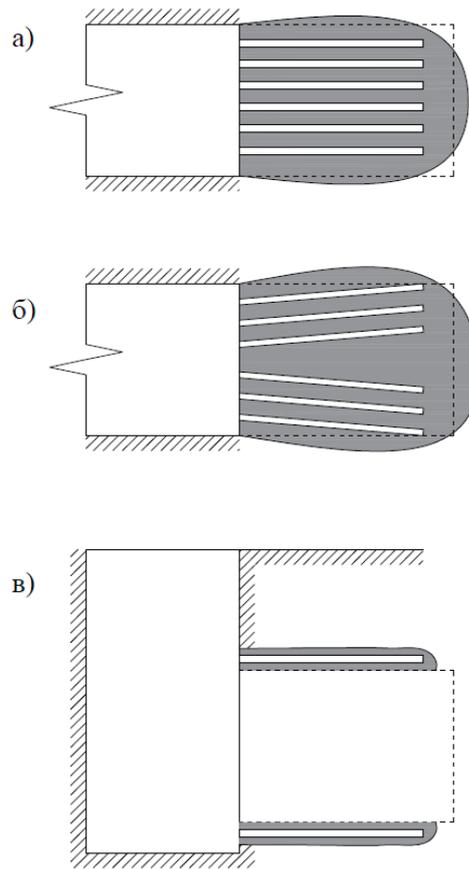


Рисунок 1.2 — Схемы для создания ЛПО горизонтальными замораживающими колонками

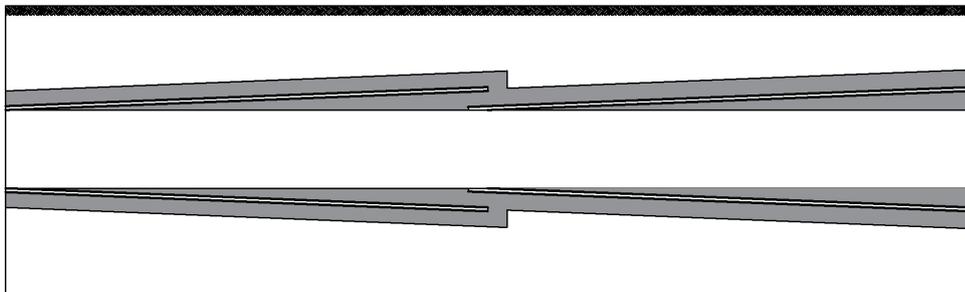


Рисунок 1.3 — Схема для создания ЛПО длиной более 20 м

Необходимо отметить, что существующая методика по формированию ЛПО с помощью горизонтальных колонок, описанная в работе В. Н. Пуголовкина, не учитывает специфику возведения ЛПО вокруг выработок некругового сечения.

Особенности формирования ЛПО при проходке тоннелей в фильтрующих породах рассмотрены в работах И. Д. Насонова, Л. К. Сильвестрова, Санджерса и Сэйлса. При замораживании фильтрующих пород вследствие увеличения внешнего теплопритока по сравнению с обычными условиями заморажи-

вания и неравномерного распределения его по периметру ледопородного ограждения последнее имеет неправильную форму и переменную толщину (рисунок 1.4).

Кроме того, по мере роста ледопородного ограждения в результате постоянного уменьшения теплопоглощения замораживающих колонок и увеличения внешнего теплопритока сравнительно быстро наступает состояние теплового равновесия. Рост ледопородного ограждения или отдельных ледопородных цилиндров может прекратиться, несмотря на непрерывную работу замораживающих установок. При этом холод будет расходоваться на бесполезное охлаждение фильтрационного потока. Такое состояние может установиться до момента полного смыкания кольца ледопородного ограждения или до достижения им заданной по условиям расчета толщины.

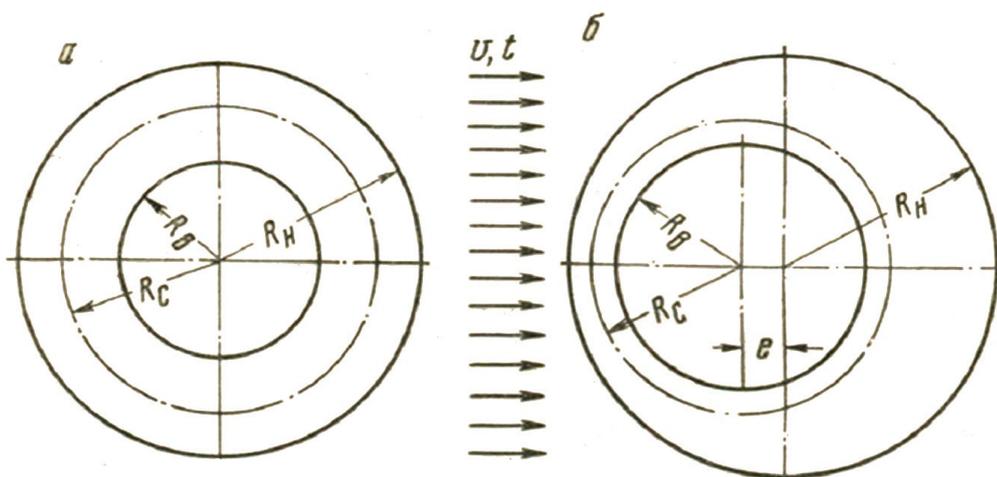


Рисунок 1.4 — Образование ледопородного ограждения: а – в породах с неподвижной водой; б – в фильтрующих породах

Отмеченные особенности замораживания фильтрующих пород приводят к тому, что расчётные методы времени для обычного замораживания при подвижных пластовых водах неприменимы. Указанное положение достаточно убедительно подтверждается и практикой. В большинстве случаев замораживание фильтрующих пород, рассчитанное без учета подвижности пластовых вод, заканчивалось неудачей и только после специальных мероприятий, направленных на снижение фильтрации или изменение теплового режима замораживания, удавалось создать ледопородное ограждение необходимых размеров. Это имело место при строительстве плотины на Горьковской

ГЭС, при проходке стволов на Соколовском карьере в Казахстане, на Запорожском железорудном комбинате и т. д.

Первой особенностью расчёта процесса замораживания фильтрующих пород является определение возможности смыкания отдельных ледопородных цилиндров вокруг каждой колонки в замкнутое ограждение в зависимости от скорости движения и температуры подземных вод. В этом случае должны быть известны следующие исходные данные: удельная теплоёмкость воды в породе C , Дж/(кг °С); плотность воды ρ , кг/м³; радиус расположения замораживающих колонок R_k , м; внутренний радиус замораживающей колонки r_0 , м; k_{f1} и k_{f2} – теплопроводность породы в замороженном и незамороженном состоянии, Вт/(м °С); естественная температура породного массива t_e , °С; температура замерзания воды t_0 , °С; температура холодоносителя в колонках t_p , °С; расстояние между смежными колонками S , м; скорость пластового потока u_c , м/ч; средний радиус промерзания одиночной колонки $\bar{\rho}$.

Полученные выше данные подставляются в неравенство(1.1).

$$\Phi = -\frac{k_{f1}(t_0 - t_p)}{(t_e - t_0)\sqrt{k_{f2}C\nu u_c r_0}} > 1.65\sqrt{\bar{\rho}lg} \left\{ 1 - \left(1.83 - \sqrt{2.36 - 1/\bar{\rho}^2} \right)^2 \right\} \quad (1.1)$$

Если левая часть неравенства окажется больше правой, то смыкание ледопородного ограждения будет обеспечено, в противном случае оно может не сомкнуться [7].

Второй особенностью расчета процесса замораживания фильтрующих пород является определение мощности замораживающей станции из условия смыкания ледопородного ограждения для участка фильтрующих пород.

В зарубежной практике широко используется формула, описанная Санджерсом и Сэйлсом в 1979 году, по которой можно рассчитать критическую скорость фильтрации, при которой произойдет смыкание ЛПО [24].

$$u_c = \frac{k_{f1}}{4S \cdot \ln\left(\frac{S}{4r_0}\right)} \frac{t_0 - t_p}{t_e - t_0} \quad (1.2)$$

Анализом устойчивости подземных сооружений с применением ЛПО занимались ученые Института мерзлотоведения им. Обручева С. С. Вялов, Ю. К. Зарецкий и др. Расчет смещений выполнен по двум предельным состояниям – по деформациям и по прочности. В расчетах авторы учитывали реологические свойства замороженных пород [1].

Модель упруго-пластично-вязкой неоднородной среды была разработана И. В. Баклашовым и Б. А. Картозия. В данной модели предлагается учитывать прочность и деформацию неоднородной среды в явном виде. В работе З. К. Ранева было показано, что предлагаемые методы не учитывают ряд специфических особенностей напряженно-деформированного состояния ЛПО, обусловленных технологией его образования и возможностью перехода замороженных пород в запредельное состояние (разупрочнение). З. К. Ранев разработал методику по определению толщины и деформаций ЛПО для шахтных стволов [2]. Расчет смещений ЛПО кольцевого сечения был выведен В. Н. Пуголовкиным [3]. Тем не менее, на сегодняшний день нет исследований устойчивости ЛПО некруглой формы для тоннелей, а существующие методики не позволяют вести корректный расчет смещений ЛПО и их устойчивости. Следовательно, несмотря на накопленный опыт, определение устойчивости тоннелей с применением ЛПО является актуальной задачей.

1.3 Анализ исследований и производственного опыта по замораживанию горных пород при проходке тоннелей

1.3.1 Отечественный опыт строительства

В России горизонтальное замораживание применяется при строительстве коллекторов в условиях плотной городской застройки, путевых и эскалаторных тоннелей метрополитенов, а также в шахтном строительстве при проходке откаточных и очистных штреков в дезинтегрированных породах. Рассмотрены следующие примеры строительства:

Яузский (Правобережный) разгрузочный канал. Замораживающие колонки были задавлены из двух стволов м навстречу друг другу. Колонки длиной по 34 м располагались вокруг сечения тоннеля по диаметру 3,5 м. Было задавлено десять колонок с расстоянием между ними 1,1 м. Время активного замораживания составило 20 сут при средней температуре замораживания $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Коллектор вдоль Большой Грузинской улицы. Способ замораживания горизонтальными колонками был применён на участке тоннеля длиной 115 м с глубиной заложения 4-9 м, диаметр коллектора составлял 2 м. Геологический разрез трассы тоннеля был представлен насыпными грунтами и песком, подстилаемыми юрскими глинами. Уровень грунтовых вод был вскрыт на глубине 2-2,5 м. Средняя температура замораживания составляла -32°C .

Коллектор под Новолюблинским каналом. Для проходки участка коллектора горизонтальные колонки задавливали на длину 18,0-18,8 м. Всего было задавлено 16 колонок с расстоянием между ними в верхней части тоннеля 0,6 м и 1 м на остальных участках. Время активного замораживания составило 16 сут при температуре замораживания -32°C .

Подводящий коллектор к Черкизовской насосной станции. Коллектор проходил на глубине 14-16 м при уровне грунтовых вод 5-6 м. Участок тоннеля длиной 800 м проходил в грунтах с высокой водопроницаемостью и коэффициентом фильтрации $0,1\div 1,5$ м/сут. Для замораживания данного участка было решено использовать вертикальные колонки. Глубина замораживания составляла 20-22 м, расстояние между рядами замораживающих колонок принималось равным 6 м. Общее число колонок составило 2800 шт [4].

Главный откаточный штрек на шахте «Бегичевская». Замораживание грунтов вертикальными скважинами, пробуренными с земной поверхности, применяли при сооружении главного откаточного штрека на шахте «Бегичевская» (Подмосковный угольный бассейн). При производстве работ по креплению штрека произошёл прорыв пльвуна в виде мелкозернистого песка и глины общим объёмом 1600 м^3 . Участок штрека протяженностью 40 м восстанавливали с применением способа замораживания вертикальными замораживающими колонками, опущенными с земной поверхности. Геологический разрез грунтов, залегающих над главным откаточным штреком (рисунок 1.5): растительный слой мощностью 0,6 м; суглинок – 2 м; глина – 1,4 м; мелкозернистый водоносный песок (пльвун) – 13,9 м; песчаная глина – 0,6 м; уголь – 0,7 м; песчаная глина – 0,8 м; уголь – 2,1 м; глина – 2,4 м.

Как видно из геологического разреза, кровлю главного откаточного штрека отделяли от водоносного песка прослойки песчаной глины и угля

небольшой мощности. Замораживающие колонки общим числом 80 штук расположили в трех прямолинейных рядах на расстоянии 2 м один от другого. Расстояние между скважинами в рядах приняли: 1,5 м – в контурных рядах и 2 м – в среднем ряду. Скважины бурили на глубину 23,2 м с общим временем бурения 30 сут. Активное замораживание горных пород составило 45 сут при температуре замораживания $-20\div-22$ °С. После придания ЛПО проектной толщины была продолжена проходка штрека. Постоянная крепь состояла из металлических рам с заполнениями промежутков между ними монолитным бетоном.

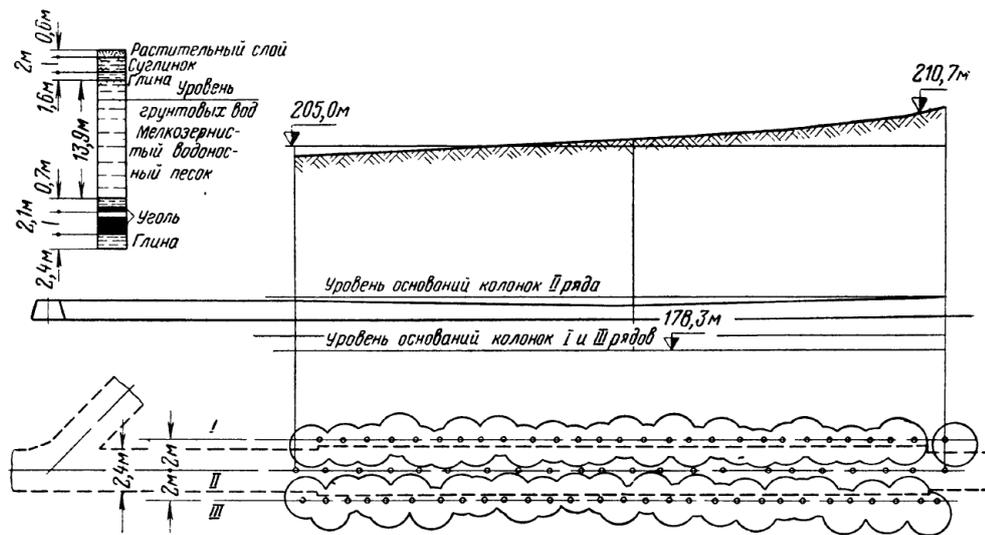


Рисунок 1.5 — Схема участка замораживания и расположение замораживающих скважин [19]

1.3.2 Мировой опыт

Технология замораживания горных пород с помощью горизонтальных замораживающих колонок нашла применение в практике строительства многих стран. Среди общемирового опыта следует отметить скандинавские страны. В связи со спецификой условий строительства подземных сооружений, обусловленной сложными геологическими условиями, в данных странах ряд проектов был выполнен с использованием способа замораживания горизонтально направленными колонками.

Норвегия

Норвегия, благодаря горному ландшафту, активно развивает систему тоннелей. Так, к 2017 году было построено почти 3000 км железнодорожных, автодорожных и подводных тоннелей. Общая протяженность гидротехнических тоннелей достигла 4000 км [25].

В целом устойчивые скальные массивы могут иметь зоны повышенной трещиноватости, а также депрессии, заполненные моренными отложениями. При пересечении таких зон необходимо применять специальные методы строительства для обеспечения безопасной проходки.

Ниже приводится анализ проектов, выполненных с использованием метода искусственного замораживания.

Тоннель Ослофьорд. Тоннель длиной 7,2 км является частью автотрассы, соединяющей муниципалитеты, разделенные фьордом к югу от г. Осло. Во время проведения геологических исследований было определено, что тоннель пересечет зону слабых горных пород, сформировавшуюся в конце ледникового периода и заполненную моренными отложениями. Верхняя часть этой области представляла собой смесь гравия, суглинка, песка под напором подземных вод равным 120 м. Нижняя часть заполнена обломочными горными породами (рисунок 1.6).

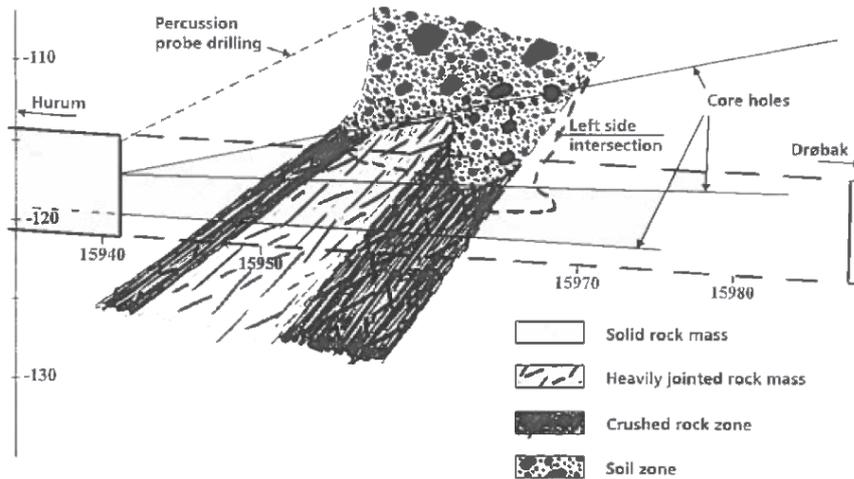


Рисунок 1.6 — Продольный разрез тоннеля Ослофьорд, проходящего через зону слабых пород [26]

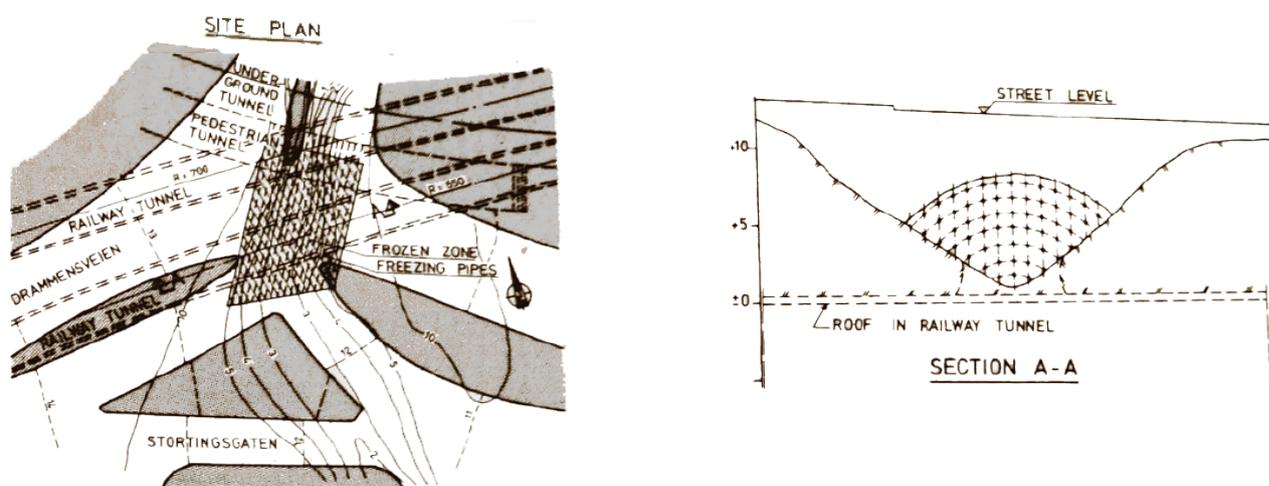
Проектом было предложено 2 метода стабилизации – струйная цементация этого участка или использование искусственного замораживания.

Первоначально была применена цементация и пробные 11 м³ бетона были закачаны в грунтовый массив. Однако, вследствие проблем с бурением и проектировавшимся значительным расходом бетона для работ по цементации массива, данный способ был отклонен как неэффективный.

Искусственное замораживание было осуществлено с помощью двух рядов горизонтальных замораживающих колонок с температурой рассола -28 °С для достижения 2-3 м толщины ледопородного ограждения. Общая площадь профиля тоннеля равнялась 130 м² [27]. Работы по бурению 105 скважин для замораживающих колонок и проведения температурного контроля заняли один год. Для достижения проектной температуры в ледопородном ограждении, потребовалось 12 недель непрерывного замораживания массива горных пород. Дальнейшая проходка через замороженный массив осуществлялась буровзрывным способом с заходками по 3 м. Временная крепь тоннеля состояла из 30-40 см слоя набрызгбетона. Затем была установлена постоянная крепь из железобетона толщиной 1-1,2 м. Тоннель был открыт в 2000 году после работ по проходке и установке крепи, занявших 15 недель.

Тоннель в центре г. Осло. Железнодорожный тоннель длиной 3,6 км, пересекающий центр г. Осло, был построен в 1980 году. Во время проектирования тоннеля была обнаружена депрессия в скальном массиве, дно

которой находилось непосредственно над кровлей тоннеля. Кроме того, проходка тоннеля осложнялась наличием действующих пешеходного и метро тоннелей, располагающихся в непосредственной близости от строящегося (рисунок 1.7 а). Таким образом, основное требование к новому тоннелю заключалось в том, чтобы его проходка не сопровождалась осадками в тоннелях, проходивших выше. Для решения этой задачи было принято решение использовать искусственное замораживание для стабилизации горных пород, состоящих из смеси песчанистого гравия и обломочных скальных пород, в депрессии над тоннелем (рисунок 1.7 б).



а) План участка строительства

б) Разрез А-А

Рисунок 1.7 — Общая схема строящегося участка и продольный разрез [28]

Было решено осуществить бурение скважин для замораживающих колонок из метротоннеля, который проходил несколько метров выше, параллельно строящемуся тоннелю (рисунок 1.8). Так как это была единственная возможность осуществлять работы по замораживанию без остановки транспортных операций в центре города, было принято решение производить работы по бурению в течение 3-4 часов ночного перерыва в движении поездов метро. Данная необходимость в значительной степени отразилась на времени производства работ.

В целом было пробурено 56 скважин с длиной 26 м на расстоянии 1-1,2 м друг от друга. Проектная толщина ЛПО составляла 5 м при замораживании с помощью фреона с температурой -15°C , что было осуществлено за 8 недель.

Дальнейшая проходка тоннеля осуществлялась буровзрывным способом. Постоянная крепь состояла из монолитного железобетона. В целом, объем замороженных пород составил 1100 м^3 . Полная стоимость работ по

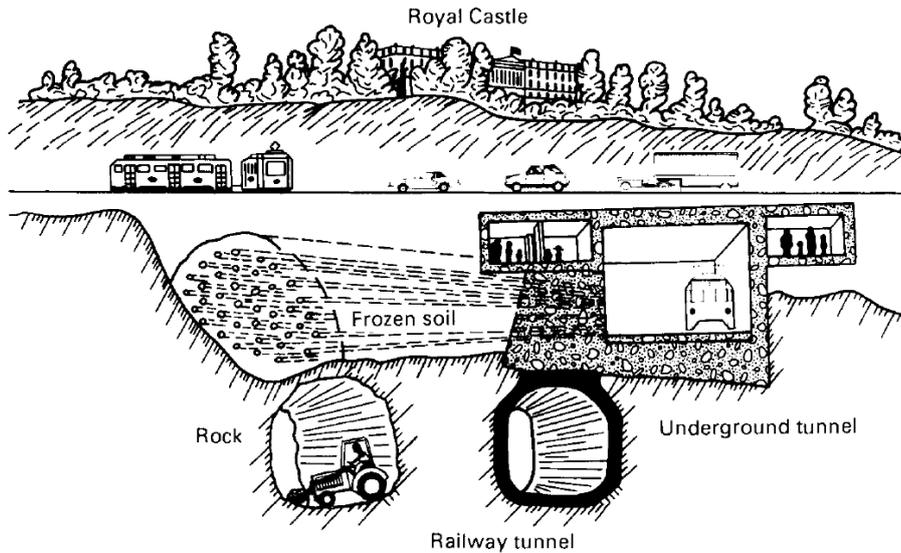


Рисунок 1.8 — Разрез систем тоннелей в центре г. Осло [28]

замораживанию составляла 720.000 USD в 1980 году, что соответствует 2,3 млн USD в пересчет на 2018 год.

Тоннель в центре г. Мосс. Данный тоннель входил в проект новой железнодорожной линии, соединяющей города Садбукта и Состад. Тоннель длиной 200 м пересекал слой водонасыщенных моренных отложений, залегающих на всем его протяжении. Проектом предусматривалось использовать метод искусственного замораживания для стабилизации всего участка. Проектная средняя температура в ЛПО составляла $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщина ЛПО должна достигать 3-4 м (рисунок 1.9).

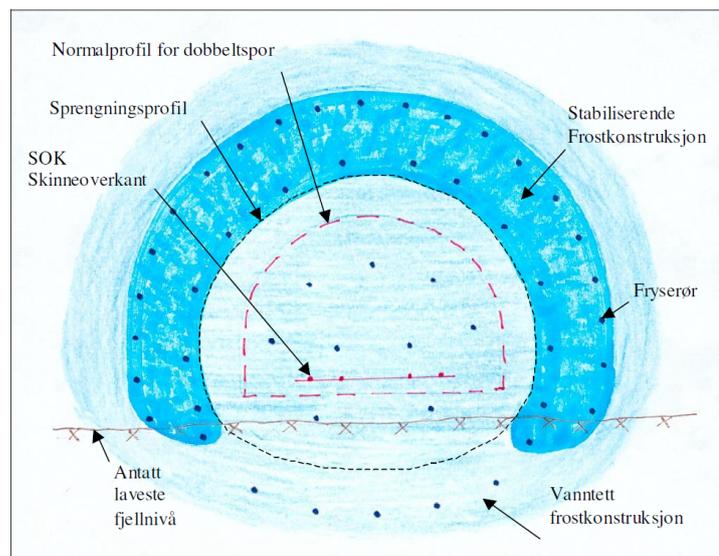


Рисунок 1.9 — Проект ЛПО для тоннеля в центре г. Мосс [29]

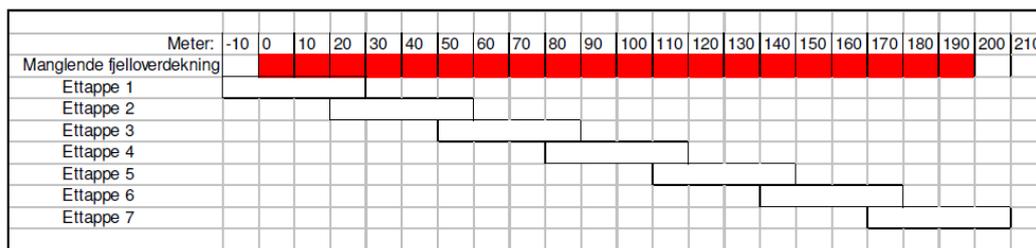


Рисунок 1.10 — График производства работ по формированию ЛПО в тоннеле города Мосс [29]

Работы по замораживанию ограничивались длиной замораживающих колонок, которая не превышала 40 м. Таким образом, процесс замораживания был разделен на 7 этапов с перекрытием в 10 м (рисунок 1.10).

В целом, проект по замораживанию должен был быть реализован в течении трёх лет, тогда работы по каждой секции занимали 5 месяцев.

Швеция

Проект Халландсос. Тоннель Халландсос расположен между городами Форслов и Бостард в северо-западной части Швеции и предназначен для железнодорожной линии, соединяющей Готенбург и Мальмо. Данный проект включал в себя строительство двух параллельных тоннелей длиной 8,7 км. Во время изыскательских работ были обнаружены многочисленные зоны слабых горных пород, из которых наиболее сложной оказалась зона Моллебак, заполненная сильно выветренным гнейсом и глинисто-песчаными материалами с высоким водосодержанием. Работы по проходке тоннелей начались в 1993 году, однако, вследствие проблем с финансированием, подготовка к проходке зоны Моллебак началась в 2011 году.

Метод искусственного замораживания представлялся самым эффективным для стабилизации горных пород в этом проекте. Было решено использовать горизонтальную схему замораживания, чтобы создать ЛПО толщиной 2 м с изотермой - 2 °С вокруг планируемого тоннеля диаметром 8 м. Проектируемая температура рассола составляла - 40 °С. Замораживание было осуществлено за 3 последовательных этапа, с 16 замораживающих колонок в каждом [30]. Замораживание в 233 метровой зоне Моллебак

было осуществлено в 2 этапа (рисунок 1.11). Полное время замораживания составляло около 180 дней. Дальнейшая проходка тоннеля осуществлялась тоннелепроходческим комплексом и была завершена за 3 недели. Постоянная крепь состояла из железобетонных тубингов.

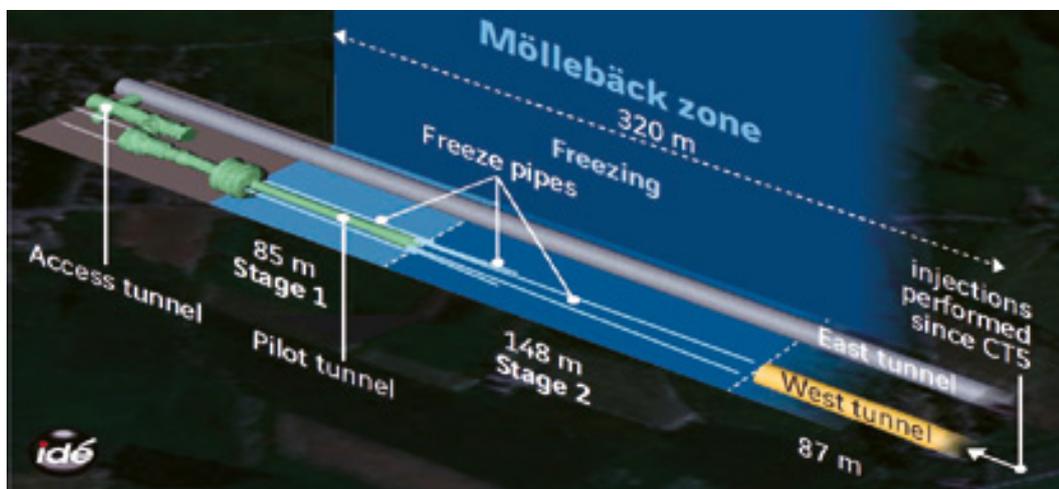


Рисунок 1.11 — Общая схема зоны Моллебак [31]

Тоннель линии Ботниа. Данный тоннель был построен для железнодорожной ветки в центре Швеции между городами Орнскольдсвик и Умео. Проходка тоннеля в основном велась по скальным породам, однако тоннель пересекал 95 метровую депрессию, заполненную глинистыми материалами. Для стабилизации этой зоны применялось искусственное замораживание (рисунок 1.12).

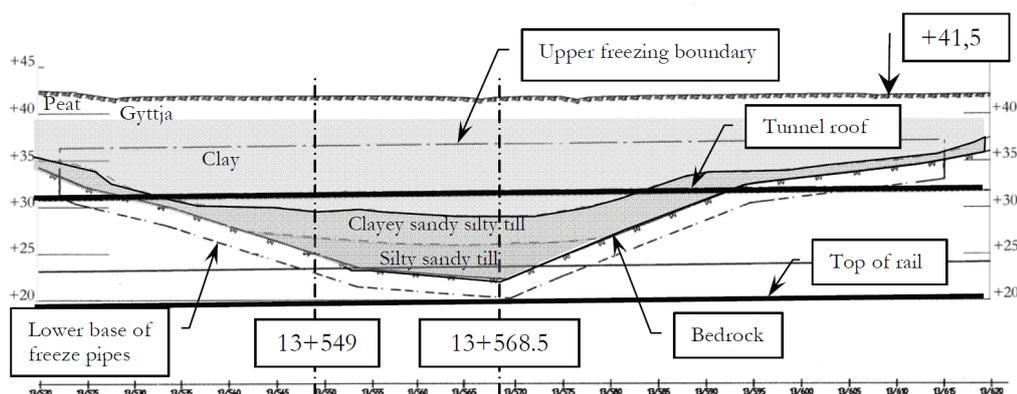


Рисунок 1.12 — Продольный разрез пересечения тоннелем Ботниа депрессии, заполненной глинистыми моренными материалами [32]

Замораживание осуществлялось 350 вертикальными замораживающими колонками (рисунок 1.13). Бурение скважин для замораживающих

колонок было выполнено за 5 месяцев – с декабря 2001 по апрель 2002. Замораживание с проектной температурой холодоносителя $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводилось 90 дней, в результате вокруг планируемого тоннеля было создано ЛПО толщиной 3 м. Затем, во время проходки тоннеля была возведена временная крепь, состоящая из торкретбетона. Постоянная крепь состояла из монолитного железобетона, работы по установке которой были завершены в мае 2003 года. Полностью работы по замораживанию были завершены в сентябре 2003 года, когда была отключена замораживающая станция.

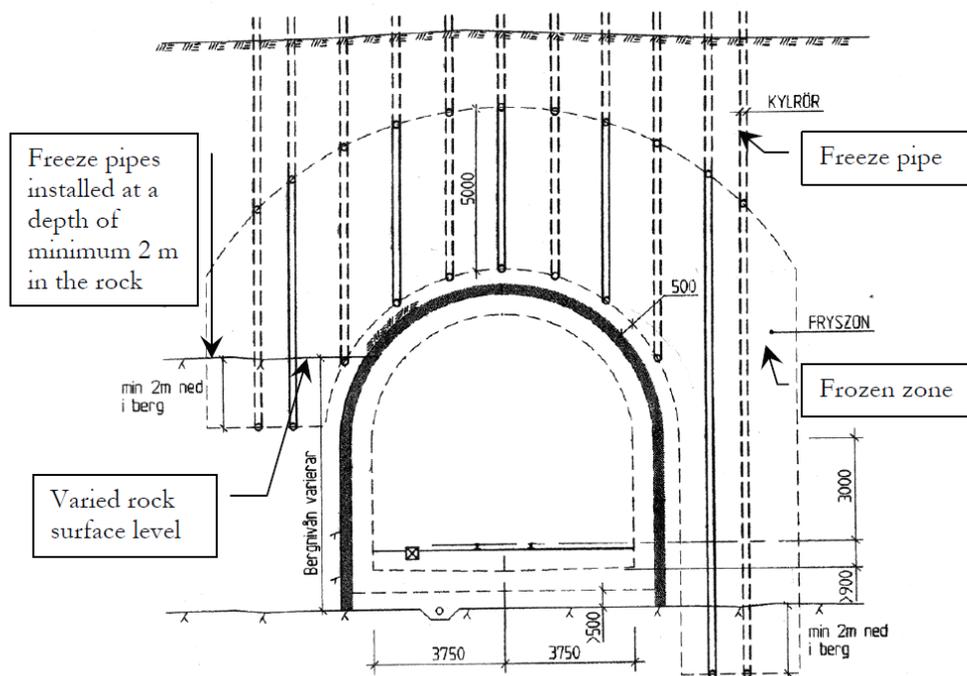


Рисунок 1.13 — Профиль тоннеля Ботниа [32]

Финляндия

Метротоннель в г. Хельсинки. Метод искусственного замораживания использовался при проходке метротоннеля в г. Хельсинки на глубине 25 м (рисунок 1.14). Строительство тоннеля осуществлялось в скальном массиве, состоящем из гранита и гнейса. Однако, в массиве скальных пород была обнаружена депрессия, сформированная во время континентального оледенения и заполненная моренными отложениями, включая песок, супесь и суглинок.

Данная депрессия была названа Клууви клефт. Длина депрессии, пересекаемой тоннелем, составляла 30 м.

Следует отметить, что метод струйной цементации был отвергнут, как неэффективный для стабилизации разнородного массива горных пород, заполняющих депрессию.

Бурение скважин для замораживающих колонок было осуществлено с 2 сторон от депрессии. Таким образом, замораживающие колонки перекрывали друг друга в центре зоны на 2,5 м. ЛПО имело толщину 2,5 м и было создано двумя рядами замораживающих колонок. Расстояние между колонками равнялось 1,9 м во внешнем контуре и 1,6 м во внутреннем. Расстояние между рядами колонок составляло 75 см. Замораживающая станция находилась на поверхности земли и имела 3 компрессора общей мощностью 280 кВт.

Для того чтобы создать ЛПО вокруг тоннеля с диаметром 6,5 м и длиной 30 м, замораживание производилось в течении 55 дней. Затем, после окончания работ по проходке тоннеля, была использована постоянная чугунная крепь. Промежуток между крепью и замороженными горными породами был заполнен торкретом и цементным раствором.

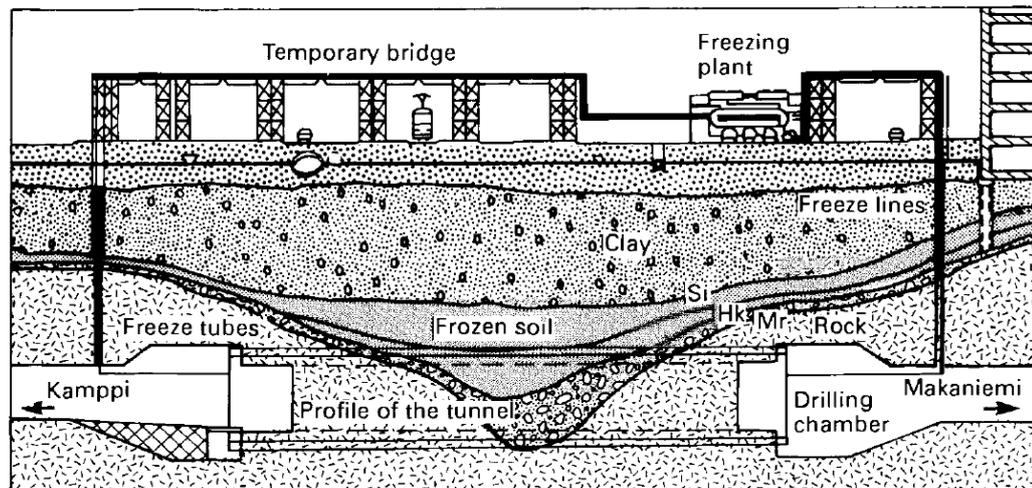


Рисунок 1.14 — Продольный разрез метротоннеля в г. Хельсинки [33]

Основные особенности проектов, рассмотренных выше, приведены в приложении А.

Анализ проектов по формированию ЛПО при строительстве тоннелей показал, что наиболее эффективным по времени замораживания и расходу холодоносителя оказался способ с использованием горизонтально направленных замораживающих колонок. Однако, сложность данного

способа определяется трудоёмкостью его применения и затратностью подготовительных операций. Вследствие учтённых недостатков, данный способ принято использовать когда очевидна экономическая целесообразность его применения по сравнению с замораживанием вертикальными колонками, либо когда горизонтальное замораживание – единственный возможный способ формирования ЛПО.

1.4 Основные выводы по главе, цель и задачи исследований

В результате анализа проведённых исследований по искусственному замораживанию горных пород можно сделать вывод, что данный способ нашел применение при строительстве подземных сооружений, таких как автодорожные, коллекторные и кабельные тоннели, шахты, тоннели метрополитена, строительство которых ведётся в сложных гидрогеологических условиях – при пересечении сильно обводнённых горных пород.

Анализ практического опыта использования способа искусственного замораживания горных пород горизонтально направленными колонками показал, что, несмотря на доказанную эффективность по сравнению с использованием вертикальных колонок, данный способ используется ограниченно, в первую очередь из-за трудоёмкости технологических операций по монтажу сети замораживающих колонок в тоннеле, сложности контроля за процессом формирования ЛПО и высокой стоимости подготовительных работ по замораживанию.

Методика расчета ЛПО для горизонтальных выработок, разработанная И. Д. Насоновым, М. Н. Шупликом, В. И. Ресиним и В.Н. Пуголовкиным, представленная в пособии [4], наиболее полно отражает этапы расчета ЛПО с учетом реологических свойств горных пород. При этом остаются неучтенными такие параметры, как определение устойчивости ЛПО, в том числе некруговой формы, способность ЛПО к увеличению толщины после завершения активной фазы замораживания, определение времени замораживания, учитывая специфику горизонтального замораживания.

Устойчивость ЛПО исследовалась в работах Б. А. Картозия, К. З. Ранева, А. А. Роменского. В результате их исследований была разработана методика

определения напряженно-деформированного состояния горных пород, формирующих ЛПО. Стоит отметить, что исследования устойчивости проводились для ЛПО вокруг шахтных стволов, сооружаемых вертикальными или наклонными колонками, устойчивость ЛПО горизонтальной формы оценена не была.

Целью данной работы является обоснование параметров технологии искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах на основе установления зависимости влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ЛПО, исследования свойства самопроизвольного увеличения размеров ЛПО после завершения активной фазы замораживания горных пород и оценки закономерности напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО».

Поставленная в работе цель потребовала решить следующие задачи:

- выполнить анализ теоретических и экспериментальных исследований искусственного замораживания горных пород при проходке горизонтальных выработок в водоносных породах;
- исследовать влияние теплопритока от земной поверхности на формирование ЛПО вокруг тоннеля;
- исследовать закономерности формирования ледопородного ограждения во времени;
- исследовать возможность применения существующих расчетных формул по определению времени замораживания для шахтных стволов к замораживанию горизонтальными колонками при проходке тоннелей;
- исследовать влияние тепловой инерции на закономерность формирования ледопородного ограждения;
- разработать методику по исследованию реологических свойств мерзлых пород в условиях объемного напряженного состояния и методику компьютерного моделирования оценки напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО»;
- разработать рекомендации по технологии искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах.

Глава 2. Исследование процесса формирования ледопородного ограждения при горизонтальном замораживании

2.1 Оценка влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ледопородного ограждения вокруг тоннеля

Строительство тоннелей зачастую осуществляют на небольшой глубине от поверхности земли (4-20 м). В таких случаях теплоприток от земной поверхности может повлиять на закономерность формирования ЛПО. При значительном теплопритоке толщина ЛПО может формироваться неравномерно по периметру. В верхней части со стороны земной поверхности толщина может оказаться тоньше чем в нижней, что может отразиться на неравномерности напряжённо-деформируемого состояния по периметру ЛПО, и, как следствие, невозможностью использования апробированных расчётных методов по определению толщины ограждения и параметров технологии замораживания, используемых при проектировании вертикальных выработок с равномерной толщиной ограждения по периметру выработки. Для оценки влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования толщины ЛПО, создаваемого через замораживающие колонки, расположенными параллельно оси тоннеля, рассмотрим задачу в следующей постановке.

Ледопородное ограждение (рисунок 2.1) расположено на глубине H от поверхности земли, горные породы однородные с коэффициентом теплопроводности λ . Температурное поле в рассматриваемые промежутки времени – стационарно, температура горных пород – t_2 , постоянная по глубине, на границе ЛПО температура постоянная, равная температуре замерзания воды – t_3 .

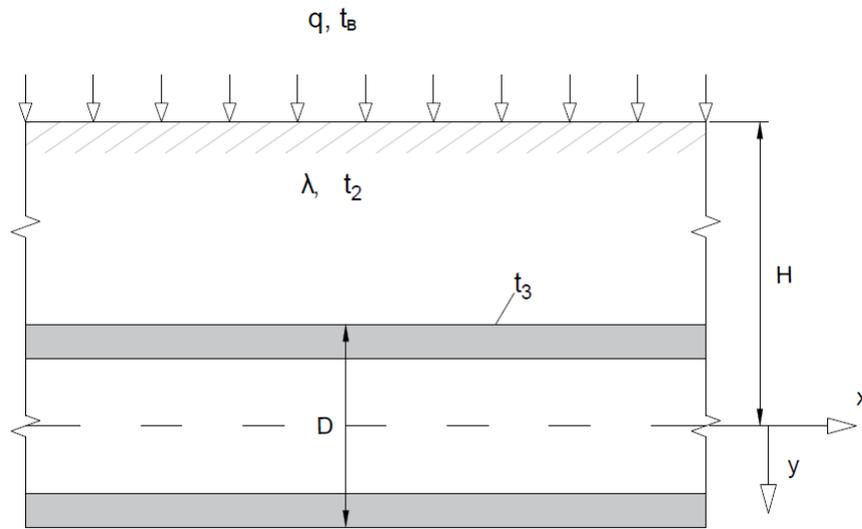


Рисунок 2.1 — Расчетная схема влияния теплопритока от земной поверхности к ЛПО

При принятых условиях температурное поле T вокруг ЛПО может быть описано зависимостью, полученной Форхгеймером [34]:

$$T = \frac{1}{C_1} \left[\ln \sqrt{x^2 + (y + a)^2} - \ln \sqrt{x^2 + (y - a)^2} + C_2 \right],$$

где

$$C_1 = \frac{1}{t_3 - t_2} \ln \left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\frac{H^2}{(D/2)^2} - 1} \right], \quad (2.1)$$

$$C_2 = \frac{t_2}{t_3 - t_2} \ln \left[\frac{2H}{D} + \sqrt{\frac{H^2}{(D/2)^2} - 1} \right],$$

$$a = \sqrt{H^2 - \frac{D}{2}},$$

где значения C_1 , C_2 , a – величины постоянные; x, y – координаты.

Используя вышеприведённые выражения определим градиент температур на поверхности земли при $y=0$:

$$\frac{\delta t}{\delta y} = \frac{2a}{C_1(x^2 + a^2)}$$

Зная градиент температур на поверхности земли можно определить количество тепла передаваемого ЛПО длиной 1 м и шириной dx :

$$\lambda \frac{\delta t}{\delta y} dx = -\frac{2\lambda \cdot a}{C_1(x^2 + a^2)} dx$$

Считаем, что тепло, притекающее от земной поверхности, распространяется бесконечно в обе стороны x . В такой постановке количество тепла, поступающее к ЛПО длиной 1 м, определяется из решения следующего интегрального уравнения:

$$q = - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\lambda \cdot a}{C_1(x^2 + a^2)} dx = - \left[\frac{2\lambda}{C_1} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{a} \right) \right]_{-\infty}^{+\infty} = -\pi \frac{2\lambda}{C_1} \quad (2.2)$$

Зная значение C_1 (формула 2.1) и подставляя его в формулу 2.2, получим следующее выражение для определения количества тепла q , поступающего от поверхности земли к 1 м ЛПО:

$$q = - \frac{2\pi\lambda(t_3 - t_2)}{\ln \left(\frac{2H}{D} + \sqrt{\frac{H^2}{(D/2)^2} - 1} \right)} \quad (2.3)$$

В формуле (2.3) знак минус означает, что теплоприток от земной поверхности поступает к ЛПО.

В диссертационной работе были проведены расчеты и проанализированы результаты по определению теплопритока от поверхности земли к поверхности ЛПО по полученной зависимости (2.3). В частности, были выполнены расчеты при следующих исходных данных: температура горных пород $+10$ °С; температура замерзания воды на границе ЛПО -0 °С; теплопроводность горных пород $-2,33$ Вт/(м °С); глубина залегания ЛПО от поверхности земли $-4;6;8;10;15$ м.

Результаты расчетов приведены в таблице 1. Анализ полученных расчетов показывает, что теплоприток от земной поверхности к ЛПО на малых глубинах (4-10 м) может быть значительным (от 70 до до 115 Вт/м², что приведет к неравномерному формированию ЛПО по периметру.

Следует отметить, что теплоприток к ЛПО со стороны массива горных пород, как правило, не превышает 10-50 Вт/м².

Таким образом, теплоприток от земной поверхности может превышать естественный теплоприток от массива горных пород в 2-10 раз, что необходимо учитывать при проектировании технологических параметров процесса замораживания вблизи земной поверхности.

Следовательно, необходимо решить задачу, когда учитывать теплоприток от земной поверхности, а когда им можно пренебречь и использовать

Таблица 1 — Результаты расчетов по определению теплового потока от поверхности земли к ЛПО

H	D	H/D	q
[м]	[м]	[-]	[Вт/м ²]
4	4	1,0	82,7
	5,2	0,8	77,3
	6	0,7	73,9
6	4	1,5	75,9
	5,2	1,2	73,1
	6	1,0	70,8
8	4	2,0	70,9
	5,2	1,5	69,7
	6	1,3	68,1
10	4	2,5	67,1
	5,2	1,9	66,8
	6	1,7	65,8
15	4	3,8	60,2
	5,2	2,9	61,4
	6	2,5	61,2

расчетные методы проектирования, используемые для вертикальных выработок, где тепловые потоки к ЛПО от горных пород принимаются равномерными по периметру ограждения.

Анализ выполненных расчетов по формуле (2.3) при различных исходных данных показывает, что тепловой поток от поверхности земли в основном зависит от соотношения H/D и коэффициента теплопроводности горных пород.

Как видно из табл. 1, при отношении $H/D > 2,5 - 3$ тепловой поток от поверхности земли изменяется незначительно ($\cong 3 - 5\%$) и им можно пренебречь, а учитывать только теплоприток от окружающего массива.

Полученное в расчётах соотношение $H/D > 2,5 - 3$ справедливо для фиксированного значения коэффициента теплопроводности. Учитывая линейную зависимость теплопритока от коэффициента теплопроводности найдём

соотношение H/D , отнесённого к единице теплопроводности, при значении которого теплоприток от земной поверхности можно не учитывать.

Обработка результатов расчётов показала, что с погрешностью $\pm(5-7)\%$ тепловой поток от земной поверхности к ЛПО можно не учитывать, если отношение глубины залегания ЛПО – H , отнесённое к диаметру ЛПО – D будет больше или равно $(1,5 - 2) \cdot \lambda$, т.е. $H/D \geq (1,5 - 2) \cdot \lambda$.

2.2 Сравнительный анализ расчётных формул по определению времени замораживания при отсутствии движения подземных вод

Основными параметрами при определении времени замораживания являются толщина ЛПО, температура замораживания, естественная температура породного массива, его теплопроводность, внешний теплоприток от породного массива к ЛПО и другие параметры. В данной главе нами проведен анализ существующих методов определения времени замораживания, широко используемых при расчетах в реальных проектах. К настоящему времени для определения времени замораживания используют следующие методы: балансовый метод, метод Х. Р. Хакимова, метод Н. Г. Трупака и метод Я. А. Дормана.

Метод теплового баланса основан на теплообмене между замораживающими колонками и окружающими их породами [35]. Он наиболее широко применяется для расчета времени замораживания. Количество холода, необходимое для замораживания Q_3 :

$$Q_3 = q_3 \cdot V ,$$

где V – объем породы, подлежащей замораживанию; $V = \pi(R_H^2 - R_B^2)H$; R_B – радиус ствола в проходке; $R_H = R_B + E$; – толщина ЛПО; H – глубина замораживания; q_3 – количество холода, необходимое для замораживания 1 м^3 породы до заданной температуры:

$$q_3 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 ,$$

где q_1 – количество холода, необходимое для охлаждения воды в 1 м^3 породы от естественной температуры t_e до температуры замерзания t_0 :

$$q_1 = V_B \cdot \gamma_B \cdot C_B \cdot (t_e - t_0) ,$$

q_2 – количество холода, идущее на отбор скрытой теплоты льдообразования:

$$q_2 = V_B \cdot \gamma_B \cdot \sigma ,$$

q_3 – количество холода, идущее на охлаждение льда от температуры льдообразования до заданной температуры замораживания t_{cp} :

$$q_3 = V_L \cdot \gamma_L \cdot C_L \cdot (t_0 - t_{cp}) ,$$

q_4 – количество холода, которое необходимо для охлаждения скелета горной породы от его естественной температуры до температуры замораживания:

$$q_4 = V_n \cdot \gamma_n \cdot C_n (t_e - t_{cp})$$

В этих формулах V_B, V_n – соответственно, объем воды и объем скелета в 1 м^3 породы; $\gamma_B, \gamma_L, \gamma_n$ – плотность, соответственно, воды, льда и скелета породы; C_B, C_L, C_n – удельная теплоёмкость воды, льда и скелета породы; σ – скрытая теплота льдообразования.

Количество холода, необходимое для охлаждения окружающих ледопородное ограждение пород Q_{ox} определяется по формуле 2.4:

$$Q_{ox} = 2\pi(R_H + R_B)H \cdot q_{ox} , \quad (2.4)$$

где q_{ox} – теплоприток к 1 м^2 поверхности ледопородного ограждения.

Теплопоглощающая способность замораживающих колонок Q_k :

$$Q_k = F \cdot q_f ,$$

где F – поверхность замораживающих колонок; q_f – величина удельного теплового потока.

Продолжительность работы замораживающей станции в активный период τ , сут:

$$\tau = \frac{Q_3}{[(Q_k - Q_{ox})24]} \quad (2.5)$$

Анализ рассматриваемого метода определения времени замораживания показал, что отсутствие прямой зависимости между параметрами замораживаемого массива горных пород и теплопоглощающими свойствами колонок приводит к недостаточной точности определения времени замораживания. Коэффициенты удельного теплового потока и теплопритока к поверхности

ледопородного ограждения определяются как постоянные – не учитывается их изменение во время замораживания.

При строительстве горно-технических сооружений с применением способа замораживания может быть использована методика профессора Х. Р. Хакимова, который вывел формулу для расчета времени замораживания ледопородного ограждения до проектной толщины, проанализировав известное уравнение теплового баланса – так называемую «задачу Стефана», а также учитывая исследования И. А. Чарного, Г. М. Мариупольского и Н. Г. Трупака [14]. Его метод основан на следующем: неустановившееся движение тепла рассматривается как последовательная смена стационарных состояний, т. е. предполагается, что распределение температуры в горных породах в некоторый момент времени стационарное и зависит только от радиуса промерзания. В действительности горные породы обладают настолько большим тепловым сопротивлением, что влияние замораживающей колонки, имеющей конечную температуру, за конечный промежуток времени практически не может распространяться на бесконечно большое расстояние. В частности, из опыта замораживания горных пород установлено, что влияние температуры замораживающей колонки становится практически неуловимым на расстоянии, равном 4,5-5,5 радиуса промерзания.

Продолжительность смыкания отдельных ледопородных цилиндров, сформированных вокруг каждой из замораживающих колонок $\tau_{см}$ определяется из выражения 2.6:

$$\tau_{см} = \frac{1}{2\lambda_1(t_0 - t_e)} \left[(1 - n) \cdot \omega \cdot \gamma \cdot i \cdot \sigma + c_1 \cdot \gamma_1 \cdot t_e + c_2 \cdot \gamma_2 \cdot t_e \left(\frac{a^2 - 1}{2\ln(a)} - 1 \right) \right] \cdot \left(\varepsilon^2 \ln \frac{\varepsilon}{r_0} - \frac{\varepsilon^2 - r_0^2}{2} \right) + \frac{c_1 \gamma_1}{2\lambda_1} \cdot \left(\frac{\varepsilon^2 - r_0^2}{2} \right) - \frac{c_1 \gamma_1 r_0^2}{2\lambda_1} \frac{r_0^2}{2} \varphi(z), \quad (2.6)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности мёрзлых горных пород; λ_2 – коэффициент теплопроводности талых горных пород; n — пористость горной породы; ω – весовая влажность горной породы; σ – скрытая теплота плавления льда; i — льдистость, т. е. отношение веса льда к весу всей воды в горной породе; c_1 — теплоёмкость мёрзлых горных пород; c_2 – теплоёмкость талых горных пород; γ_1 – объёмный вес мёрзлых горных пород; γ_2 – объёмный вес талых горных пород; t_0 — температура горных пород, непосредственно

прилегающих к поверхности замораживающей колонки; t_e — естественная температура горных пород; γ — удельный вес горных пород; $a = \frac{R}{\varepsilon}$; ε — радиус промерзания; r_0 — внешний радиус замораживающей колонки; R — радиус влияния замораживания.

После смыкания отдельных ледопородных цилиндров происходит формирование единого ледопородного ограждения. Учитывается внешнее промерзание в области $R_\varepsilon > (R_0 + \delta_0)$ и внутреннее промерзание в области $R_\varepsilon < (R_0 - \delta_0)$.

R_0 — радиус окружности, по которой расположены замораживающие колонки; R_ε — текущая координата, отсчитываемая от центра окружности радиуса R_0 ; $\delta_0 = \frac{\pi l^2 N}{16\pi R_0}$. Формула для определения времени замораживания при внешнем промерзании τ_A имеет вид:

$$\tau_A = \frac{1}{2\lambda_1(t_{cp})} \left[(1-n)\omega\gamma i\sigma + c_1\gamma_1 t_e + c_2\gamma_2 t_e \left(\frac{a^2 - 1}{2\ln(a)} - 1 \right) \right] \cdot \left[R_\varepsilon^2 \ln \frac{R_\varepsilon}{R_0 + \delta_0} - \frac{R_\varepsilon^2 - (R_0 + \delta_0)^2}{2} \right] + \frac{c_1\gamma_1}{2\lambda_1} \cdot \frac{R_\varepsilon^2 - (R_0 + \delta_0)^2}{2} \quad (2.7)$$

Для внутреннего промерзания τ_A определяется по формуле:

$$\tau_A = \frac{1}{2\lambda_1 t_{cp}} \left[(1-n)\omega\gamma i\sigma + c_1\gamma_1 t_e + c_2\gamma_2 t_e \left(\frac{a^2 - 1}{2\ln(a)} - 1 \right) \right] \cdot \left[R_\varepsilon^2 \ln \frac{R_\varepsilon}{R_0 - \delta_0} - \frac{R_\varepsilon^2 - (R_0 - \delta_0)^2}{2} \right] + \frac{c_1\gamma_1}{2\lambda_1} \cdot \frac{R_\varepsilon^2 - (R_0 - \delta_0)^2}{2}, \quad (2.8)$$

где $a = \frac{R_0}{R_0 - R_\varepsilon}$; τ_A — дополнительное время в часах в период замораживания с момента смыкания ледопородных цилиндров до получения заданной толщины ЛПО; N — количество скважин; l — расстояние между замораживающими колонками. Общая продолжительность формирования ледопородного ограждения τ в сут:

$$\tau = \frac{\tau_{см} + \tau_A}{24}$$

Анализ приведенных зависимостей показал, что данный метод учитывает теплофизические свойства горных пород при наличии допущений и ограничений, принятых автором:

1. Предположение, что между радиусом промерзания и радиусом истока тепла существует линейная зависимость;
2. Горные породы однородны и изотропны;

3. Тепловые потоки в любой плоскости, нормальной к оси замораживающей колонки, одинаковы. На поверхности колонки поддерживается постоянная температура;
4. Теплоёмкость и теплопроводность в мёрзлой и талой зонах горных пород в пределах практических изменений температуры остаются постоянными.

В практике подземного строительства время искусственного замораживания при проходке шахтных стволов определяется по методу профессора Н. Г. Трупака [8; 36; 37]. Для определения времени замораживания Н. Г. Трупак предложил следующее выражение:

$$\tau = \frac{\rho(r_2^2 - r_1^2)}{2(t_0 - t_1)\alpha_1 \cdot r_0} + \frac{\rho}{(t_0 - t_1)\lambda_1} \left[\frac{r_2^2}{2} \ln \frac{r_2}{r_0} - \left(\frac{r_2^2}{4} - \frac{r_0^2}{4} \right) \right], \quad (2.9)$$

где ρ – теплосодержание породы; t_1 – средняя температура охлаждающего рассола в замораживающей колонке; t_0 – температура промерзания пород; d_2 – диаметр образуемого ледопородного цилиндра; r_0 – внутренний радиус замораживающей колонки; r_2 – внешний радиус замораживаемого ледопородного цилиндра; λ_1 – коэффициент теплопроводности мёрзлой горной породы; α_1 – коэффициент теплопередачи от рассола к стенке замораживающей колонки.

Стоит отметить, что Н. Г. Трупак также вывел упрощённый вариант формулы (2.9). Для учета теплопритока от земной поверхности необходимо ввести коэффициент ψ , определяющий отношение величины земного теплопритока q к теплосодержанию ρ ледопородного цилиндра.

Тогда уравнение (2.9) будет иметь вид:

$$\tau = \frac{(1 + \psi)\rho d_2^2}{8(t_0 - t_1)\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (2.10)$$

Анализ расчетных зависимостей, Н. Г. предложенный Трупаком, показал, что основной недостаток способа – определение времени из учета работы одиночной колонки, что снижает его точность. Также как и в методе теплового баланса учитывается усредненная температура в зоне промерзания и постоянный коэффициент теплопритока от земной поверхности к ледопородному ограждению.

Применительно к практике замораживания горных пород в метростроении используют формулу, полученную Дорманом Я. А. [6; 38], которая имеет

ВИД:

$$\tau = \frac{1,3\alpha E [(1 - \omega_{cp})\rho_{\Gamma}c_{\Gamma}(t_0 - t_1) + \omega_{cp}\rho_{\text{В}}(t_1 + C_{\lambda} + c_{\lambda}t_0)]}{24 \cdot \pi d \alpha_k}, \quad (2.11)$$

где ω_{cp} – средняя влажность горной породы; ρ_{Γ} – средняя плотность горной породы; c_{Γ} – удельная теплоёмкость твердых частиц горной породы; $\rho_{\text{В}}$ – плотность воды; C_{λ} – скрытая теплота льдообразования; c_{λ} – удельная теплоёмкость льда; α_k – коэффициент теплопередачи наружной поверхности замораживающих колонок к горным породам.

Необходимо отметить, что формула (2.11) является модернизированной версией идентичной формулы теплового баланса и нуждается в корректировке, учитывая недостатки балансового метода, перечисленные выше.

Соответственно, к перечисленным недостаткам балансового метода можно добавить отсутствие показателей средней температуры в зоне промерзания и теплопритока от массива горных пород к ледопородному ограждению.

В диссертационной работе проведён анализ сравнительных расчетов по определению времени замораживания. Используя исходные данные для произвольного шахтного ствола, проходимого в обводненных песках средней плотности на глубину 50 м, были получены зависимости времени создания ЛПО до проектной толщины от параметров, оказывающих наибольшее влияние на процесс замораживания, с которыми можно ознакомиться в Приложении Б.

Результаты проведенных расчетов приведены на рисунках 2.2- 2.6. Полученные графики показывают, как изменится время замораживания при изменении одного параметра. При этом считается, что остальные параметры неизменны.

Толщина ледопородного ограждения – обязательный параметр, который учитывается во всех рассмотренных методах. Приведенные на рисунке 2.2 графики показывают зависимость времени замораживания от изменения толщины ЛПО.

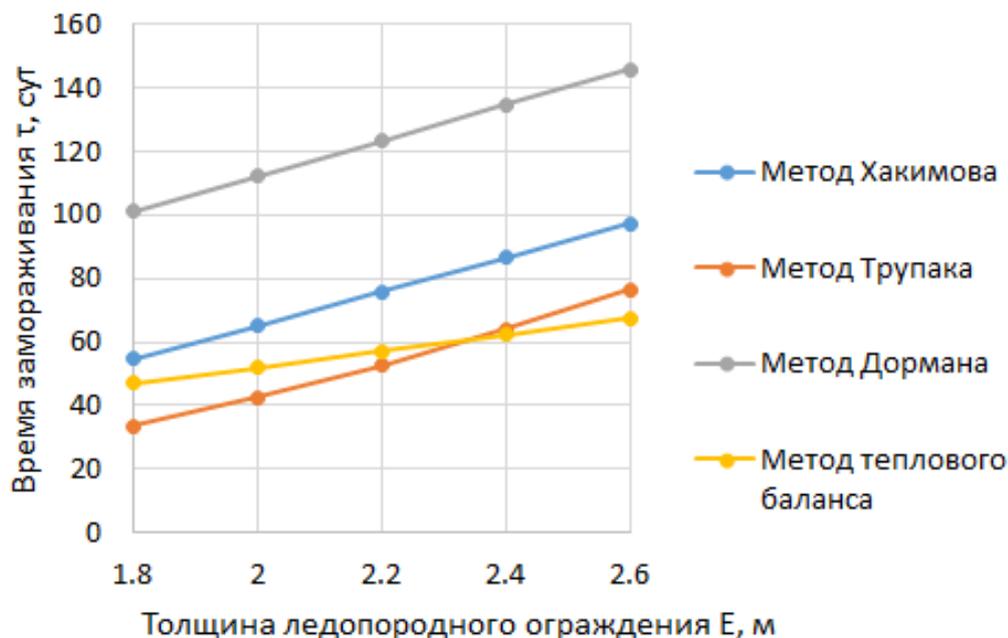


Рисунок 2.2 — Зависимость времени замораживания от толщины ледопородного ограждения

Анализ приведенных расчетных зависимостей на рисунке 2.2 показал, что различия между методами Х. Р. Хакимова, Н. Г. Трупака и теплового баланса составляют 5-10 суток при толщине ЛПО от 1,8 до 2 м. Дальнейшее увеличение толщины ЛПО приводит к сокращению времени замораживания, определенного по балансовому методу по сравнению с другими перечисленными методами. Время, определенное по методу Я. А. Дормана, в 2 раза больше чем в остальных методах вне зависимости от толщины ЛПО.

Температура холодоносителя, наряду с толщиной ЛПО, является еще одним ключевым параметром при определении времени замораживания, учитываемым во всех рассмотренных методах (рисунок 2.3).

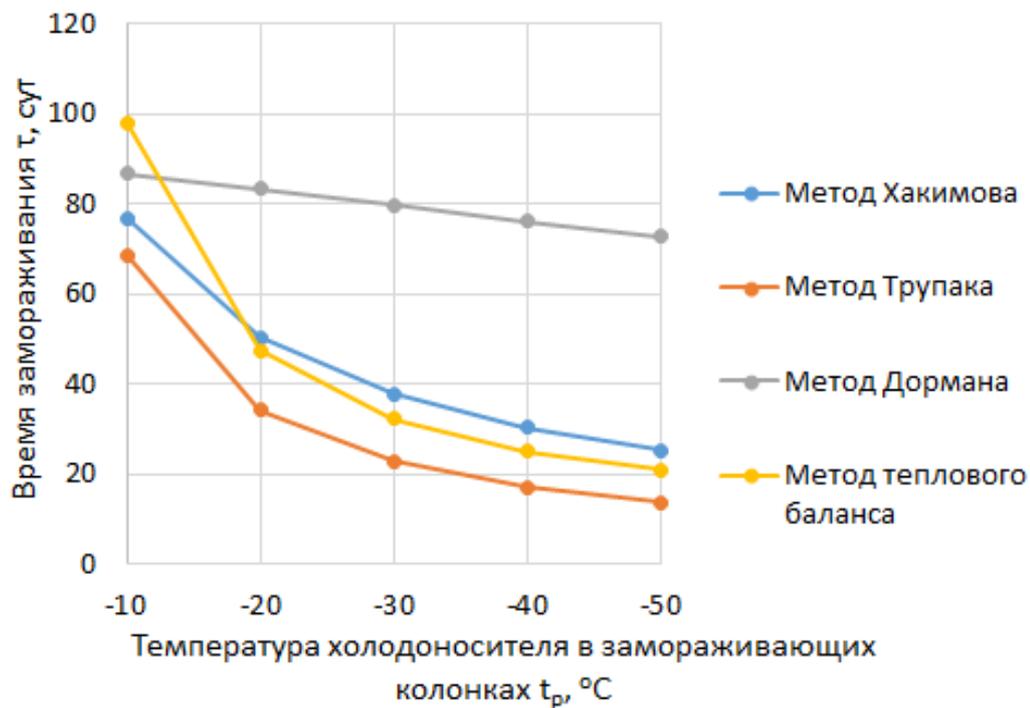


Рисунок 2.3 — Зависимость времени замораживания от средней температуры рассола в замораживающей колонке

Анализ расчетных методов определения времени замораживания на рисунке 2.3 показал, что при температуре замораживания, не превышающей -10 °C, все рассмотренные методы показывают приблизительно одинаковое время замораживания, от 70 дней по методу Трупака Н. Г. до 98 дней по методу теплового баланса. Резкое сокращение времени замораживания происходит при температуре холодоносителя около -20 °C. При дальнейшем понижении температуры замораживания методы теплового баланса, Хакимова Х. Р. и Трупака Н. Г. показывают сопоставимые результаты, в отличие от метода Дормана Я. А. Как это видно из представленного графика, изменение температуры замораживания не оказывает значительного влияния на время, определенное по методу Дормана Я. А.

Естественная температура замораживаемого массива горных пород также является важным показателем, влияющим на время замораживания, что наглядно показывают графики на рисунке 2.4.

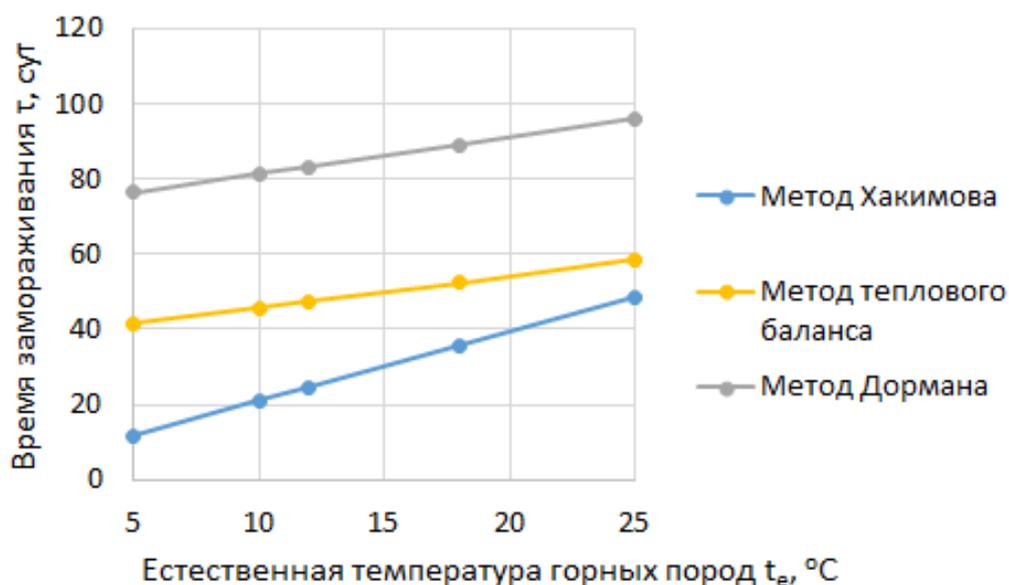


Рисунок 2.4 — Зависимость времени замораживания от естественной температуры горных пород

Анализ графиков на рисунке 2.4 показал, что при низкой естественной температуре горных пород время замораживания, определенное по методу Х.Р. Хакимова, является наименьшим из рассматриваемых методов. Время, определенное по методу теплового баланса, превышает время метода Х. Р. Хакимова более чем в два раза. При увеличении естественной температуры горных пород ($t_e > 20$ °C) метод Х. Р. Хакимова и метод теплового баланса дают приблизительно одинаковые результаты. Время, определенное по методу Я. А. Дормана, значительно превышает результаты других рассматриваемых методов.

Теплопроводность замороженных горных пород учитывается в методах теплового баланса, Х. Р. Хакимова и Н. Г. Трупака, что демонстрирует рисунок 2.5.

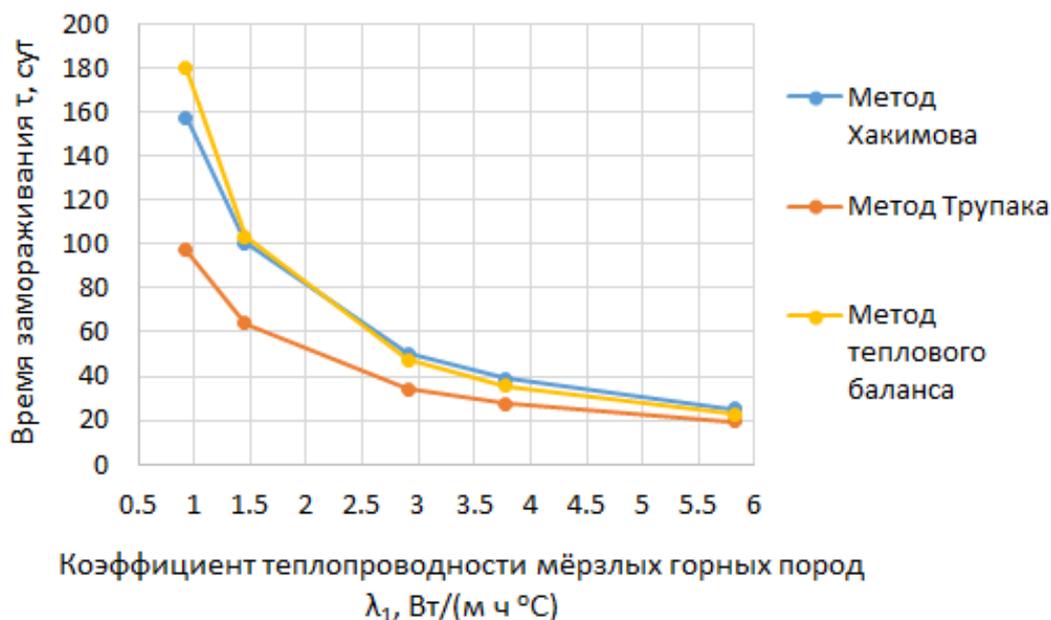


Рисунок 2.5 — Зависимость времени замораживания от теплопроводности замороженного массива горных пород

Как видно из представленного графика, коэффициент теплопроводности при значении до 3 Вт/(м °С) имеет наибольшее влияние на время замораживания. Увеличение этого коэффициента для заданных условий почти в 3 раза сокращает время замораживания.

Внешний теплоприток от массива горных пород учитывается как в методе теплового баланса так и в методе Трупака Н. Г. Зависимость времени замораживания от этого параметра показывают графики на рисунке 2.6.

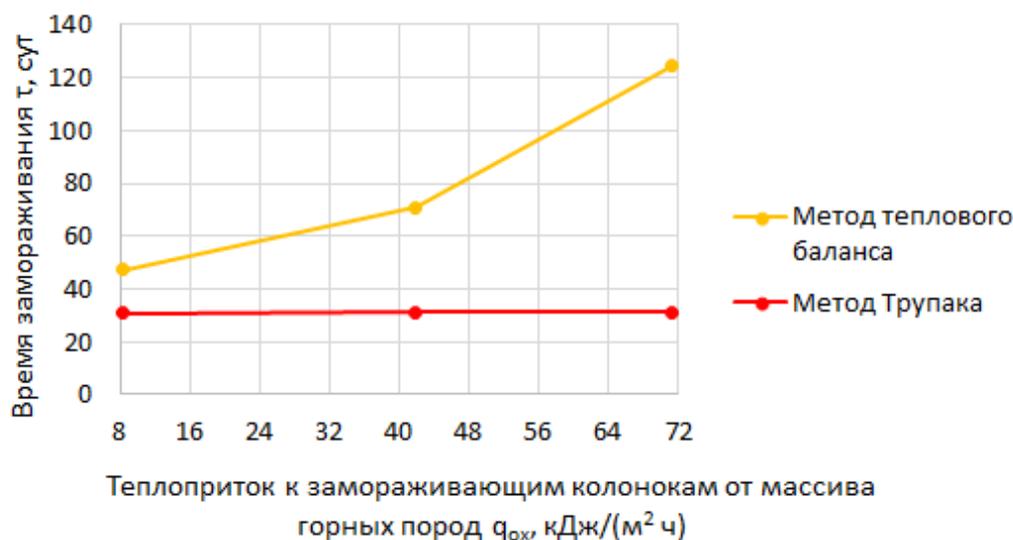


Рисунок 2.6 — Зависимость времени замораживания от внешнего теплопритока к 1м² поверхности ледопородного ограждения

Как видно из графика на рисунке 2.6, расчет времени по формуле теплового баланса возможен только в пределах выполнения неравенства $Q_{ox} < Q_{ct}$, т. е. когда количество тепла, необходимое для охлаждения окружающих пород меньше хладопроизводительности замораживающей станции.

В данной главе проведен анализ указанных расчетных методик (теплового баланса, Х. Р. Хакимова, Н. Г. Трупака и Я. А. Дормана) применительно к замораживанию с помощью горизонтальных замораживающих колонок при строительстве тоннелей. В качестве объекта исследования были выбраны проекты, рассмотренные в главе 1. Наиболее полные данные известны для тоннелей Яузского разгрузочного канала, коллектора под Новолюблинским тоннелем и тоннеля в центре г. Осло. Результаты расчета представлены в таблице 2. Как видно из таблицы 2, значения времени замораживания

Таблица 2 — Время замораживания горизонтальными колонками

Проекты:	Реальное время замораживания	Расчетное время по методике:			
		Теплового баланса	Хакимова Х. Р.	Трупака Н. Г.	Дормана Я. А.
	сут	сут	сут	сут	сут
Тоннель в центре г. Осло	60	60	1018	622	223
Яузский разгрузочный канал	20	12	14.1	1.2	24
Коллектор под Новолюблинским каналом	16	48	27	6.7	35

для разных проектов отличаются. Так, для тоннеля в центре г. Осло была использована схема некругового замораживания части обводненного массива горных пород. Время, рассчитанное по методу теплового баланса, соответствует реальному времени замораживания, тогда как другие способы показывают значительно завышенные результаты. Для проекта Яузского разгрузочного канала наиболее сопоставимы методы Хакимова Х. Р. и Дормана Я. А., для

коллектора под Новолюблинским каналом – зависимости Хакимова Х. Р. и Трупака Н. Г. Следует отметить, что метод теплового баланса, несмотря на различие с реальным временем замораживания в проектах Яузского и Новолюблинского каналов показывает реальные результаты применительно ко всем трём проектам. Таким образом, при строительстве тоннелей с применением способа искусственного замораживания время активного замораживания может быть определено по методу теплового баланса.

2.3 Исследование процесса формирования ледопородного ограждения вокруг тоннеля после окончания подачи холодоносителя в замораживающие колонки

Анализ литературных источников по вопросам формирования ЛПО во времени [39; 40] показал, что зачастую после прекращения подачи в замораживающие колонки холодоносителя наблюдался дальнейший рост толщины ЛПО. Свойство ЛПО увеличивать свою толщину после прекращения подачи холодоносителя в колонки можно назвать явлением тепловой инерции ледопородного ограждения, происходящей в результате выравнивания температур в ЛПО.

Следует отметить, что в современной практике проектирования процесса замораживания свойство инерционности не учитывалось и исследования по его изучению не проводились, хотя учёт такого свойства в отдельных случаях может привести к существенному сокращению времени и средств на создание ЛПО заданных размеров при проходке тоннелей с применением способа искусственного замораживания.

В связи с этим, в работе сделана попытка аналитически решить задачу о влиянии тепловой инерции на величину возможного приращения толщины ЛПО после прекращения подачи холодоносителя в замораживающие колонки.

Для решения поставленной задачи примем допущение о том, что замораживающие колонки представляют точечные тепловые источники. Обоснованность такого допущения изложена в работе Королева И. О. [41]. Проведённые в этой работе обоснования, подкреплённые математическими

выкладками, дают возможность представить процесс замораживания горных пород, происходящим следующим образом.

1. Распространение границы промерзания осуществляется по тому же закону, что и распространение изотермы с температурой фазового перехода в однородной и изотропной среде без фазовых превращений с эффективным коэффициентом теплопроводности, определяемым по формуле:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\bar{q}Ei(\alpha^2)}{4\pi(T_0 - T_{\text{ф}})}, \quad (2.12)$$

где \bar{q} – средний удельный тепловой поток к единице длины замораживающей колонки; T_0 и $T_{\text{ф}}$ – соответственно, начальная температура горных пород и температура фазового перехода; Ei – модифицированная интегральная экспонента:

$$Ei(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx,$$

α – безразмерный параметр, определяемый в результате решения трансцендентного уравнения:

$$e^{-\alpha^2} - \frac{2}{\beta \cdot \gamma} \cdot \frac{e^{-\delta\alpha^2}}{Ei(\delta\alpha^2)} - \frac{2\varepsilon}{\beta} \alpha^2 = 0,$$

где $\beta = \frac{\bar{q}}{2\pi \cdot \lambda_1(T_0 - T_{\text{ф}})}$; $\gamma = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$; $\delta = \frac{a_1}{a_2}$; $\varepsilon = \frac{Q \cdot a_1}{\lambda_1(T_0 - T_{\text{ф}})}$; Q – скрытая объемная теплота фазового перехода.

2. На горизонтальном разрезе ограждения колонка представляется точечным тепловым источником.

Принятая математическая модель процессов, происходящих при замораживании горных пород, позволяет решить задачу определения координатно-временного развития изотерм фазового перехода в соответствующей однофазной плоско-параллельной среде с расположенными в ней точечными тепловыми источниками.

В такой постановке в работах [41; 42] получено уравнение для определения координатно-временного положения границы промерзания ЛПО произвольно расположенными в плане замораживающими колонками N :

$$\sum_{i=1}^N \int_0^t \frac{q_i(\tau)}{t - \tau} \exp \left[-\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{4(t - \tau)} \right] d\tau - Ei(\alpha^2) = 0 \quad (2.13)$$

Используя имеющийся математический аппарат, в работе решена задача по исследованию характера формирования ледопородного ограждения по

завершению подачи холодоносителя в замораживающие колонки [43]. Задача решена в следующей постановке.

ЛПО создается системой из замораживающих колонок, расположенных на плане в точках с декартовыми координатами $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$. Если в период времени $0 < t < t_0$ колонки работали в режиме постоянного теплоотбора, а потом до момента времени t_1 были отключены, то функциональную зависимость удельного теплопритока от времени можно представить так:

$$q(t) = \begin{cases} q_0, & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & t_0 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (2.14)$$

Среднее за время замораживания значение удельного теплопритока при этом равно $\bar{q} = q_0 t_0 / t_1$.

Для решения задачи перейдем к безразмерным величинам. В левых частях приведенных формул стоят безразмерные величины, а в правых размерные:

$$T = \frac{T_0 - T'}{T_0 - T_f}; t = \frac{t' x_f}{l^2}; (x, y) = \frac{x'}{l}, \frac{y'}{l}; q_i = \frac{q'_i}{\bar{q}},$$

где l – характерный размер (например, расстояние между колонками); \bar{q} – средний удельный тепловой поток к колонкам, входящий в определение $\lambda_{эф}$ по формуле 2.12.

Для одиночной колонки величина e принимается равной 1 м, а для прямолинейного расположения колонок – равной расстоянию между колонками. Подставив зависимость 2.14 в уравнение 2.13, получим трансцендентное уравнение для определения границы (x, y) ЛПО в момент времени $\tau = t/t_0$:

$$\sum_{i=1}^N \left\{ Ei \left[\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{4t_0\tau} \right] \right\} - \left\{ Ei \left[\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{4t_0(\tau - 1)} \right] \right\} - \frac{t_0}{t_1} Ei(\alpha^2) = 0 \quad (2.15)$$

В уравнении 2.15 t_0 – безразмерная величина.

Рассмотрим сначала случай развития одиночного ледопородного цилиндра. Положив в уравнение $N = 1, x_i = y_i = 0$, получим уравнение для определения безразмерного радиуса x ледопородного цилиндра:

$$Ei \left(\frac{x^2}{4t_0\tau} \right) - Ei \left[\frac{x^2}{4t_0(\tau - 1)} \right] - \frac{t_0}{t_1} Ei(\alpha^2) = 0 \quad (2.16)$$

Для прямолинейного однорядного расположения колонок формула 2.15 трансформируется в следующее уравнение:

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \left\{ Ei \left[\frac{(x-N)^2 + y^2}{4t_0\tau} \right] - Ei \left[\frac{(x-N)^2 + y^2}{4t_0(\tau-1)} \right] \right\} - \frac{t_0}{t_1} Ei(\alpha^2) = 0 \quad (2.17)$$

Так как толщина ЛПО E в замковой плоскости равна $2y$ при $x = 1/2$, то из уравнения 2.16 следует уравнение для определения зависимости $E(\tau)$:

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \left\{ Ei \left[\frac{E^2 + (2n-1)^2}{16t_0\tau} \right] - Ei \left[\frac{E^2 + (2n-1)^2}{16t_0(\tau-1)} \right] \right\} - \frac{t_0}{t_1} Ei(\alpha^2) = 0 \quad (2.18)$$

По вышеприведенным формулам были выполнены расчеты, в которых принято, что замораживание осуществляется в горных породах со следующими теплофизическими свойствами: $\lambda_1 = 2,9$ Вт/м $^\circ$ С, $\lambda_2 = 2,3$ Вт/м $^\circ$ С, $C_1 = 2,06 \cdot 10^6$ Дж/м 3 $^\circ$ С, $C_2 = 2,64 \cdot 10^6$ Дж/м 3 $^\circ$ С, $Q = 10^8$ Дж/м 3 . Начальная температура горных пород и температура фазового перехода принимались равными соответственно 10 $^\circ$ С и 0 $^\circ$ С. Расчеты, проводимые с применением ЭВМ, ставили целью получение зависимостей $x(\tau)/x(t_0)$ и $E(\tau)/E(t_0)$.

Отметим, что зависимости $x(\tau)$ и $E(\tau)$ могут искажаться по величине вследствие произвольного выбора момента времени t_1 , однако функциональные отношения $x(\tau)/x(t_0)$ и $E(\tau)/E(t_0)$, как показывают проведенные на ЭВМ расчеты, довольно слабо зависят от параметра t_0/t_1 , поэтому в расчетах принималось, что $t_0/t_1 = 0,5$. В связи с этим результаты расчетов следует рассматривать как количественные оценки закономерностей развития ледопородных тел в период времени после окончания подачи холодоносителя в колонки.

Результаты расчетов представлены графически на рисунках 2.7 и 2.8, где кривая 1 соответствует средней температуре ледопородного цилиндра $\bar{T} = -15,6$ $^\circ$ С; кривая 2 – $\bar{T} = -44,2$ $^\circ$ С; кривая 3 – $\bar{T} = -57,7$ $^\circ$ С.

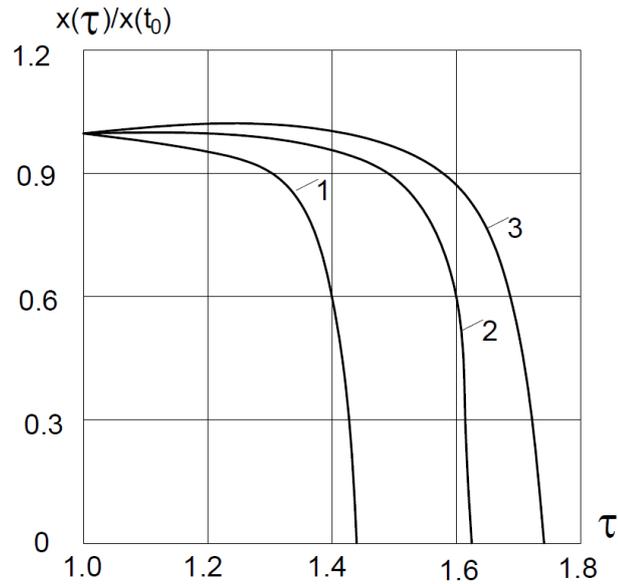


Рисунок 2.7 — Зависимость относительного радиуса ледопородного цилиндра от относительного времени

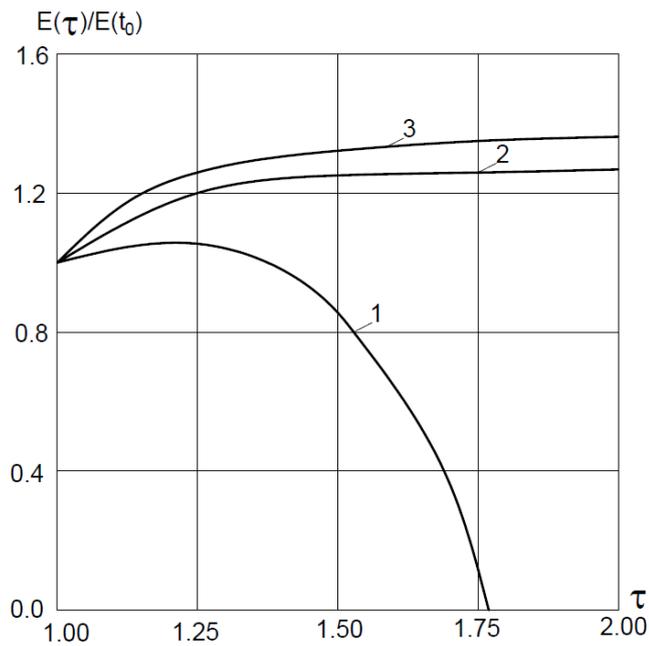


Рисунок 2.8 — Зависимость относительной толщины ледопородного цилиндра от относительного времени

Анализ кривых, изображенных на рисунке 2.7, показывает, что эффект инерции развития одиночного ледопородного цилиндра выражен довольно слабо – относительное приращение на 13% радиуса цилиндра происходит лишь при начальной средней температуре последнего $\bar{T} = -57,7^{\circ}\text{C}$; однако, при низкотемпературном безрассольном замораживании (например,

при замораживании жидким азотом) следует ожидать больших значений относительного приращения радиуса ледопородного цилиндра.

Результаты, представленные на рисунке 2.8, показывают, что инерционный эффект в развитии ЛПО выражен значительно ярче, чем в случае развития одиночного цилиндра, причем относительное приращение на 40% толщины ограждения может достигаться и при низкотемпературном рассольном замораживании, а при низкотемпературном безрассольном замораживании приращение толщины на 50% не является пределом. Из рисунка 2.8 следует, что продолжительность инерционного нарастания толщины ограждения может превышать время активного замораживания.

2.4 Выводы по главе

Исследование влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ЛПО для тоннелей показало, что теплоприток от земной поверхности может превышать естественный теплоприток от массива горных пород в 2-10 раз в зависимости от глубины заложения ЛПО, диаметра тоннеля и теплопроводности горных пород, окружающих ЛПО. При формировании ЛПО для тоннелей неглубокого заложения процесс замораживания может быть замедлен, а форма ледопородного цилиндра искажена в результате воздействия теплопритока от земной поверхности к ЛПО. Коэффициент теплопроводности горных пород (λ) связан с отношением глубины заложения ЛПО (H) к диаметру ЛПО (D) неравенством $H/D \geq (1,5 - 2) \cdot \lambda$. При выполнении неравенства теплоприток от поверхности земли не влияет на формирование ЛПО.

Проведенный анализ исследований по определению времени замораживания показал, что наиболее близкие результаты, подтвержденные отечественной и зарубежной практикой строительства тоннелей получены при расчете времени замораживания по методу теплового баланса.

В результате исследования способности ЛПО увеличивать толщину после прекращения подачи холодоносителя в замораживающие колонки была проведена оценка изменения радиуса одиночного ледопородного цилиндра и толщины ЛПО в зависимости от времени, которая может использоваться для оценки максимального приращения ледопородного ограждения, что позволит обеспечить технологические паузы при замораживании и сокращение материальных и финансовых затрат на создание ЛПО любой формы. Самопроизвольное увеличение размеров ЛПО наблюдается при большой толщине (более трёх метров) независимо от температуры замораживания, или же при низких температурах замораживания (менее минус 40 °С) независимо от толщины ЛПО. Учет свойства инерционности позволяет обосновывать продолжительность технологических пауз, определять время замораживания, управлять процессом формирования ледопородного ограждения, поддерживая заданные его свойства и размеры во времени.

Глава 3. Исследование закономерности напряженно-деформированного состояния системы крепь-ледопородное ограждение при проходке тоннелей в водоносных породах

Свойства мерзлых горных пород, в том числе и реологические, достаточно хорошо изучены отечественными и зарубежными учеными, такими как С. С. Вялов, Н. А. Цытович, Ю. К. Зарецкий, О. Б. Андерсланд и другими. Существует нормативная документация (ГОСТ 12248-2010), регламентирующая методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости мерзлых горных пород при их исследовании [1; 44; 45].

Вместе с тем у пользователей современных программных продуктов (ABAQUS, Rocscience, ANSYS, PLAXIS), применяемых в инженерных расчётах для оценки устойчивости подземных сооружений, часто возникают трудности по определению исходных данных физико-механических характеристик мерзлых горных пород.

Целью данной главы является создание методики лабораторного определения реологических характеристик мерзлых горных пород в условиях трёхосного сжатия. Выполненные исследования предусматривали экспериментальное определение прочностных и деформационных свойств мерзлых горных пород в лабораторных условиях для последующего аналитического расчета устойчивости подземных сооружений с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

3.1 Экспериментальные исследования по определению характеристик прочности и деформируемости горных пород в условиях трёхосного сжатия

Исследования проводились в условиях трёхосного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения, что в наибольшей мере соответствует напряженно-деформируемому состоянию горного массива исследуемого объекта строительства. Испытания образцов мерзлых горных пород методом трёхосного сжатия были проведены для определения следующих прочностных

характеристик: сцепления (c), угла внутреннего трения (φ) и предела прочности (σ).

Деформационные упругие характеристики такие как модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (μ) определялись в условиях одноосного сжатия методом «нагрузка-разгрузка». Испытания образцов были проведены в мобильной передвижной лаборатории, оборудованной криокамерой, способной создавать температуру до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и поддерживать её постоянной величиной с погрешностью $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Испытания проводились при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ на образцах цилиндрической формы, изготовленных из монолитов естественной плотности и влажности. Размеры образцов имели соотношение высоты к диаметру 2:1, что соответствует зарубежным и отечественным нормативным документам при испытаниях мерзлых горных пород в условиях сжатия.

Для исследования изготавливались образцы из монолитов мерзлых грунтов (керны), как это регламентирует ГОСТ 12248-2010. Для изготовления образцов используются: вырезные кольца внутренним диаметром 50 мм, насадки на кольца длиной 100 мм, гидравлический домкрат и выталкиватель (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 — Рама с гидравлическим домкратом и рабочие кольца для вырезания образцов горной породы

Первоначально керн освобождается от упаковки и фотографируется. Обычно керн поставляют в виде цилиндрических монолитов диаметром 10-

15 см и длиной от 10 см и более. Вначале на плоском отрезном станке керн в округлой плоскости отпиливают с двух сторон с учетом, чтобы высота отпиленного керна составляла 100-105 мм. После этого образец керна вместе с вырезным кольцом и насадкой устанавливается в вертикальном положении между плитами домкрата. Нагружение домкратом производится плавно до внедрения вырезного кольца на 15-20 мм. После этого подрубается остаточная масса керна за пределами кольца и производится последующее нагружение домкратом. В процессе вырезания необходимо соблюдение чёткого вертикального внедрения вырезного кольца в керн. На рисунке 3.2 показан этап изготовления образца.



Рисунок 3.2 — Пример изготовления образца из керна материала методом вырезания режущим кольцом

После изготовления образца производится взвешивание, определение геометрических размеров и фотодокументирование. При недостаточно ровном изготовлении торцов образца производится ручная обработка. В процессе изготовления образца обязательно соблюдается тепловой режим. Температура при изготовлении не должна превышать предполагаемую температуру испытания.

Для испытания мерзлых горных пород в условиях одноосного и трехосного сжатия использовался стабилومتر, разработанный НПП «ГЕОТЕК», в состав которого входят:

1. устройство осевого нагружения для испытания образцов вертикальной нагрузкой до 50 кН непрерывно, с заданной скоростью осевой деформации или длительными ступенями с контролем напряжений;

2. камера трехосного сжатия для испытания цилиндрических образцов размером: диаметр 50 мм и высота 100 мм;
3. нагнетатель-стабилизатор бокового давления;
4. нагнетатель-дегазатор для закачки гидравлической жидкости в стабилометр;
5. компьютер и 2 электронных блока управления автоматикой;
6. программный комплекс «АСИС»;
7. незамерзающая до -15°C гидростатическая жидкость;
8. силиконовые оболочки для образцов;
9. воздушный компрессор до 2 МПа.

Общий вид установки трехосного сжатия НПП «ГЕОТЕК» представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 — Общий вид установки трехосного сжатия испытательного комплекса «АСИС-2»

Испытательный комплекс включает в себя установку, созданную на базе нагружающей рамы (1) и камеры трёхосного сжатия (2). Комплекс снабжен устройством стабилизации бокового давления (3), которое контролируется датчиком давления (4). В качестве рабочей жидкости для создания бокового давления используется водно-спиртовой раствор, который не замерзает при отрицательных температурах. Прибор размещается в морозильной камере, которая работает в режиме отрицательной температуры до -10°C . В каче-

стве гидравлической жидкости, создающей боковое давление, использовалась водно-спиртовая смесь, незамерзающая при температурах до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.1 Методика проведения испытаний и обработка результатов выполненных исследований

Исследования деформационных и прочностных характеристик производились по следующей методике [46]. Испытывались образцы правильной формы высотой 100 ± 2 мм и диаметром 50 мм. Образцы размещались между плитами нагрузочного устройства, центрировались и поджимались осевой нагрузкой 0,03-0,05 МПа. Далее производилось нагружение со скоростью перемещения нижней нагрузочной плиты 0,5 мм в секунду. Нагрузочное устройство обеспечивало в процессе опыта измерение нагрузки и деформаций образца. Эксперимент заканчивался при разрушении образца (прохождении пика прочности) или до достижения продольной относительной деформации 15%. В процессе нагружения производилась разгрузка и нагрузка образца 2-3 раза. Далее образец доводился до разрушения. В процессе испытания происходит увеличение площади поперечного сечения образца, в связи с чем необходимо производить перерасчет осевого напряжения σ_1 . Величина σ_1 рассчитывалась с учетом увеличения площади поперечного сечения образца в процессе деформирования по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{F}{S \cdot (1 - \varepsilon_3)^2}, \quad (3.1)$$

где F – нагрузка на образец, Н; S – площадь поперечного сечения образца, мм²; ε_3 – относительная поперечная деформация образца, д.е.

Относительная продольная деформация образца рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h},$$

где Δh – абсолютная продольная деформация образца, мм; h – начальная высота образца, мм.

Относительная поперечная деформация образца рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta d}{d}, \quad (3.2)$$

где Δd – абсолютная поперечная деформация образца, мм; d – начальный диаметр образца, мм.

По результатам испытания строится диаграмма полного деформирования образца мёрзлых горных пород. Пример такой диаграммы представлен на рисунке 3.4.

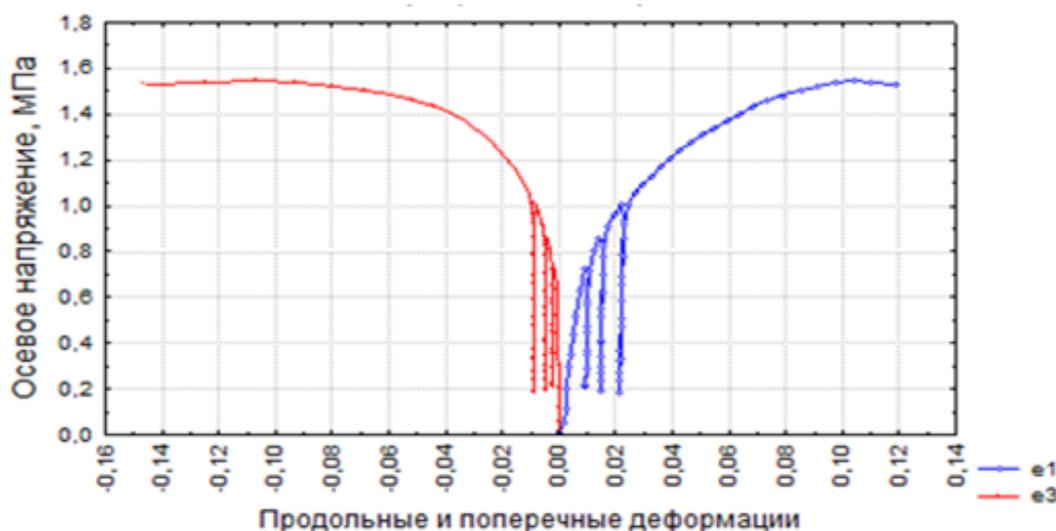


Рисунок 3.4 — Пример диаграммы деформирования мерзлой породы

Предельная величина прочности ($\sigma_{сж}$) определяется по максимальному значению осевого напряжения.

Значения упругих и деформационных характеристик (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) определяют до перехода образца в состояние пластического течения. При определении деформационных характеристик выделяются зоны «разгрузка-нагрузка». Определение величины модуля Юнга (E) производится на участке «разгрузка» для каждого цикла из соотношения $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_1$ по графику зависимости $\sigma = f(\varepsilon_1)$. Данная зависимость аппроксимируется прямой линией, тангенс угла наклона которой и является модулем упругости (Юнга) образца на данном участке. Значение модуля Юнга образца рассчитывается как среднее арифметическое по всем циклам «разгрузка». Пример расчета величины (E) представлен графически на рисунке 3.5.

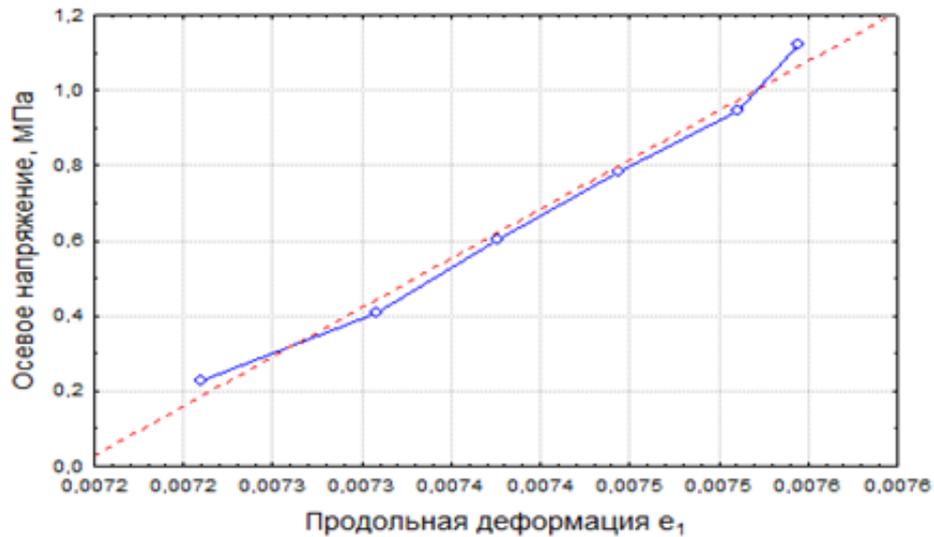


Рисунок 3.5 — Определение модуля Юнга на ветви разгрузки

Определение величины коэффициента Пуассона (μ) производится на участке «разгрузка» из соотношения $\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1$ по графику зависимости $\epsilon_3 = f(\epsilon_1)$ для каждого цикла. Данная зависимость аппроксимируется прямой линией, тангенс угла наклона которой является коэффициентом Пуассона образца на данном участке «разгрузка». Пример расчета коэффициента Пуассона (μ) представлен графически на рисунке 3.6. Значения коэффициентов корреляции должны быть близки к единице. Если имеет место разброс данных, т.е. коэффициент корреляции меньше 0,9, то следует провести дополнительное испытание на другом образце, если позволяет данная выборка.

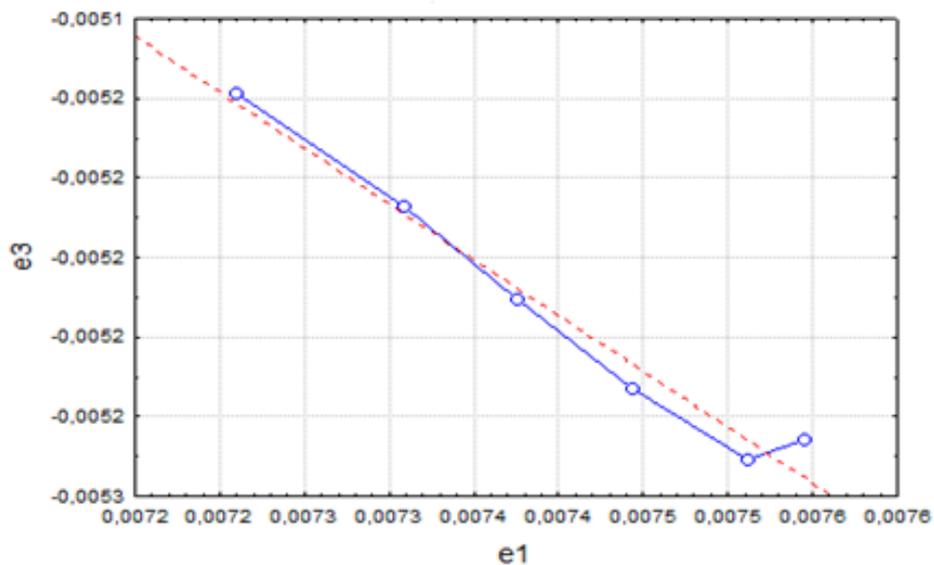


Рисунок 3.6 — Определение коэффициента Пуассона на ветви разгрузки

Деформационные характеристики испытанных образцов указываются в сводной таблице, по результатам которой оформляется протокол испытания.

Исследования прочностных показателей производились в специальных приборах-стабилометрах. Эти приборы могут создавать нагрузки в условиях трёхосного сжатия ($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$). Испытания при трёхосном сжатии в условиях быстрого нагружения проводились по консолидированно-недренированному методу (кН), в режиме быстрого нагружения, когда величина бокового напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$ являлась постоянной величиной в процессе всего эксперимента, а осевое напряжение σ_1 постоянно увеличивалось вплоть до разрушения образца. Продолжительность такого эксперимента составляла не более 40 секунд, без учета времени на предварительную выдержку образца под гидростатическим давлением $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ [47]. Порядок проведения испытания производился следующим образом. Вначале производится консолидация образца методом ступенчатого повышения гидростатического давления. Увеличение бокового и осевого давления происходит одновременно. Это значение составляет величину, планируемую в эксперименте, как значение постоянного минимального напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$, которое рассчитывалось по формуле:

$$\sigma_1 = \gamma \cdot H, \quad (3.3)$$

где γ – удельный вес породы, Н/м³; H – глубина отбора образца мерзлых горных пород, м. Время выдержки для каждой ступени консолидации составило 10 минут. При достижении максимального давления консолидации производилась выдержка 60 минут. В процессе консолидации производились измерения объёма вытесненной жидкости каждые 30 секунд для оценки отсутствия пробоев оболочки (строится график зависимости вытесненной жидкости от времени) и дальнейшего их учёта при расчётах объёмных деформаций ε_v . По результатам замеров строился график зависимости $\varepsilon_v = f(t)$, где ε_v – объёмные деформации образца, t – время консолидации. Выполнение 100% консолидации считается законченной при отсутствии уплотнения образца. Если падения давления гидравлической жидкости не происходит, то эксперимент продолжается. При падении давления проверяется герметизация системы (наличие утечек жидкости) или производится повторная дегазация. После создания всестороннего давления значения деформаций принимают за условный ноль отсчёта деформаций.

Нагрузки образцов производятся по схемам кинематического (непрерывного) нагружения. Образец нагружается осевой нагрузкой F с постоянной скоростью деформирования до разрушения образца или до достижения продольной относительной деформации 15%. Время от начала испытания до достижения максимальной прочности не должно превышать 40 секунд [47]. Величина интервала измерений 0,2-1 секунда. Испытания проводились при трёх различных значениях $\sigma_2 = \sigma_3$. Для достоверности полученных результатов при каждом значении $\sigma_2 = \sigma_3$ производится не менее трех опытов. В процессе проведения экспериментов производится непрерывная запись всех напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и деформаций. По результатам испытания строится полная диаграмма деформирования (рисунок 3.7) образца мёрзлых горных пород в виде графиков зависимостей «осевые (продольные) напряжения σ_1 - осевые (продольные) деформации ε_1 » и «осевые (продольные) напряжения σ_1 - поперечные деформации ε_3 (для цилиндрических образцов $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$)». Относительная продольная деформация образца рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h - \Delta h_c},$$

где Δh – абсолютная продольная деформация образца, мм, h – начальная высота образца, мм, Δh_c – абсолютная продольная деформация после ступени максимальной нагрузки консолидации, мм. Относительная поперечная деформация образца рассчитывалась по формуле 3.2.

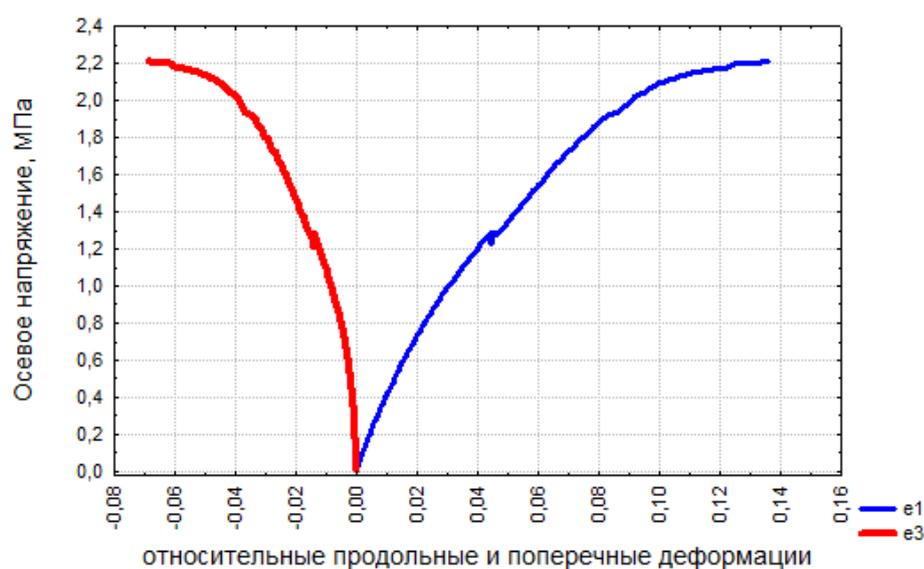


Рисунок 3.7 — Полная диаграмма деформирования мерзлых горных пород

Предельная величина прочности σ_1 определяется по максимальному значению осевого напряжения. Величина σ_1 рассчитывается с учётом расширения поперечного сечения образца по формуле 3.1. Результаты испытаний, использованные для построения паспортов прочности мёрзлых горных пород, приводятся в табличном виде. По результатам всех экспериментов с учётом ранее определённого предела прочности при одноосном сжатии строятся паспорта прочности мёрзлых горных пород. Радиус кругов Мора принимается равным значению $0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$, координаты центров – $0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$. К построенным кругам напряжений проводят прямую касательную линию, которая соответствует графику функции $\tau = f(\sigma_n)$ (рисунок 3.8). По паспорту объемной прочности графически определяются прочностные характеристики. Величина удельного сцепления (c) определяется при отсутствии нормальных напряжений, т.е. при $\sigma_n = 0$. Угол внутреннего трения φ_0 (коэффициент внутреннего трения $\text{tg}(\varphi_0)$) определяется как угол наклона прямой касательной линии к оси X .

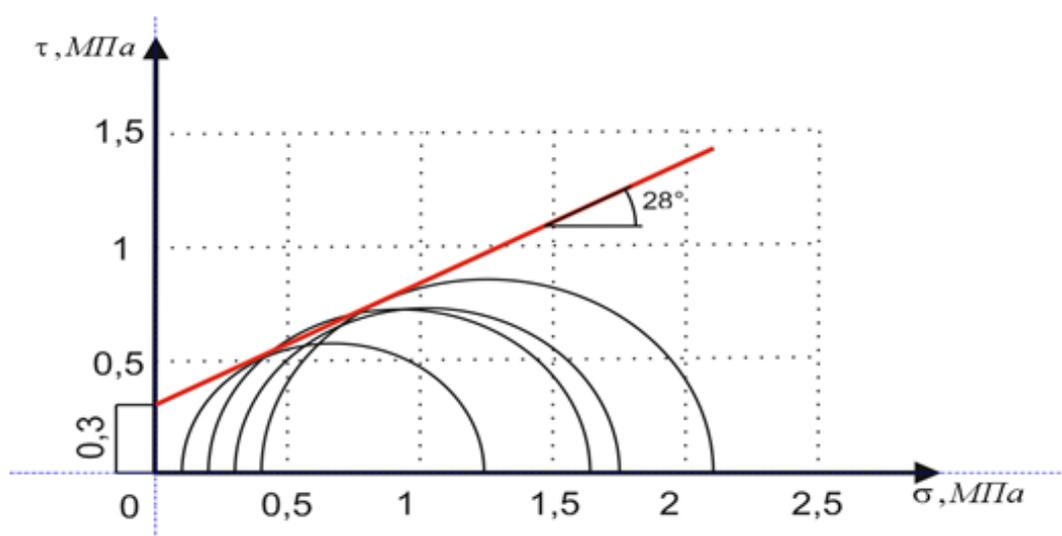


Рисунок 3.8 — Пример построения паспорта прочности мерзлых горных пород

3.1.2 Результаты выполненных исследований

Всего было изготовлено и испытано 12 образцов мерзлых горных пород цилиндрической формы размерами: высота 100 мм, диаметр 50 мм.

Испытания проводились на трёх образцах в условиях одноосного сжатия до 50 кН с полным контролем напряжений и деформаций при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процессе нагружения производилось по три цикла «разгрузка-нагрузка». Результаты испытаний представлены на рисунках 3.9 - 3.11 в виде диаграмм полного деформирования.

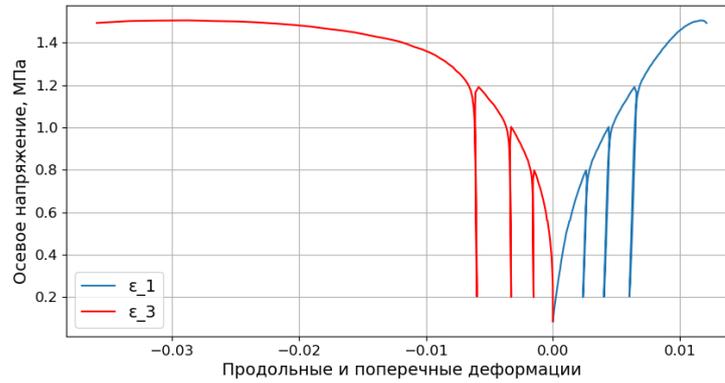


Рисунок 3.9 — Полная диаграмма деформирования при трех циклах «разгрузка-нагрузка» образца 1

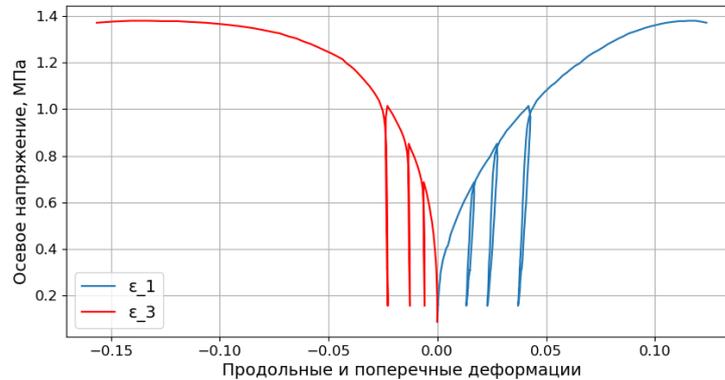


Рисунок 3.10 — Полная диаграмма деформирования при трех циклах «разгрузка-нагрузка» образца 2

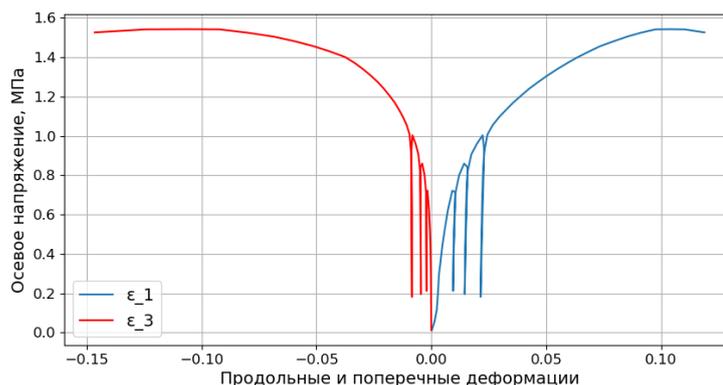


Рисунок 3.11 — Полная диаграмма деформирования при трех циклах «разгрузка-нагрузка» образца 3

Определение деформационных характеристик проводилось по ветвям «разгрузка» на последних двух циклах. Результаты определения деформационных характеристик и предела прочности при одноосном сжатии представлены в таблице 3.

Таблица 3 — Результаты исследования деформационных характеристик и предела прочности при одноосном сжатии

Образец	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Прочность
N	E	μ	$\sigma_{сж}$
-	ГПа	-	МПа
1	1,98	0,32	1,47
	2,42	0,26	
2	2,17	0,28	1,38
	1,97	0,29	
3	2,41	0,3	1,48
	2,3	0,32	
Среднее значение	2,2	0,3	1,44

Статистическая обработка результатов определения деформационных характеристик (E) и (μ) представлена в виде гистограмм на рисунках 3.12; 3.13. На графиках представлены средние значения и доверительный интервал отклонений. Отклонения не превышают 10%, что соответствует корректности полученных результатов.

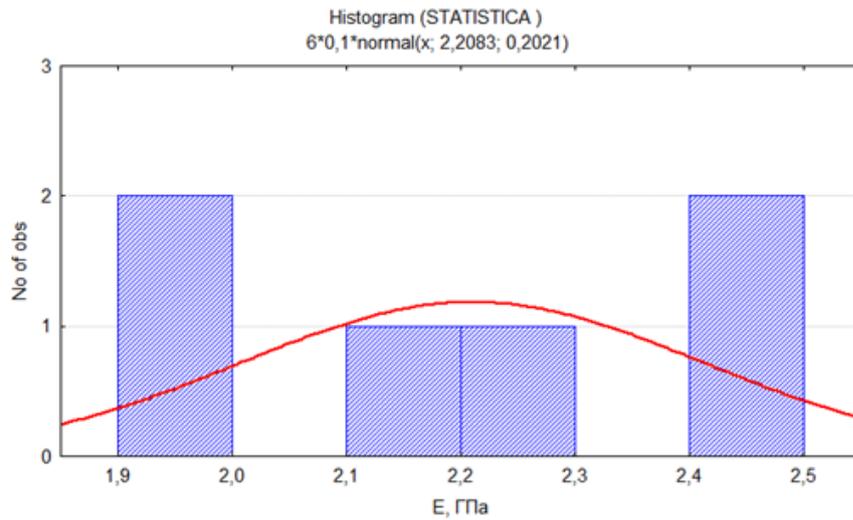


Рисунок 3.12 — Гистограмма распределения модуля Юнга (E), по результатам шести определений

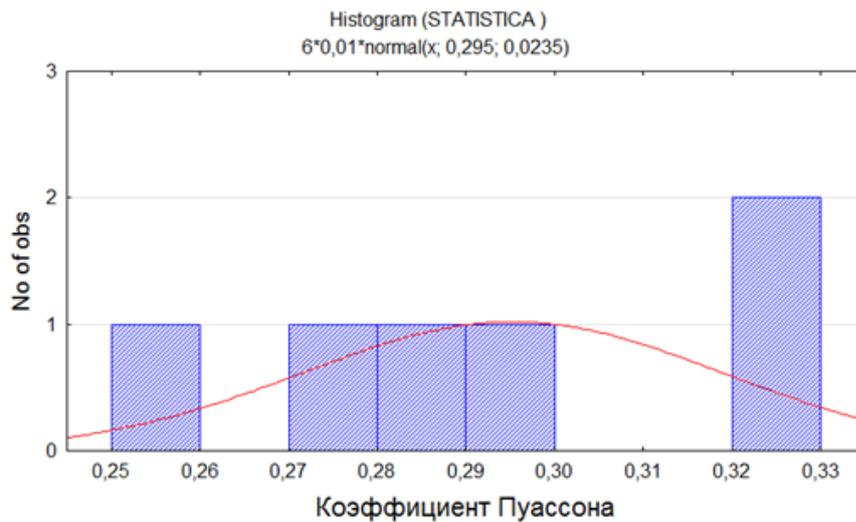


Рисунок 3.13 — Гистограмма распределения коэффициента Пуассона (μ), по результатам шести определений

Результаты исследования прочностных показателей мерзлых горных пород в условиях трёхосного сжатия представлены в виде полных диаграмм их деформирования на рисунках 3.14 - 3.16. На каждом графике представлены испытания трёх образцов при одном и том же значении $\sigma_2 = \sigma_3$.

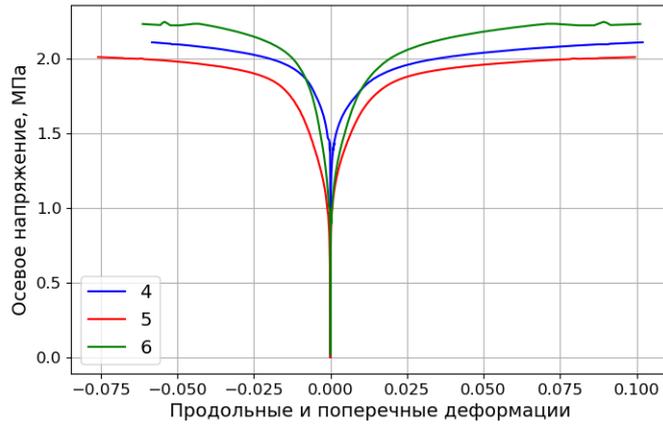


Рисунок 3.14 — Полная диаграмма деформирования при боковом значении напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,2$ МПа образцов 4, 5 и 6

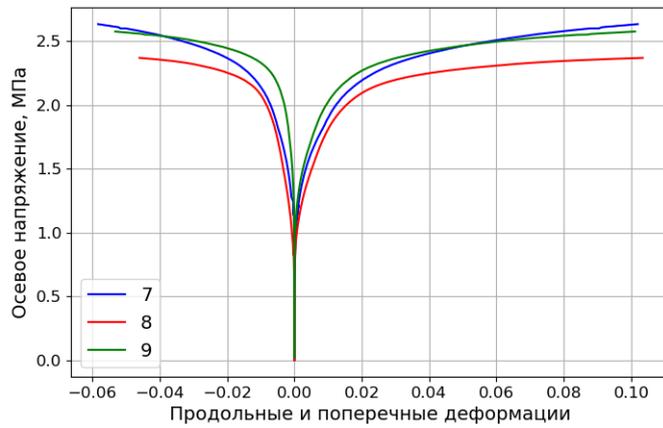


Рисунок 3.15 — Полная диаграмма деформирования при боковом значении напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,4$ МПа образцов 7, 8 и 9

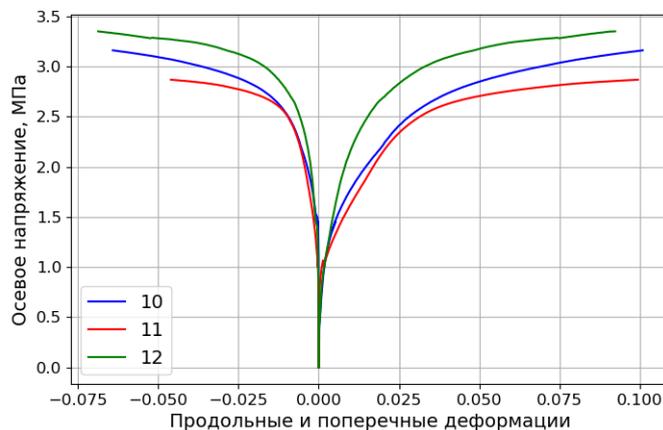


Рисунок 3.16 — Полная диаграмма деформирования при боковом значении напряжения $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,6$ МПа образцов 10, 11 и 12

В таблице 4 приведены величины предельной прочности мерзлых горных пород для различных значений напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$, определённых в экспериментах при условии одноосного и трёхосного сжатия.

Таблица 4 — Результаты определения величины предельной прочности мерзлых горных пород, для различных значений напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$ при температуре -6°C

Образец N	Боковое напряжение $\sigma_2 = \sigma_3$ МПа	Предельное осевое напряжение	
		σ_1 МПа	σ_1 (Среднее значение) МПа
1	0	1,47	1,44
2		1,38	
3		1,48	
4	0,2	2,2	2,10
5		2,1	
6		2	
7	0,4	2,65	2,54
8		2,6	
9		2,38	
10	0,6	3,32	3,09
11		3,15	
12		2,8	

По результатам испытаний графически построен паспорт прочности для исследованных образцов, аппроксимированный линейной зависимостью. Данный график представлен на рисунке 3.17.

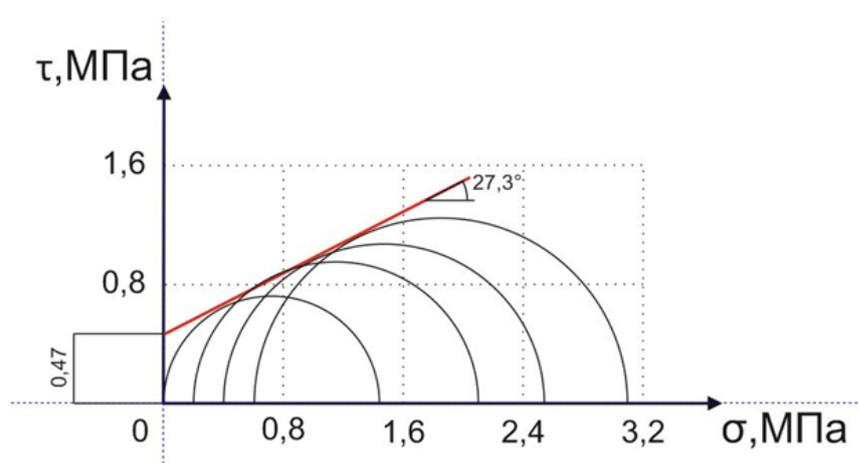


Рисунок 3.17 — Паспорт прочности, построенный по результатам испытания образцов мёрзлых горных пород в условиях одноосного и трёхосного сжатия и аппроксимированный линейной зависимостью

Значение тангенса угла внутреннего трения $\varphi = 27,3$ град. составляет величину 0,52. Соответственно, уравнение Кулона-Мора будет иметь вид ($\tau = 0,47 + 0,52 \cdot \sigma_n$). Таким образом, по результатам испытания мерзлых горных пород определены механические характеристики, которые имеют следующие значения:

- Модуль Юнга, $E = 2,2$ ГПа
- Коэффициент Пуассона, $\mu = 0,3$
- Угол внутреннего трения, $\varphi = 27,3$ град

Полученные характеристики были учтены при выборе исходных данных для задания критерия прочности замороженного массива пород в последующем компьютерном моделировании смещений в ледопородной и железобетонной крепи тоннеля.

3.2 Моделирование устойчивости тоннелей в замороженных породах с использованием программного комплекса «Rocscience»

Моделирование устойчивости тоннеля производилось в программном комплексе «Rocscience RS2». Была проанализирована ситуация, когда проходка тоннеля осуществляется в моренных отложениях. При этом почва тоннеля проходит по слою скальных пород. Кроме того, в главе рассмотрен пример разработки тоннеля в неустойчивых горных породах на 5 м выше, чем это предусмотрено в проекте. В таком случае тоннель полностью окружен моренными отложениями.

3.2.1 Особенности моделирования в «Rocscience RS2»

Численное моделирование было проведено в модуле «Phase2 (RS2)» программного комплекса «Rocscience», в основе которого лежит использование метода конечных элементов. Модель разделена на конечные элементы с известными размерами и напряжённо-деформируемыми свойствами, что позволяет моделировать распределение напряжений в скальных и слабых породах, окружающих тоннель. Для анализа 3D конструкции была использована его 2D проекция. Такой подход широко распространён в моделировании, так как он позволяет сократить время моделирования и даёт более точные результаты. Последовательность операций, применённых в «Rocscience RS2», представлена на рисунке 3.18.

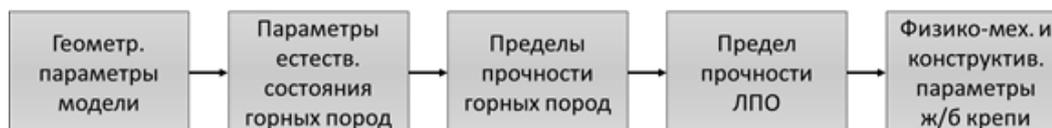


Рисунок 3.18 — Этапы подготовки модели в «Rocscience RS2»

При составлении моделей были приняты следующие упрощения:

1. вегетативный слой горных пород не учтён в модели;
2. анализ распределения смещений применён для прямоугольной модели, так как модель с естественным уклоном земной поверхности

показывала мнимую концентрацию напряжений в области наибольшего уклона.

При моделировании массива горных пород, окружающих выработку, использовалось 2 материала: моренные отложения (смесь суглинка, супеси и гравия), залегающие от земной поверхности до почвы тоннеля и прочные скальные породы (мрамор, залегающий ниже почвы тоннеля).

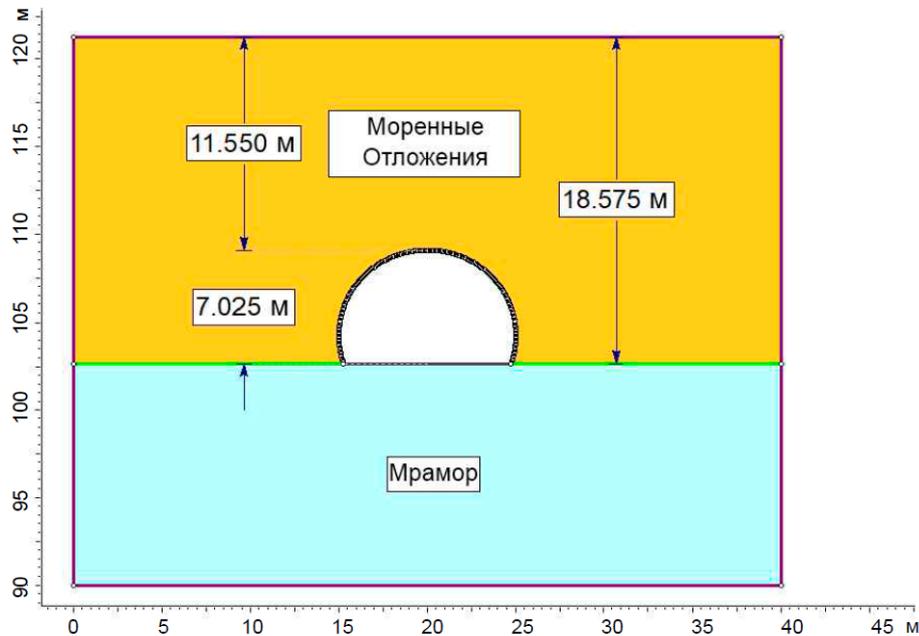


Рисунок 3.19 — Расчётная модель тоннеля

Принимая во внимание, что ЛПО сформировано до проходки тоннеля через участок слабых пород, допускается, что тоннель будет разрабатываться за одну заходку. Таким образом, для установки модели было выбрано 3 стадии:

- Стадия 1: распределение естественных напряжений в ненарушенном массиве пород;
- Стадия 2: тоннель разрабатывается под защитой ЛПО;
- Стадия 3: тоннель находится под защитой постоянной железобетонной крепи.

3.2.2 Моделирование напряжения горных пород в ненарушенном массиве

Сетка модели состоит из градуированных треугольников с шестью опорными точками, которая представлена на рисунке 3.20.

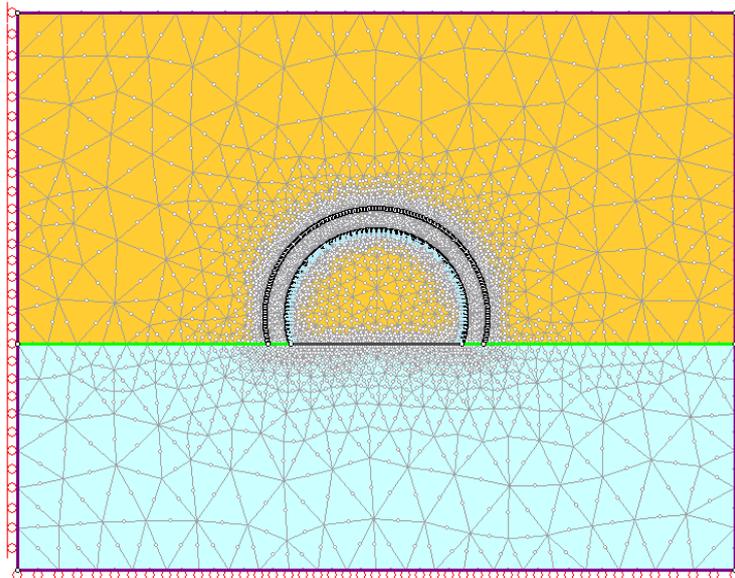


Рисунок 3.20 — Заданная сетка модели для расчета по методу конечных элементов

Распределение естественных напряжений горных пород может быть задано постоянным или зависящим от глубины залегания тоннеля. Постоянные напряжения используются для выработок на большой глубине, тогда как второй тип распределения напряжений можно применять для неглубоких выработок. Для этого необходимо определить коэффициент горного давления K . Учитывая распространённое допущение для горных пород, K принимается равным 1 [48]. Также K может быть выражен через отношение горизонтальных и вертикальных напряжений по формуле (3.4):

$$K = \frac{\sigma_H}{\sigma_V}, \quad (3.4)$$

где σ_H и σ_V – горизонтальное и вертикальное естественные напряжения массива пород, определяемые по формулам 3.5; 3.6:

$$\sigma_V = \rho gh, \quad (3.5)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu_s}{1 - \nu_s} \sigma_V, \quad (3.6)$$

где ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; ν_s – коэффициент Пуассона горных пород; h – глубина залегания тоннеля.

Программный комплекс «Rosscience» позволяет использовать различные критерии предела прочности горных пород на одноосное сжатие. Выбор необходимого критерия зависит от типа материала. Критерий Хоека-Брауна получил широкое распространение при моделировании скальных пород. Формула Мора-Кулона наиболее часто используется для расчёта несвязных горных пород. Критерий Хоека-Брауна характеризует поведение скальных пород через упругохрупкую реакцию на графике зависимости деформации от напряжения, тогда как для расчёта предела прочности по формуле Мора-Кулона наиболее подходит идеально пластичная реакция (рисунок 3.21).

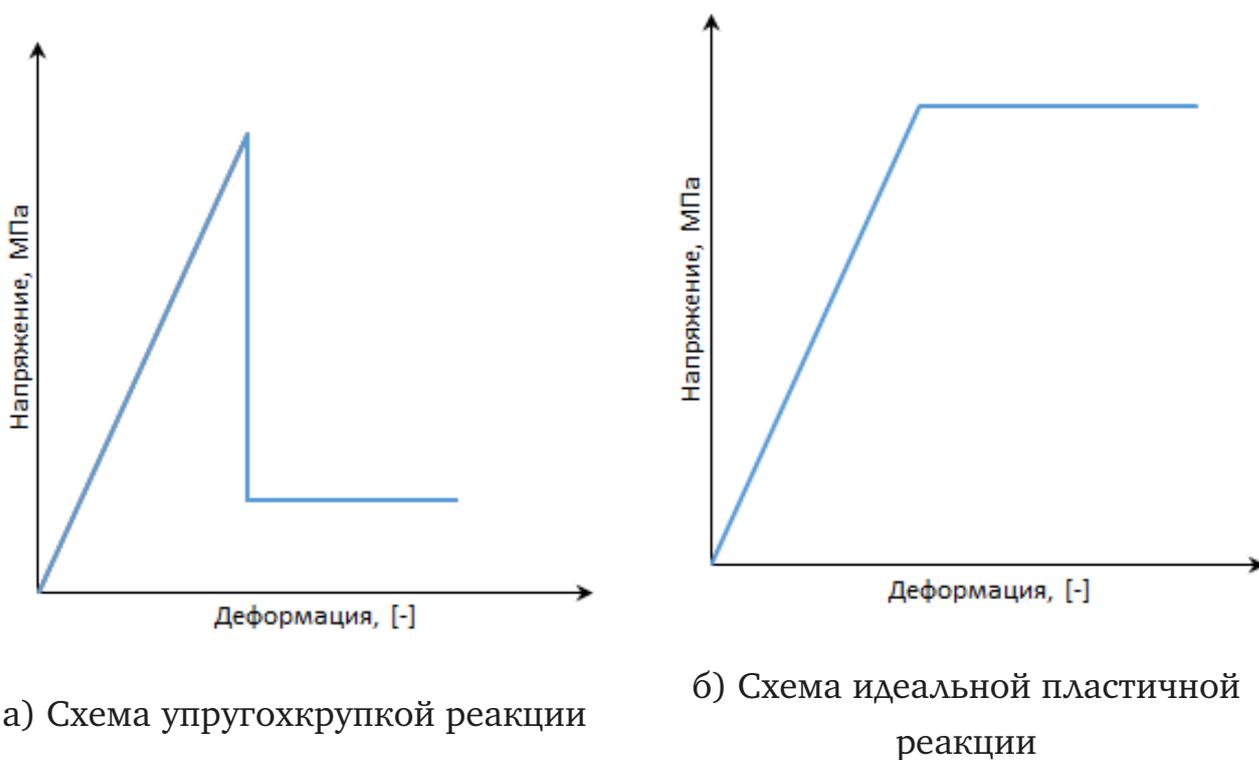


Рисунок 3.21 — Примеры графиков напряженно-деформационных состояний горных пород [49]

Общий вид критерия Хоека-Брауна и Мора-Кулона описываются в зависимостях 3.7; 3.10.

Критерий Хоека-Брауна представляет массив как однородное тело, поведение которого под нагрузкой определяется с учётом эмпирических параметров, полученных в результате анализа лабораторных и натурных испытаний скальных горных пород [50]. Зависимость 3.7 учитывает

взаимосвязь между максимальным (σ'_1) и (σ'_3) минимальным эффективными напряжениями и пределом прочности на одноосное сжатие (σ_{ci}):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (3.7)$$

где m_b , s и a – постоянные, зависящие от характеристик массива скальных пород; m_b и s могут быть выражены через формулы 3.8 и 3.9 соответственно:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right), \quad (3.8)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right), \quad (3.9)$$

где m_i – постоянная Хоека-Брауна для ненарушенных скальных пород; GSI – геологический индекс прочности; D – коэффициент разрушения массива породы. Отметим, что m_b , s и a – безразмерные константы, связанные с горной породой; m_i , GSI и D – эмпирические константы, определяемые экспериментально либо по табличным данным, полученным Хоеком [51].

Критерий Мора-Кулона широко используется в нормативной документации и при моделировании поведения массива дисперсных горных пород [52]. Формула 3.10 описывает линейную зависимость между прочностью на сдвиг τ_f и нормальным напряжением σ_n :

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi), \quad (3.10)$$

где τ_f – предельная нагрузка на сдвиг; σ_n – нормальное напряжение; c – сила сцепления ; φ – угол внутреннего трения.

Учитывая, что мрамор обладает прочностными свойствами скальной породы, он может быть выражен через критерий Хоека-Брауна. Исходные данные, используемые при моделировании, приведены в таблице 5. Коэффициенты ν ; ρ ; ν взяты из источника [53].

Таблица 5 — Параметры мрамора для критерия Хоека-Брауна

σ_c	GSI	m_i	D	ν	ρ	ν	E
МПа	[-]	[-]	[-]	[-]	кг/м ³	кН/м ³	ГПа
100	70	9	0	0,2	2800	26,5	60

Состав моренных отложений неоднороден и включает как крупные фракции (гравий), так и мелкие (суглинок). Прочностные параметры моренных отложений, необходимые для расчета по критерию Мора-Кулона, были найдены в научной литературе, описывающей материалы со схожими свойствами. Исходные данные для расчёта по данному критерию: коэффициент Пуассона (ν); плотность материала (ρ); удельный вес материала (ν); модуль Юнга (E); коэффициент сцепления (c); предел прочности на разрыв (растяжение) (σ_t); угол внутреннего трения материала (φ), приведены в таблице 6.

Таблица 6 — Параметры моренных отложений для критерия Мора-Кулона

ν	ρ	ν	E	c	σ_t	φ
[-]	кг/м ³	кН/м ³	ГПа	МПа	МПа	град
0,3	1680	19	0,01	0,07	0	30

Плотность моренных отложений (ρ) была получена из [45]; удельный вес (ν) из [54]; модуль Юнга (E) и коэффициент сцепления (c) из [55]; предел прочности на растяжение (σ_t) из [56]; угол внутреннего трения (φ) из [57].

3.2.3 Моделирование ледопородного ограждения в «Rocscience RS2»

Массив замороженных горных пород, формирующий ледопородное ограждение, моделируется, учитывая прочностные показатели, соответствующие данному типу пород при средней отрицательной температуре ЛПО.

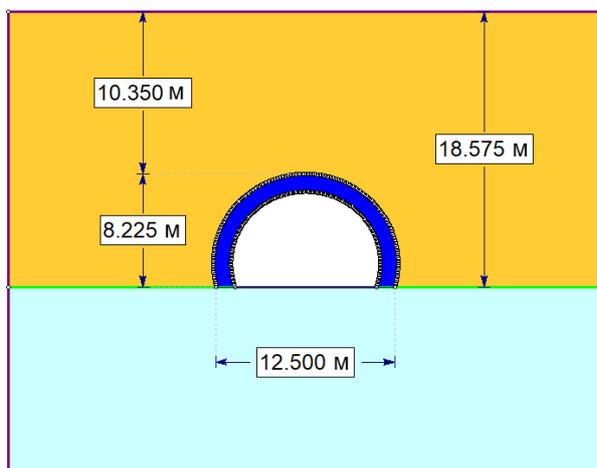
Следует отметить, что в данном случае не рассматривались теплотехнические свойства мёрзлых пород, так как расчётный модуль «Rocscience RS2» используется для анализа геомеханического состояния горных пород.

Учитывая, что мёрзлые глинистые горные породы реагируют как эластично пластичный материал, предел прочности ЛПО был описан с помощью критерия Мора-Кулона. Параметры были подобраны из научной литературы, описывающей характеристики мёрзлых моренных отложений (таблица 7).

Таблица 7 — Параметры массива замороженных горных пород

$\nu_{\text{ЛПО}}$	$\rho_{\text{ЛПО}}$	$\nu_{\text{ЛПО}}$	$E_{\text{ЛПО}}$	$c_{\text{ЛПО}}$	σ_t	$\varphi_{\text{ЛПО}}$
[-]	кг/м ³	кН/м ³	ГПа	МПа	МПа	град
0,3	1900	18,63	2,8	0,5	1	23,5

Параметры мёрзлых пород были получены из следующих источников: $\nu_{\text{ЛПО}}$ из [32]; $\rho_{\text{ЛПО}}$ из [58]; $\nu_{\text{ЛПО}}$, $E_{\text{ЛПО}}$, $c_{\text{ЛПО}}$ из [59]; σ_t из [60]; $\varphi_{\text{ЛПО}}$ из [61]. Модель ЛПО, заданная с соответствующими прочностными характеристиками в «Rocscience RS2», представлена на рисунке 3.22.



Название Материала	Цвет	Критерий Разрушения	Тип Материала
Мрамор		Хоек-Браун	Эластичный
Моренные Отложения		Мор-Кулон	Пластичный
Ледопородная Облицовка (ЛПО)		Мор-Кулон	Пластичный

Рисунок 3.22 — Схема интерпретации модели ЛПО в «Rocscience RS2»

3.2.4 Моделирование распределения смещений крепи тоннеля

Проведённое исследование устойчивости крепи тоннеля, сформированной ЛПО, учитывает два варианта размещения тоннеля:

1. Проходка тоннеля проводится в моренных отложениях с учётом того, что его почва расположена на слое устойчивых пород, представленных мрамором;
2. Проходка тоннеля проводится полностью в моренных отложениях.

Второй вариант детально рассмотрен в параграфе 3.2.8.

Исследование устойчивости крепи включает анализ трёх состояний тоннеля:

1. Незакрепленный тоннель;
2. Тоннель под защитой ЛПО;
3. Тоннель с монолитной железобетонной крепью.

Формула (3.11) описывает общее распределение смещений в крепи, где D_X и D_Y – соответственно, горизонтальные и вертикальные смещения:

$$D_t = \sqrt{D_X^2 + D_Y^2} \quad (3.11)$$

3.2.5 Моделирование устойчивости незакрепленного тоннеля

Рассмотренный гипотетический случай проходки тоннеля в неустойчивых горных породах без использования крепи показывает его разрушение (рисунок 3.23). Область основной концентрации смещений лежит выше свода тоннеля.

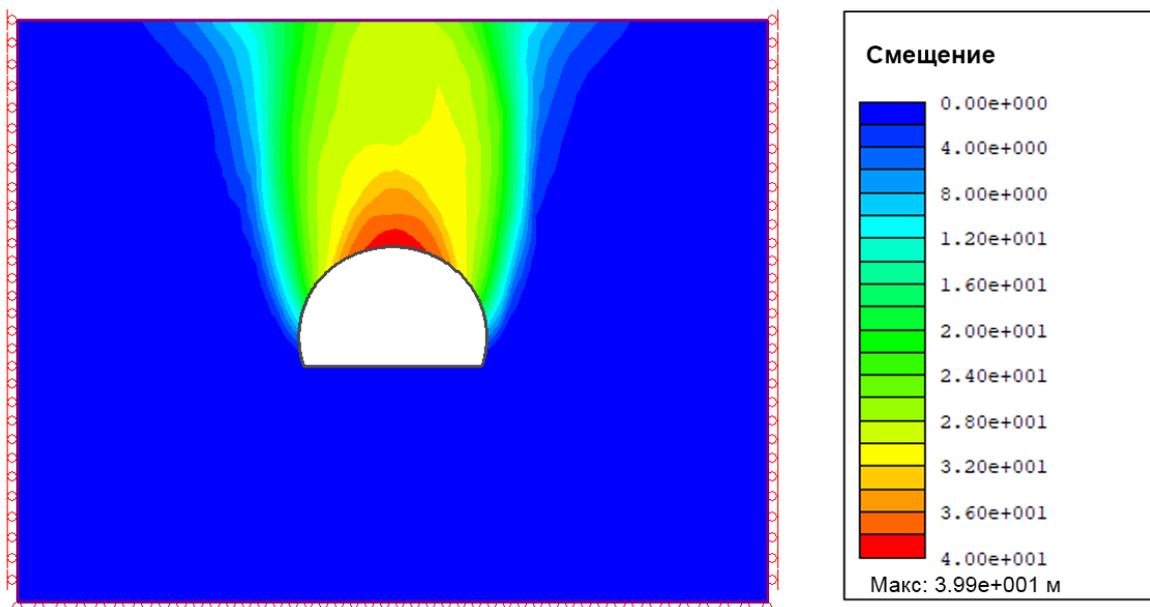


Рисунок 3.23 — Смещения тоннеля при отсутствии крепи

3.2.6 Моделирование устойчивости тоннеля, закрепленного монолитной железобетонной крепью

Учитывая отсутствие проектной документации, описывающей тип используемой крепи, для определения свойств крепи были проанализированы реализованные проекты, выполненные в моренных отложениях. Наиболее полная информация получена из проекта тоннеля «Йобергет». Тоннель был сооружен на глубине 15-20 м преимущественно в скальных породах, представленных филлитом, и пересекал 80 метровую депрессию, заполненную моренными отложениями. Учитывая низкий водоприток, тоннель был пройден без использования специальных методов изоляции подземных вод [62].

Толщина железобетонной крепи тоннеля «Йобергет» составляла 0,7 м. Анализ устойчивости крепи тоннеля «Бергосен» позволил снизить данную величину до 0,3 м, что соответствует минимально допустимому значению, указанному в стандарте Норвежского управления общественных дорог по креплению тоннелей ж/б обделкой [63]. Как видно из рисунка 3.24, наибольшая концентрация смещений при использовании крепи толщиной 0,7 м происходит в боковых частях свода тоннеля и составляет 0,343 см. При моде-

лировании тоннеля с уменьшенной толщиной крепи (рисунок 3.25) смещения возрастают до 0,439 см. Очевидно, что такое увеличение смещений не может повлиять на устойчивость тоннеля.

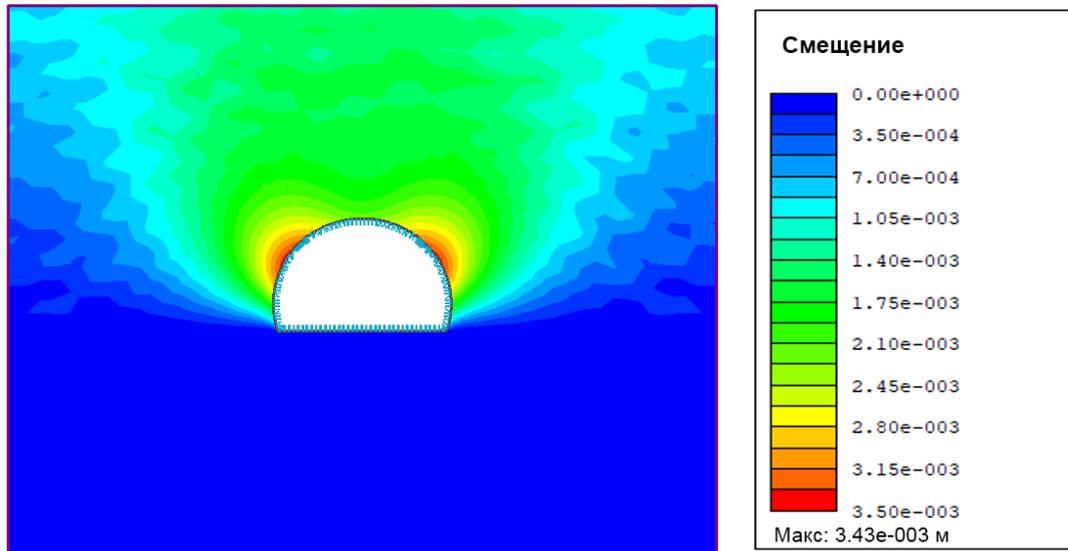


Рисунок 3.24 — Смещения, возникающие в крепи тоннеля толщиной 0,7 м

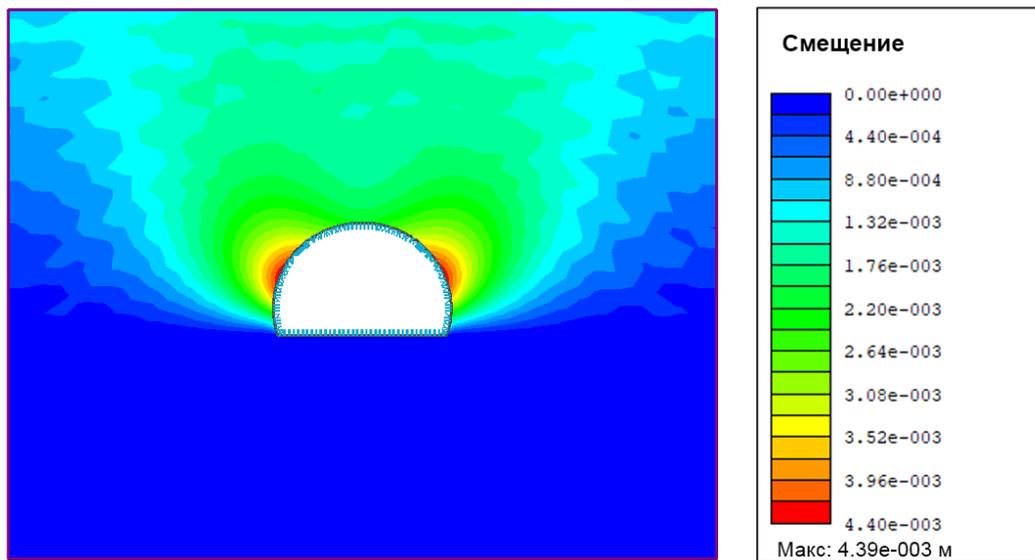


Рисунок 3.25 — Смещения, возникающие в крепи тоннеля толщиной 0,3 м

3.2.7 Моделирование устойчивости тоннеля под защитой ЛПО, опирающегося на слой скальных пород (мрамор)

При создании ЛПО для проходки тоннеля, оно должно выдерживать давление горных пород на тоннель. ЛПО принятой толщиной 1,2 м интегрировано в модель. На рисунке 3.26 показано, что смещения в созданном ЛПО сконцентрированы почти в тех же зонах, что и в случае использования монолитной железобетонной крепи. Максимальное смещение не превышает 0,31 см, что на 0,13 см меньше, чем при использовании постоянной крепи толщиной 0,3 м.

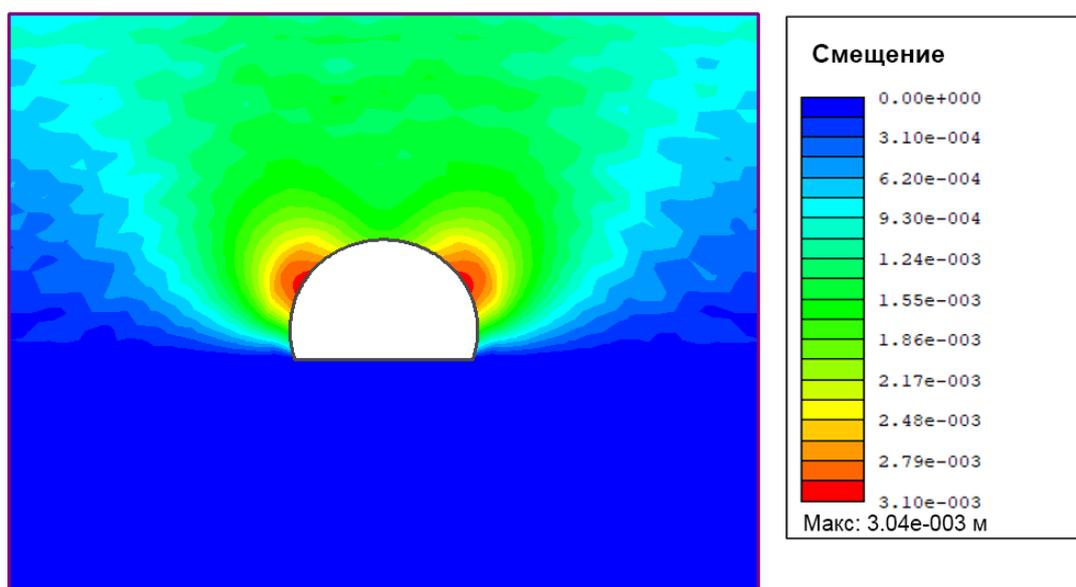


Рисунок 3.26 — Смещения тоннеля при использовании ЛПО в качестве крепи

3.2.8 Моделирование устойчивости тоннеля, пройденного в моренных отложениях

Далее рассмотрен пример расположения тоннеля в моренных отложениях, когда проходка осуществляется на 5 м выше от залегающего слоя скальных пород (мрамор). Соответственно, модель тоннеля в расчетном модуле «Rocscience RS2» была изменена для данного примера (рисунок 3.27).

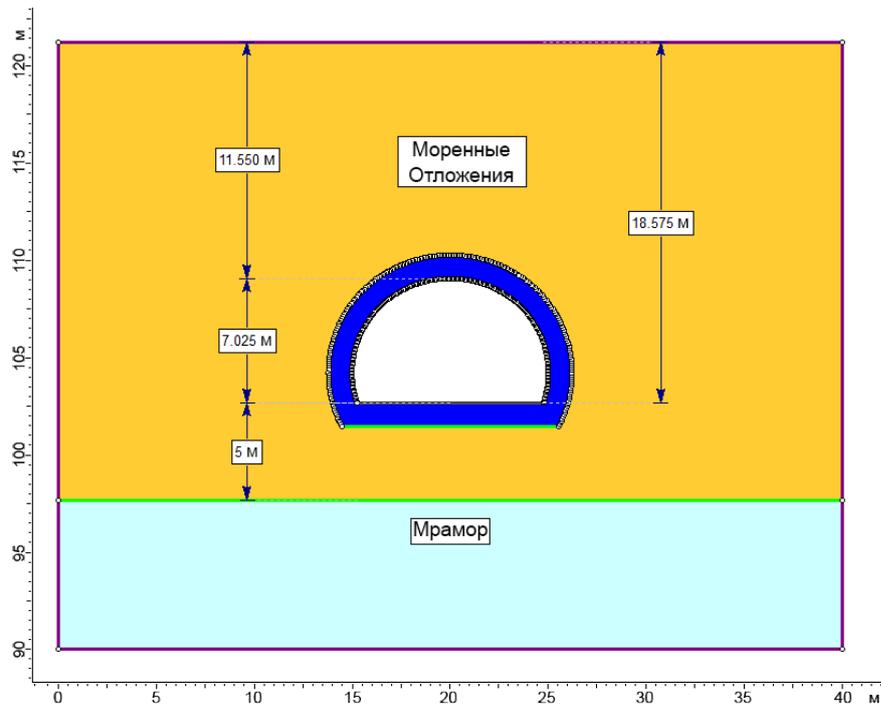


Рисунок 3.27 — Положение смещённого тоннеля

Учитывая, что водонасыщенные горные породы окружают тоннель по всему его периметру, ЛПО должно полностью покрывать тоннель с помощью пробуренных замораживающих скважин под почвой тоннеля (рисунок 3.27). Толщина ЛПО в нижней части тоннеля принята равной толщине основного ЛПО.

3.2.9 Исследование распределения смещений в крепи тоннеля, пройденного в моренных отложениях

Проведённое исследование показало, что распределение смещений при расположении тоннеля в массиве моренных отложений отличается от полученных ранее моделей при проходке тоннеля, опирающегося на скальные породы, рассмотренных в параграфе 3.2.4.

Наибольшие смещения сконцентрированы под почвой тоннеля и достигают 2,41 см в ЛПО (рисунок 3.28) и 3,17 см в ж/б крепи (рисунок 3.29). Можно сделать вывод, что смещения, действующие в крепи тоннеля, в данном случае в 10 раз больше, чем при проходке тоннеля, опирающегося на слой скальных пород.

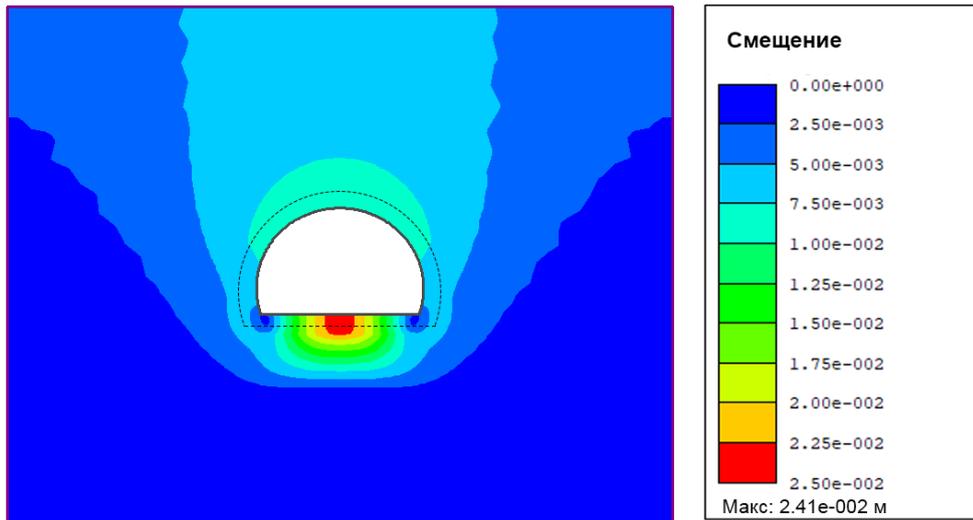


Рисунок 3.28 — Смещения ЛПО тоннеля

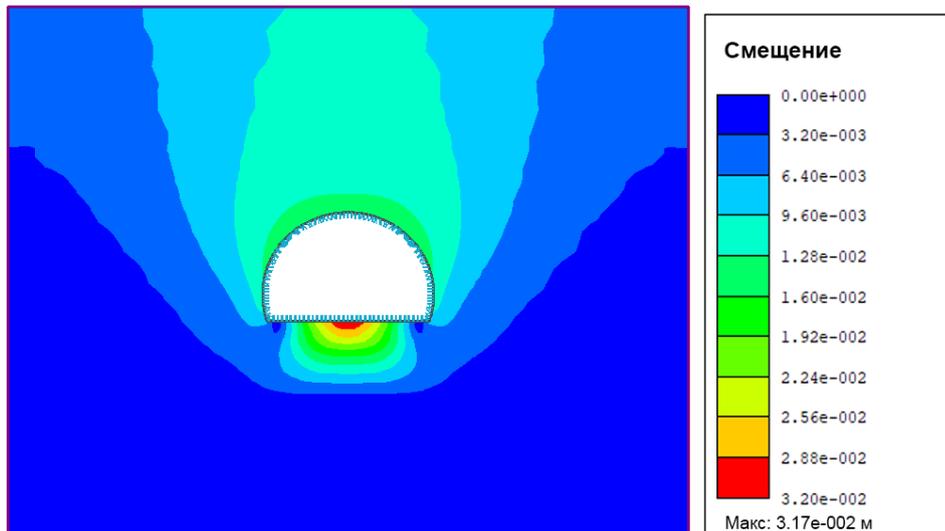


Рисунок 3.29 — Смещения монолитной железобетонной крепи тоннеля

Следует отметить, что профиль тоннеля может быть приведён в более устойчивое состояние благодаря использованию обратного свода. Данный метод детально описан в работе [64].

3.2.10 Анализ влияния свойств горных пород на смещения крепи тоннеля

Для определения влияния прочностных параметров моренных отложений на устойчивость тоннеля были проанализированы угол внутреннего трения φ , сцепление c и модуль Юнга E . Проектные величины были изменены на 10% и 20% как это показано в таблице 8.

Таблица 8 — Изменение параметров φ , c и E

		Породы в естественном состоянии					Породы в замороженном состоянии				
		-20%	-10%	Проектное значение	+10%	+20%	-20%	-10%	Проектное значение	+10%	+20%
φ	град	31,2	35,1	39	42,9	46,8	18,8	21,15	23,5	25,85	28,2
c	МПа	0,0136	0,0153	0,017	0,0187	0,0204	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
E	МПа	40	45	50	55	60	2240	2520	2800	3080	3360

Анализ был проведён для обоих случаев – для ЛПО и постоянной крепи соответственно. Смещения измерялись в двух точках: (1) – на границе тоннеля и (2) – на границе ЛПО, как это показано на рисунке 3.30.

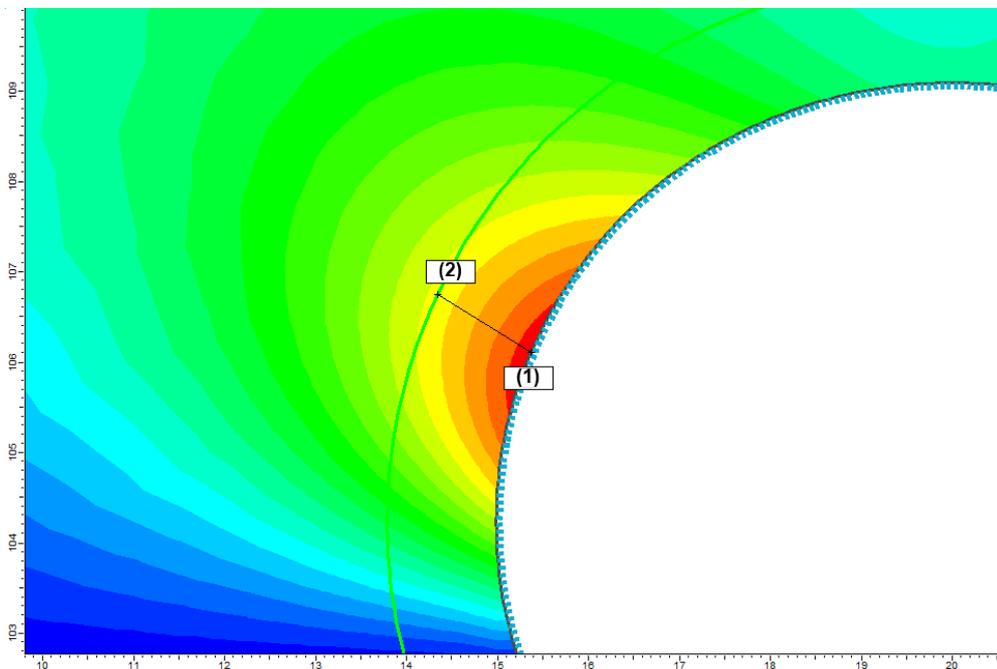
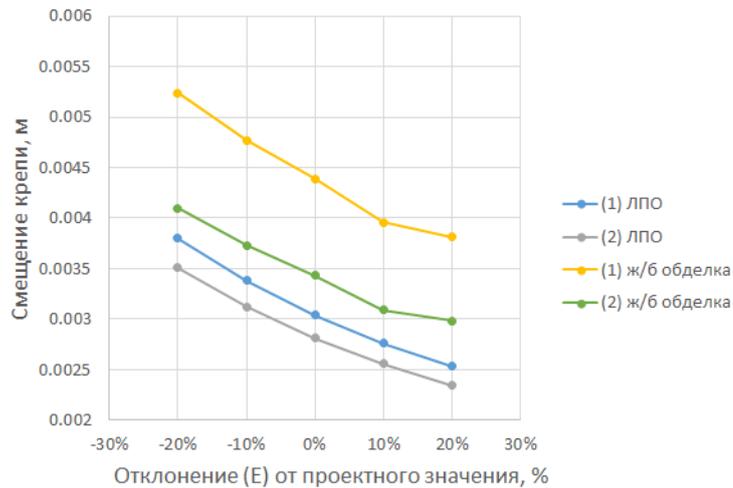
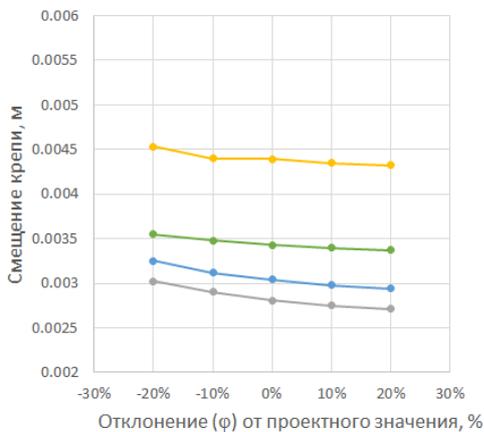


Рисунок 3.30 — Выбранные точки (1); (2) для оценки максимальных смещений крепи тоннеля

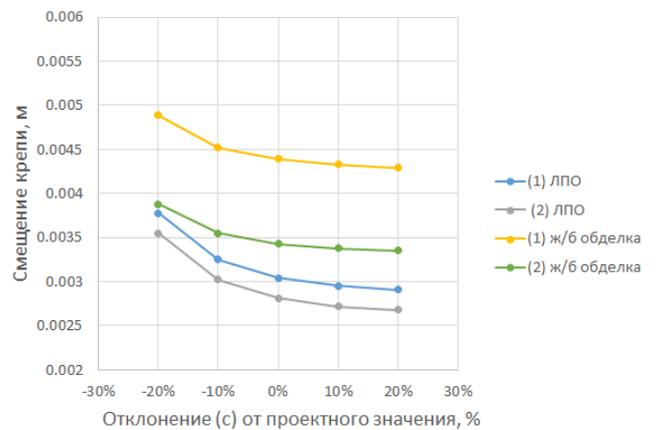
Графики на рисунке 3.31 показывают распределение смещений при изменении параметров моренных отложений.



а) Изменение модуля Юнга (E)



б) Изменение угла внутреннего трения (φ)



в) Изменение коэффициента сцепления горных пород (с)

Рисунок 3.31 — Смещения крепи тоннеля при изменении механических свойств горных пород

Как видно из рисунка 3.31, максимальные смещения при использовании ЛПО ниже, чем при использовании постоянной крепи для всех случаев. Модуль Юнга имеет наибольшее влияние на устойчивость тоннеля, как это показано на рисунке 3.31 а). Прочностные параметры φ и c имеют меньшее влияние (рисунок 3.31 б) и в). Однако, при уменьшении коэффициента сцепления, смещения на стадии использования ЛПО резко увеличиваются и почти достигают показателя смещения для постоянной крепи.

3.3 Выводы по главе

Разработана методика по исследованию реологических свойств мёрзлых горных пород, сущность которой заключается в проведении испытаний на трехосное сжатие в режиме длительной нагрузки. За основу принят способ ступенчатого нагружения на установке трёхосного сжатия, дающий возможность бокового расширения образца в условиях осесимметричного статического нагружения. Работы выполнены в программном комплексе «ABAQUS», и для описания реологического поведения мерзлых горных пород применяется расширенная модель Друккера-Прагера.

В результате моделирования устойчивости тоннелей в замороженных породах с использованием расчётного комплекса «Rosscience» – разработана геомеханическая модель ЛПО, описанная с помощью критерия предела прочности Мора-Кулона. Компьютерное моделирование смещений крепи тоннеля показало, что при использовании ЛПО в качестве временной крепи, её максимальные смещения не превышают 0,31 см при расположении почвы тоннеля на массиве скальных пород.

Установлены закономерности напряжённо-деформированного состояния системы «крепь – ЛПОд» для массива крепких дезинтегрированных пород, сущность которых заключается в том, что при сочетании в единой деформируемой системе таких разнородных по реологическим свойствам материалов как замороженная порода (ЛПО) и бетон (крепь) критерии устойчивости системы, следовательно, и параметры ЛПО определяются из условий деформационной способности крепи в конкретных температурных условиях и уровня напряжённо-деформированного состояния массива пород.

Получены зависимости смещения ЛПО от изменяющихся прочностных параметров горных пород, формирующих ледопородное ограждение. Наибольшее влияние на устойчивость крепи тоннеля оказывает значение модуля Юнга (E). Уменьшение данного параметра на 20% от проектного значения приводит к увеличению смещения крепи в 1,5 раза.

Глава 4. Рекомендации по технологии производства работ по замораживанию при проходке тоннелей в водоносных породах

4.1 Общие рекомендации по использованию способа искусственного замораживания при строительстве тоннелей в водоносных породах

Проектирование технологии искусственного замораживания должно быть основано на анализе физических и теплофизических свойств горных пород, подвергаемых процессу замораживания. После обоснования эффективности применения способа искусственного замораживания производится оценка выбора метода искусственного замораживания, характеристик холодоносителя (тип, минимальная температура), количества замораживающих и термометрических колонок, параметров замораживающих колонок, времени замораживания, необходимой мощности замораживающей станции.

Количество замораживающих колонок и мощность замораживающей станции рассчитываются после определения требуемой толщины ЛПО, которая в свою очередь зависит от геологических и гидрогеологических свойств горных пород.

Положение замораживающих колонок для проектов тоннелей, сооружаемых под защитой ЛПО, может варьироваться в зависимости от глубины заложения тоннеля. Для тоннелей неглубокого заложения может использоваться схема замораживания с поверхности земли вертикальными или наклонными замораживающими колонками. В случае, когда замораживание по вертикальной схеме представляется непрактичным, может быть применена схема горизонтального замораживания. Выбор схемы замораживания осуществляется по методикам, изложенным в работах [20; 21; 39]. Рекомендации, предложенные автором, могут использоваться для проектирования тоннелей в водоносных породах с использованием способа замораживания с помощью горизонтальных колонок, расположенных параллельно оси тоннеля.

Максимальная длина горизонтальных замораживающих колонок как правило не превышает 30-40 м [18]. Когда зона замораживания превышает

допустимую длину замораживающих колонок, может использоваться схема последовательного замораживания.

Расчет максимальной длины участка тоннеля, находящегося только под защитой ЛПО без дополнительной крепи, основан на представлении ЛПО в качестве стержня, на который действует постоянная нагрузка от массива горных пород. Длина участка тоннеля под защитой ЛПО рассчитывается по формуле (4.1) из [65]:

$$L_u \cdot P = E \cdot \tau, \quad (4.1)$$

где L_u – длина незакрепленного участка тоннеля под защитой ЛПО; P – максимальное давление на ЛПО; E – расчетная толщина ЛПО; τ – предел прочности замороженных горных пород на сдвиг.

Толщина ЛПО может быть определена расчетом по методикам, изложенным в работах [3; 35]. Оценку напряженно-деформированного состояния системы ЛПО-массив горных пород, определение максимальных смещений в ЛПО следует производить при помощи компьютерного моделирования. Последовательность этапов расчета выполняется по следующей схеме:

1. Определение геометрических параметров модели (глубина заложения тоннеля, его форма);
2. Определение граничных условий модели и слоёв залегающих пород
3. Определение параметров естественного напряженного состояния массива горных пород;
4. Определение пределов прочности горных пород в естественном и замороженном состоянии;
5. Определение конструктивных и физико-механических параметров постоянной крепи тоннеля.

Выбор критериев прочности пород основан на их соответствии деформационным свойствам. Так, в расчетном модуле «Rocscience RS2» предлагается использовать критерий Хоека-Брауна для скальных пород, определяемый зависимостью:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha, \quad (4.2)$$

где (σ'_1) и (σ'_3) – максимальное и минимальное эффективные напряжения; (σ_{ci}) – предел прочности на одноосное сжатие; m_b , s и α – постоянные, зависящие от характеристик массива скальных пород, определяемые по методике,

изложенной в работе [51]. Для несвязных пород (моренные отложения) и массива замороженных пород, формирующих ЛПО, предлагается использовать критерий Кулона-Мора:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi), \quad (4.3)$$

где τ_f – предельная нагрузка на сдвиг; σ_n – нормальное напряжение; c – сила сцепления; φ – угол внутреннего трения, которые определяются в соответствии с методикой по определению реологических свойств мерзлых горных пород, приведенной в главе 3. Методика была использована при проектировании подземных сооружений на полуострове Ямал (Приложение В) [66].

Формирование ЛПО разделено на 2 стадии. 1 – ледопородные цилиндры формируются вокруг одиночных колонок; 2 – отдельные ледопородные цилиндры формируют монолитный ледопородный массив, который наращивается благодаря работе замораживающей станции. Кроме того, в случае многорядного замораживания принимается во внимание третья стадия, когда несколько ЛПО образованных рядами замораживающих колонок образуют монолитное тело [40].

Количество замораживающих колонок зависит от принятой толщины ЛПО и диаметра тоннеля. Для определения количества колонок при однорядном замораживании в тоннелях круглого сечения, может использоваться формула (4.4) из [19]:

$$N = \frac{\pi(D + E_{\text{ЛПО}})}{S}, \quad (4.4)$$

где D – диаметр тоннеля; $E_{\text{ЛПО}}$ – толщина ЛПО; S – расстояние между замораживающими колонками.

Основными параметрами для расчета времени замораживания горных пород являются толщина ЛПО, температура замораживания, естественная температура породного массива, его теплопроводность, внешний теплоприток от массива горных пород к ЛПО и другие параметры. Для определения времени замораживания (τ , сут) следует использовать метод теплового баланса [35]:

$$\tau = \frac{Q_3}{[(Q_k - Q_{\text{ох}})24]}, \quad (4.5)$$

где Q_3 – количество холода, необходимое для замораживания заданного объёма горных пород; $Q_{\text{ох}}$ – количество холода, необходимое для охлаждения

пород, окружающих ЛПО; Q_k – теплопоглощающая способность замораживающих колонок.

Влияние теплового потока (q_ϕ) от земной поверхности к ЛПО можно не учитывать при выполнении неравенства $H/D \geq (1,5 - 2) \cdot \lambda$, где H – глубина залегания ЛПО; D – диаметр ЛПО; λ – коэффициент теплопроводности массива горных пород. Тогда:

$$Q_{ox} = 2\pi(R_H + R_B)H \cdot q_{ox} + q_\phi, \quad (4.6)$$

Значение, полученное в выражении (4.6), затем подставляется в общую формулу определения времени замораживания горных пород 4.5.

Время активного замораживания может быть сокращено при учете свойства инерционности ЛПО. Данное свойство может быть использовано при низкотемпературном замораживании с температурой холодоносителя менее -40 °С. При температуре замораживания выше -40 °С свойство инерционности учитывается при проектировании ЛПО толщиной, превышающей 3 м. Для оценки закономерностей развития ЛПО в период времени после окончания подачи холодоносителя в колонки следует применять методику, изложенную в главе 2.

4.2 Прекращение работ по замораживанию и ликвидация ледопородного ограждения

После установки постоянной крепи выполняются работы по ликвидации ЛПО. Данный процесс сопровождается оттаиванием замороженных горных пород, который может происходить естественным способом, когда оттаивание достигается только благодаря теплопритоку из массива незамороженных горных пород. В данном случае естественная скорость оттаивания в среднем не превышает 0,1-0,15 см/день в зависимости от теплофизических свойств незамороженных горных пород. Кроме того, из-за неконтролируемости процесса оттаивания, существует вероятность неравномерного размораживания ЛПО.

Процесс ликвидации ЛПО может быть интенсифицирован посредством искусственного размораживания. В этом случае осуществляют циркуляцию теплоносителя через замораживающие колонки. Температура теплоносителя

не должна превышать 2-3 °С чтобы предотвратить разрушение замораживающих колонок. После окончания процесса размораживания происходит отключение замораживающей станции, откачка теплоносителя и извлечение замораживающих колонок. Расчет времени размораживания следует вести по методу теплового баланса [35]. При расчете времени размораживания ЛПО, сформированных горизонтально направленными колонками для выработок неглубокого заложения, необходимо учитывать теплоприток к ЛПО от земной поверхности.

Учитывая, что при горизонтальной схеме процесс извлечения колонок является достаточно трудоемким, допустимо ограничиваться только их утилизацией. Тогда колонки оставляют в породе и заполняют цементно песчаной смесью [18].

4.3 Анализ рисков применения технологии искусственного замораживания

В настоящее время для прогнозирования и управления рисками в России используют два стандарта (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска и ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000-2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство), основанных на международных стандартах ИСО [67; 68]. Информация, содержащаяся в данных стандартах, носит общий рекомендательный характер для организаций широкого спектра деятельности и может применяться к любому типу риска, не зависимо от его характера. Соответственно, их применение затруднительно при оценке риска производства работ по искусственному замораживанию.

Рекомендации по оценке риска, предложенные автором, включают:

- определение основных угроз при применении способа искусственного замораживания;
- определение коэффициентов вероятности и последствия происхождения основных угроз, варьирующихся от 0 до 5;
- Расчет количественного показателя уровня риска по формуле 4.7:

$$R = L \cdot C \quad (4.7)$$

В общем случае технический риск (R) может быть представлен двумя основными критериями – вероятностью риска L (угрозы, возникающие в пределах определённого времени) и последствиями C (степень неработоспособности элементов в области, подверженной риску) [69].

Определив численные значения элементов вероятности и последствий в интервале от 0 до 5 общий уровень риска может быть оценен с помощью таблицы 9.

Таблица 9 — Оценка уровня риска [69]

Уровень риска	Значение	Описание
Низкий	1-4	Риск устраним без дополнительных затрат
Средний	5-9	Риск средне устраним. Возможно требуются доп. затраты
Высокий	10-15	Риск на границе устранимости. Доп. затраты должны быть оценены и применены для снижения риска
Очень высокий	16-25	Риск неустраним. Доп. затраты должны быть применены для снижения риска

Оценка рисков для специальных методов строительства должна быть основана на анализе различных эффектов от технических недочетов, изменений в проекте и расчете безопасности, времени и стоимости. Анализ рисков для всего геотехнического проекта должен включать оценку таких форс-мажоров как наводнение или землетрясение, поставку материалов, финансирование проекта, отношения с другими организациями, связанными со строительством и других параметров в зависимости от национальных стандартов.

В технической литературе, посвященной оценке риска, метод искусственного замораживания сравнивается с другими специальными способами строительства с учетом сочетания уровня риска и затрат на выбранный метод [18; 70]. В таблице 10 приведены типы угроз, их вероятность и последствия.

Таблица 10 — Оценка риска для метода искусственного замораживания[18]

Угроза	Вероятность (L)	Последствие (C)
Нарушения проведения подготовительных операций	0-1,5	0-3,04
Изменение геологии	0-1,5	0-3,32
Изменение гидрогеологии	0-2	0-4,68
Деформация замораживающих колонок	0-1,5	0-3,74
Неточный мониторинг процесса формирования ЛПО	0-1	0-3,95
Поломка оборудования замораживающей станции	0-0,5	0-1,355

В целом, следующие угрозы вызывают наибольший риск в проекте использования искусственного замораживания:

- разрыв замораживающих колонок;
- изменение свойств замороженных горных пород;
- недостоверное определение гидрогеологических условий;
- повреждение объектов на поверхности земли из-за пучения и ползучести горных пород;
- второстепенные угрозы, такие как неточный мониторинг и поломка оборудования.

4.4 Обоснование рекомендаций по технологии проходки тоннеля Бергосен (Норвегия) с применением способа искусственного замораживания горных пород

4.4.1 Геология и гидрогеология области строительства тоннеля

Наиболее детализированное описание геологических и гидрогеологических особенностей области строительства тоннеля представлено в технических отчетах [71] и [72]. В целом были проанализированы данные пяти скважин (рисунок 4.1). Скважины BR 6, BR 1 и BR 7 находятся на линии проходки тоннеля, в то время как BR 1 расположена приблизительно в центре зоны ослабленных пород.

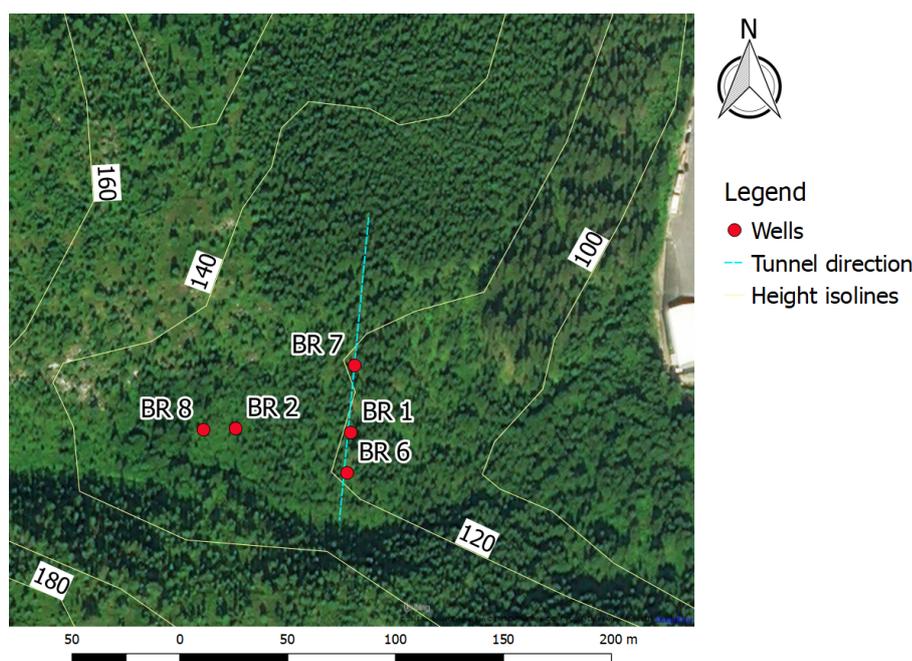
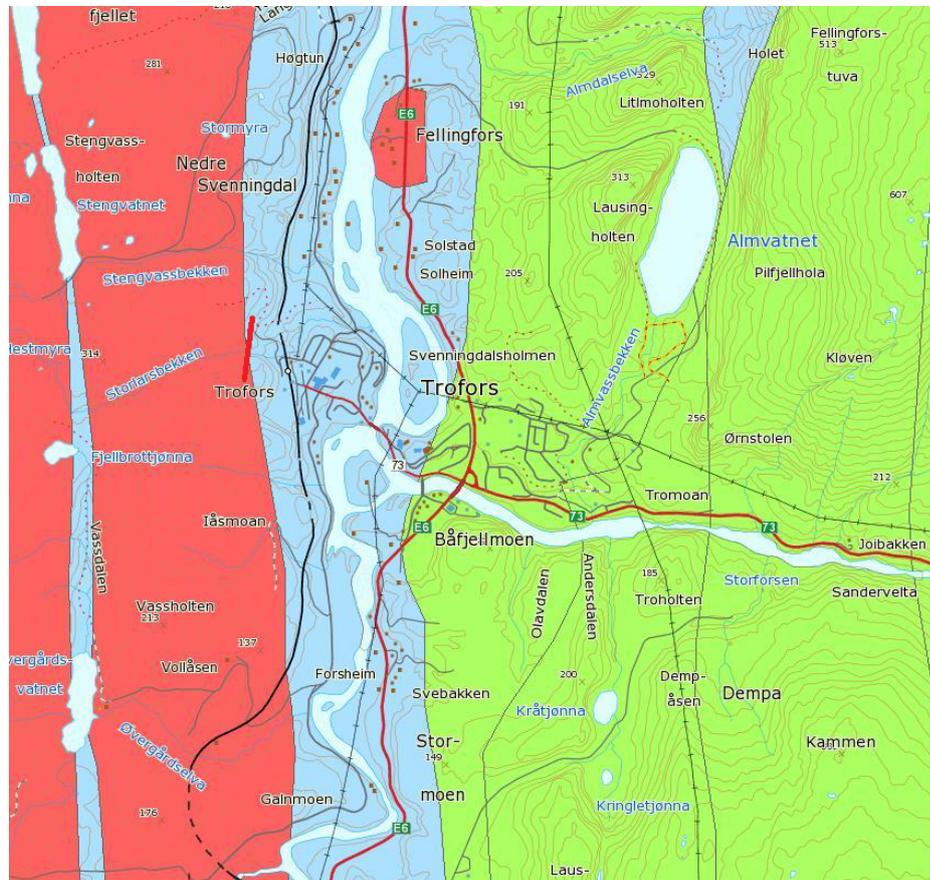


Рисунок 4.1 — Расположение скважин

Участок, отведенный для строительства тоннеля, лежит на пересечении отложений известняка и гранита, что предположительно является случаем, когда докембрийские скальные породы были интродуцированы каледонскими скальными породами, формировавшимися во время силурийского и девонского периодов.

Геологическая карта, составленная геологическим институтом Норвегии, показывает, что трасса тоннеля пройдет через пересечение гранита и

известняка (рисунок 4.2). Однако, дальнейшие геологические исследования выявили, что скальные породы на участке строительства тоннеля представлены в основном мрамором, который пересечен слоем гранита и тонким слоем слюдяного сланца [73].



- Bergart
- = Kalkstein, dolomitt
 - = Granitt, granodioritt
 - = Glimmergneis, glimmerskifer, metasandstein, amfibolitt
- Tunnel route

Рисунок 4.2 — Карта скальных пород без учета покрывающих пород [74]

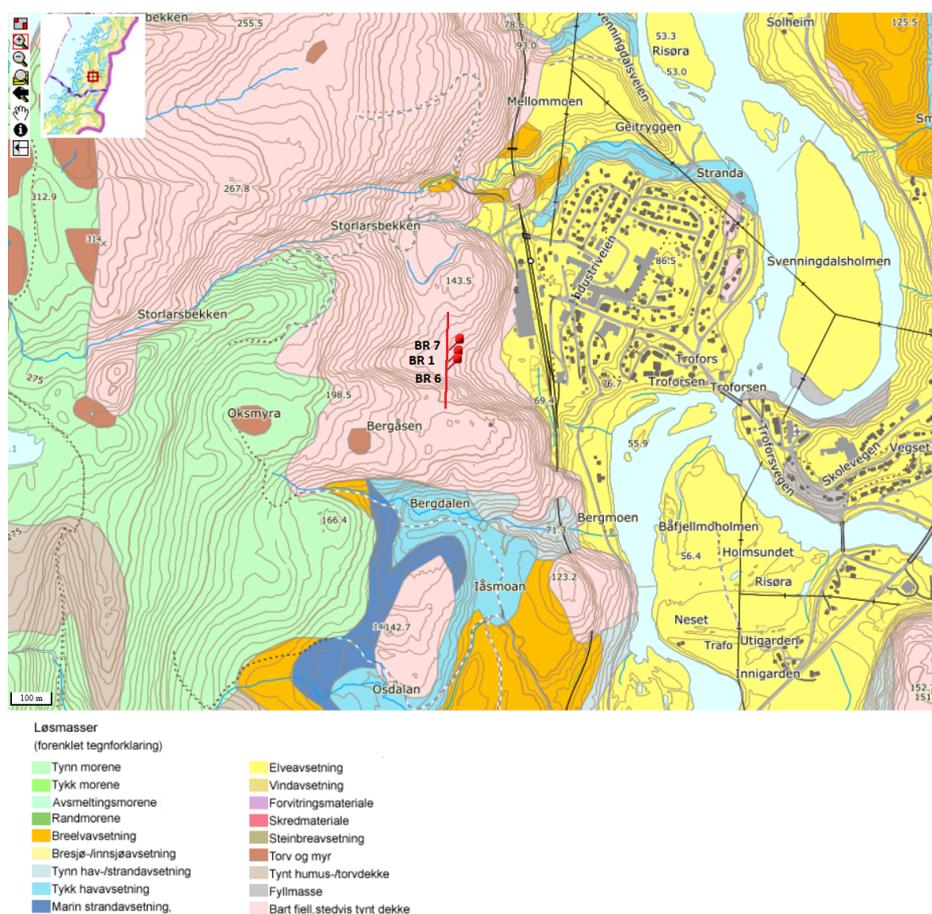


Рисунок 4.3 — Геологическая карта [74]

Как показано на геологической карте (рисунок 4.3), верхний слой горных пород в области проходки тоннеля сложен из выступающих на поверхность коренных пород, сглаженных движением ледника. Аллювиальные отложения залегают в районе города Трофорс, расположенного к востоку от трассы тоннеля. моренные отложения находятся к западу от трассы тоннеля. Депрессия, заполненная моренными отложениями, расположена под пологими плато с относительно крутым склоном к югу, западу и востоку (рисунок 4.4).

Основная часть моренных отложений в депрессии представлена смесью суглинка, песка и гравия. Нижняя часть морены, которая находится примерно на одном уровне с почвой тоннеля, предположительно состоит из обломочных горных пород с высоким водопритоком [72]. Однако, геологические исследования этой области позволяют предположить, что при сооружении тоннеля на проектной глубине, его почва будет лежать на слое скальных пород, представленных мрамором.

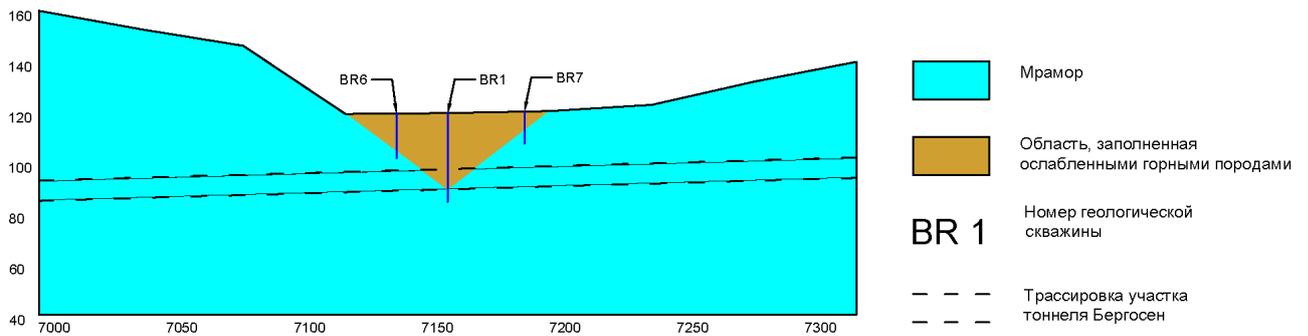


Рисунок 4.4 — Продольный разрез трассы тоннеля через зону моренных отложений

Анализ гранулометрического состава образцов горных пород со скважин BR 1, BR 2, BR 6, BR 7 позволяет получить информацию о составе морены (рисунок 4.5). Параметр $M_d = Q_{50}$ определяет средний размер 50% зерен. $S_o = \log Q_{75} - \log Q_{25}$ измеряет уклон гранулометрической кривой.

Таким образом подтверждено, что моренные отложения представлены гравием и суглинком. Однако стоит отметить, что данные, полученные из графика, ограничены глубиной, на которой были отобраны образцы горных пород и которая соответствует 5-10 метрам.

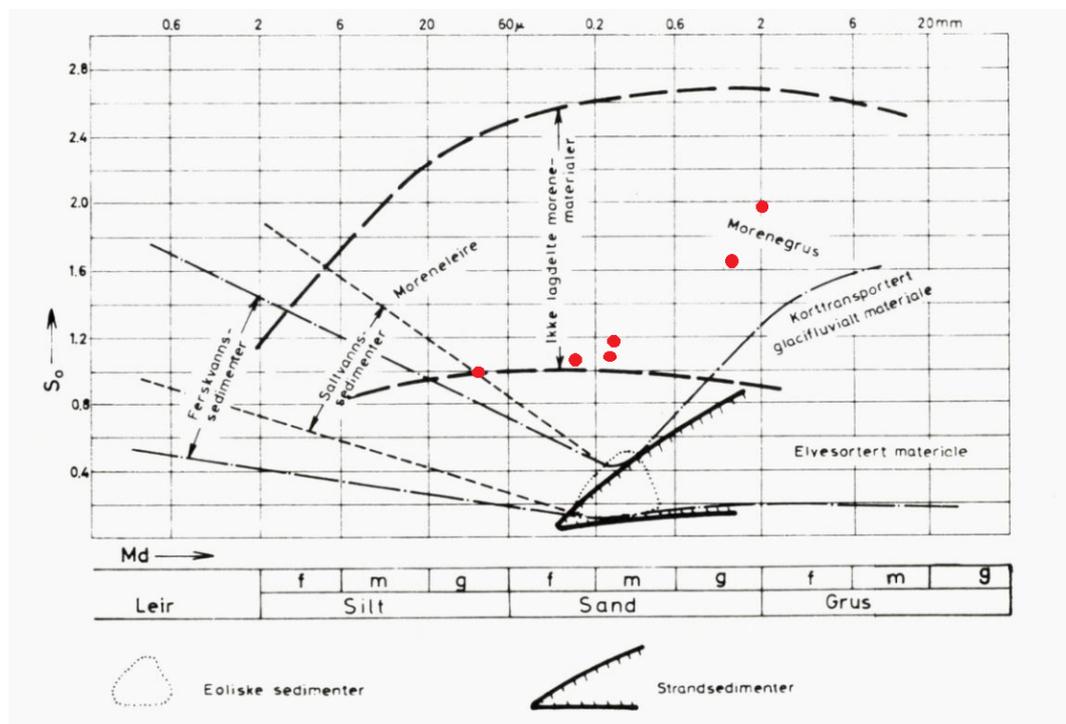


Рисунок 4.5 — Определение типа горных пород по его гранулометрическому составу [75]

Проектные отчеты [72; 73] содержат информацию о среднем уровне грунтовых вод, гидравлической проводимости и пористости горных пород.

4.4.2 Проектирование ледопородного ограждения для тоннеля Бергосен

Наиболее распространенная формула для определения толщины ЛПО основана на методе Домке. Однако, учитывая неглубокое залегание тоннеля в области, где требуется замораживание (12-20 м), в данном случае можно использовать формулу Ляме-Гадолина (4.8), которая дает наиболее корректный результат для глубины заложения тоннеля до 50 м.

$$E_{\text{ЛПО}} = R_t \sqrt{[\sigma_c]/([\sigma_c] - 2P) - 1}, \quad (4.8)$$

где R_t – радиус тоннеля, м; $[\sigma_c]$ – прочность горных пород на одноосное сжатие. Она может быть определена как:

$$[\sigma_c] = \frac{\sigma_{c(\text{ЛПО})}}{F_s} \quad (4.9)$$

где $\sigma_{c(\text{ЛПО})}$ – предел прочности горных пород на одноосное сжатие, МПа; F_s – фактор безопасности; P – давление пласта водонасыщенных горных пород на ЛПО, МПа.

Для данного случая $R_t = 5,21$ м; $\sigma_{c(\text{ЛПО})} = 3$ МПа [76].

$$P = p_0 + p_h, \quad (4.10)$$

где p_0 – пластовое давление, МПа p_h – гидростатическое давление, МПа.

$$p_0 = u_s \cdot h \cdot \tan^2 \left[\frac{90^\circ - \varphi}{2} \right] \quad (4.11)$$

$$p_h = u_{gw} H_{gw}, \quad (4.12)$$

где u_s – удельный вес горных пород; h – высота слоя горных пород над тоннелем, м; φ – угол внутреннего трения в горных породах. u_{gw} – удельный вес подземных вод; H_{gw} – высота водяного столба над тоннелем.

Таким образом:

$$E_{\text{ЛПО}} = 5,21 \sqrt{\frac{1,5}{1,5 - 2(0,1 + 0,13)}} - 1 \approx 1,1 \text{ м} \quad (4.13)$$

Следуя рекомендациям, изложенным в технической литературе, минимальная толщина ЛПО $E_{\text{ЛПО}} = 1,2 \text{ м}$ [35].

Следует отметить, что величина толщины ЛПО существенно зависит от типа горных пород. Учитывая, что моренные отложения представлены из смеси несвязных материалов, реальное значение толщины ЛПО может отличаться от определённого выше.

В практике проектирования ЛПО, замораживающие колонки располагаются ближе к внешнему контуру замораживания (рисунок 4.6). Внутреннее расстояние принимается как $0,6 \cdot E_{\text{ЛПО}}$, в то время как внешнее равно $0,4 \cdot E_{\text{ЛПО}}$. Расстояние между замораживающими колонками принимается равным $0,8 - 1,2 \text{ м}$. Из таблицы 11 видно, как будет изменяться количество замораживающих колонок в зависимости от изменения расстояния между ними.

Таблица 11 — Количество замораживающих колонок в зависимости от расстояния между ними

S	м	0,8	1	1,2
N	[-]	28	22	18

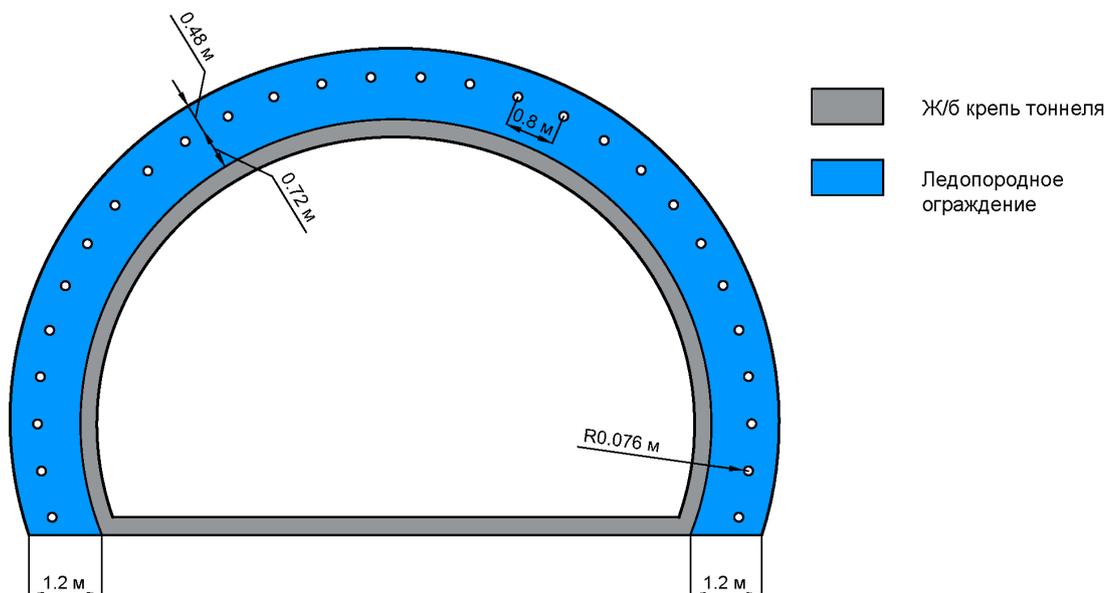


Рисунок 4.6 — Схема ЛПО тоннеля Бергосен

Температура породы t_s на участке, отведенном для строительства тоннеля Бергосен равна $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, пористость n равна $0,4$, а скорость

фильтрации достигает 12 м/день [77; 80]. Удельная теплоёмкость C_s равна 3,515 кДж/(кг °С) [81]. Для обеспечения полного смыкания ЛПО в зоне фильтрующих пород мощность замораживающей станции должна быть больше максимального внешнего теплопритока в момент максимальной скорости фильтрационного потока между ледопородными цилиндрами. В зарубежной практике широко используется формула, предложенная Санджерсом с Сэйлсом, по которой можно рассчитать критическую скорость фильтрации, при которой произойдет смыкание ЛПО [24]:

$$u_c = \frac{k_{f1}}{4S \cdot \ln\left(\frac{S}{4r_0}\right)} \frac{t_0 - t_p}{t_e - t_0} \quad (4.14)$$

где k_{f1} – теплопроводность породы в замороженном состоянии, Вт/(м °С); t_0 – температура замерзания воды, °С ; t_p – температура холодоносителя в колонках, °С ; t_e – естественная температура породного массива, °С; S – расстояние между смежными колонками, м; r_0 – внутренний радиус замораживающей колонки, м.

Учитывая относительно низкое значение изменения температуры замерзания, в последующих расчетах им можно пренебречь. Значения температуры замораживания для разных значений расстояния между колонками и скорости фильтрации, рассчитанных по формуле 4.14, показаны в таблице 12.

Таблица 12 — Изменение температуры замораживания в зависимости от принятого расстояния между колонками и скорости фильтрации

u_c	м/день	3	9	12
T_f ($S=0,8$ м)	°С	-9	-32	-44
T_f ($S=1$ м)	°С	-15	-51	-69
T_f ($S=1,2$ м)	°С	-22	-72	-96

Температура замораживания изменяется от -9 до -96 °С. При учете наиболее неблагоприятного случая, когда скорость фильтрации достигает 12 м/день и зная что средняя температура холодоносителя в замораживающих колонках обычно не ниже -40 °С, расстояние между колонками $S=0,8$ м даёт наиболее приемлемый результат.

Для определения времени замораживания были проанализированы оба метода, описанные выше. Однако вычисления по методу теплового баланса

дали более реалистичный результат, чем метод Хакимова, так как его метод значительно зависел от естественной температуры горных пород и более приемлем для температур близких к 20 °С.

Параметры, необходимые для расчета времени замораживания сведены в приложении Г.

Время замораживания определяется по формулам 4.15 – 4.24.

$$q_1 = 0,16 \cdot 1000 \cdot 4,187 \cdot (2,5 - 0) = 1674,8 \quad (4.15)$$

$$q_2 = 0,16 \cdot 1000 \cdot 330 = 52800 \quad (4.16)$$

$$q_3 = 0,176 \cdot 900 \cdot 2,108(0 - (-16)) = 5342,5 \quad (4.17)$$

$$q_4 = 0,6 \cdot 1680 \cdot 3,515(0 - (-16)) = 65539,5 \quad (4.18)$$

$$q_f = 1674,8 + 52800 + 5342,5 + 65539,5 = 125356,8 \quad (4.19)$$

$$Q_3 = 125356,8 \cdot 438,1 = 54914274 \quad (4.20)$$

Влияние теплопритока от земной поверхности:

$$13,5/6,41 \leq (1,5) \cdot 1,2 \quad (4.21)$$

Учитывая что левая часть неравенства (4.21) меньше правой, в расчетную формулу времени замораживания необходимо добавить величину влияния теплового потока от земной поверхности на ЛПО:

$$q_\phi = -\frac{2\pi \cdot 1,2(0 - 2,5)}{\ln\left(\frac{2 \cdot 13,5}{6,41} + \sqrt{\frac{13,5^2}{(6,41/2)^2} - 1}\right)} = 8,905 \quad (4.22)$$

$$Q_{ox} = 2\pi \cdot (5,21 + 6,41) \cdot 20 \cdot 16 + 8,905 = 23372,3 \quad (4.23)$$

$$Q_{ft} = \pi \cdot 2 \cdot 0,076 \cdot 25 \cdot 20 \cdot 1062,9 = 279159,5 \quad (4.24)$$

Следовательно, время активного замораживания можно определить из формулы (4.25):

$$t = \frac{54914274,2}{(279159,5 - 23372,3) \cdot 24} = 9_{\text{дней}} \quad (4.25)$$

Как это было отмечено выше, вычисленное время может не совпадать с реальным. Для корректного определения времени необходимо провести детальный анализ геологических и гидрогеологических свойств замораживаемого массива горных пород, а также определить мощность замораживающей станции.

4.4.3 Стоимость работ по замораживанию

Оценка стоимости замораживания зависит от многочисленных факторов. Одним из параметров, определяющих стоимость проекта является расход электроэнергии замораживающей станции. Так, примерные затраты электроэнергии на процесс замораживания можно определить по формуле (4.26):

$$Q_{rp} = 1,1 \cdot Q_{ft} = 307075,5 \text{кДж} = 853 \text{кВт ч} \quad (4.26)$$

Для достижения температуры холодоносителя -40°C , наиболее эффективно применять двухступенчатую систему охлаждения, так как одноступенчатые эффективны до температур равных -20°C [78]

Оценка ориентировочной стоимости проекта основана на эмпирическом методе, т.е сравнение с другими схожими проектами может дать примерную стоимость данного проекта. В целом, необходимо заморозить объем горных пород, равный $26,136 \cdot 20 = 522,72 \text{ м}^3$, что в сравнении с проектом тоннеля в центре г. Осло определяет стоимость в 1,11 млн USD или 9 млн NOK в 2018. Недавний проект тоннеля в городе Мосс стоил 75 млн NOK в 2007 году для замораживания 200 метрового участка [29]. Средняя температура в зоне замораживания составляла -10°C . В качестве кооланта по проекту использовался аммиак. Толщина ЛПО составляла 3-4 м с 35 замораживающими колонками для каждого этапа. В целом в том проекте было 7 этапов по 40 м каждый, затраты на бурение составляли около 50% от полной стоимости проекта. Таким образом, без учета бурения общая стоимость работ составляла 37,5 млн NOK, или 5,4 млн NOK для каждой стадии. Учитывая инфляцию, стоимость равна 6,8 млн NOK на 2018 год [79]. Приблизительно это составляет 3,4 млн NOK для замораживания 20 метрового участка тоннеля.

4.4.4 Риски применения способа искусственного замораживания для формирования ЛПО в тоннеле «Бергосен»

Оценка фактора риска для метода искусственного замораживания в тоннеле «Бергосен» основана на подсчете наивысших факторов вероятности и последствий, обозначенных в таблице 10. Согласно данным, представленным в таблице 13, "Неточный мониторинг" процесса замораживания и "Поломка оборудования" замораживающей станции имеют наименьшее влияние на значение риска. Риски, связанные с нарушением проведения "Подготовительных операций" "Изменением геологии" и "Деформацией" замораживающих колонок имеют среднее влияние, тогда как "Изменение гидрогеологии" принимается наиболее значительным риском для проекта создания ЛПО. Среднее значение фактора риска равно 5, что соответствует уровню среднего риска согласно таблице 9.

Таблица 13 — Оценка рисков для проекта ЛПО в тоннеле Бергосен

Метод	Угроза	Вероятность	Последствие	Фактор риска	Значение риска (среднее)
Искусств. замораживание	Подготовительные операции	1,5	3,04	4,56	4,86
	Изменение геологии	1,5	3,32	4,98	
	Изменение гидрогеологии	2	4,68	9,36	
	Деформация	1,5	3,74	5,61	
	Неточный мониторинг	1	3,95	3,95	
	Поломка оборудования	0,5	1,355	0,6775	

Заключение

Диссертация является научной квалификационной работой, в которой в результате выполненных автором исследований изложено решение актуальной научной задачи обоснования технологических параметров искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах на основе установления закономерностей и зависимостей влияния теплопритока от земной поверхности, свойства самопроизвольного увеличения ЛПО после окончания активной фазы замораживания горных пород и оценки напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО», что имеет значение для развития технологии тоннелестроения.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором:

1. Проведенный анализ исследований современных методов определения времени замораживания горных пород показал, что наиболее близкие результаты, подтвержденные отечественной и зарубежной практикой строительства тоннелей получены при расчете времени замораживания по методу теплового баланса.
2. При формировании ЛПО для тоннелей неглубокого заложения процесс замораживания может быть замедлен, а форма ледопородного цилиндра искажена в результате воздействия теплопритока от земной поверхности к ЛПО. Установлено, что теплоприток с поверхности земли не влияет на формирование ЛПО при выполнении неравенства $H/D \geq (1,5 - 2) \cdot \lambda$.
3. Установлено, что ледопородное ограждение горизонтальных горных выработок способно увеличивать свою толщину после прекращения подачи холодоносителя в колонки, т. е. обладает свойством инерционности во времени. Самопроизвольное увеличение размеров ЛПО наблюдается при большой толщине (более трёх метров) независимо от температуры замораживания, или же при низких температурах замораживания (менее минус 40 °С) независимо от толщины ЛПО. Учет свойства инерционности позволяет обосновывать продолжительность технологических пауз, определять время замораживания, управлять

процессом формирования ледопородного ограждения, поддерживая заданные его свойства и размеры во времени.

4. Разработана методика компьютерного моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния крепи-ЛПО, с помощью которой можно определять толщину ЛПО по известным значениям реологических свойств мерзлых горных пород, формирующих ЛПО — модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициента сцепления и угла внутреннего трения. Для определения данных параметров была разработана методика исследований реологических свойств мёрзлых пород, сущность которой заключается в проведении испытаний на трехосное сжатие режиме длительной нагрузки. Входные параметры для численного моделирования были приняты в ООО «Газпром геотехнологии» для проектирования подземных резервуаров на полуострове Ямал.
5. Компьютерное моделирование устойчивости тоннелей, выполненное с использованием программного комплекса «Rocscience», показало, что деформации ледопородной крепи ниже, чем при использовании постоянной железобетонной крепи для всех случаев моделирования, рассмотренных в диссертации. При этом модуль Юнга (E) имеет наибольшее влияние на устойчивость тоннеля. Уменьшение данного параметра на 20% приводит к увеличению смещения крепи в 1,5 раза. Прочностные параметры (угол внутреннего трения ϕ и сцепление c) имеют меньшее влияние.
6. Разработаны рекомендации по технологии производства работ по замораживанию горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах. Разработанные рекомендации были частично использованы при проектировании ЛПО тоннеля Бергосен (Норвегия) и позволили определить толщину ЛПО, время активного замораживания, оценить степень риска применения способа замораживания, оценить стоимость строительства тоннеля в водоносных породах.

Список литературы

1. *Вялов, С. С.* Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов / С. С. Вялов, Ю. К. Зарецкий, С. Э. Городецкий. — Л. : Стройиздат, 1981. — 199 с.
2. *Ранев, К. З.* Обоснование технологии создания ледопородных ограждений при строительстве глубоких шахтных стволов способом замораживания в Болгарии : диссертация ... кандидата технических наук : 05.15.04 / К. З. Ранев. — М., 1986. — 164 с.
3. *Пуголовкин, В. Н.* Исследование горизонтального замораживания грунтов при строительстве городских подземных коммуникаций : диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00 / В. Н. Пуголовкин. — М., 1972. — 169 с.
4. *Насонов, И. Д.* Исследование параметров замораживания при проведении горизонтальных выработок / И. Д. Насонов, М. Н. Шуплик, В. И. Ресин. — Москва : Недра, 1980. — 247 с.
5. *Давыдов, В. В.* Справочник по сооружению шахтных стволов специальными способами / В. В. Давыдов, Е. Г. Дуда, А. И. Кавешников ; под ред. Н. Г. Трупак. — М. : Недра, 1980. — 391 с.
6. *Дорман, Я. А.* Искусственное замораживание грунтов при строительстве метрополитенов / Я. А. Дорман. — М. : Транспорт, 1971. — 271 с.
7. *Насонов, И. Д.* Закономерности формирования ледопородных ограждений при сооружении стволов шахт / И. Д. Насонов, М. Н. Шуплик. — М. : Недра, 1976. — 236 с.
8. *Трупак, Н. Г.* Замораживание горных пород при проходке стволов / Н. Г. Трупак. — М. : Углетехиздат, 1954. — 896 с.
9. *Шуплик, М. Н.* Обоснование и разработка ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов при строительстве городских подземных сооружений: дис... д-ра. техн. наук / М. Н. Шуплик. — М, 1989. — 318 с.

10. *Шуплик, М. Н.* Технология искусственного замораживания грунтов с применением твердых криоагентов в подземном строительстве / М. Н. Шуплик, В. Н. Борисенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2006. — № 8.
11. *Вакуленко, И. С.* Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве / И. С. Вакуленко, П. В. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 3. — С. 338—346.
12. *Николаев, П. В.* Обоснование выбора промежуточного хладоносителя для искусственного замораживания грунтов / П. В. Николаев, М. Н. Шуплик // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 1.
13. *Смирнов, В. И.* Практика и перспективы строительства подземных хранилищ жидких углеводородов в вечномерзлых породах / В. И. Смирнов, М. Н. Шуплик, И. С. Вакуленко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 5.
14. *Хакимов, Х. Р.* Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов / Х. Р. Хакимов. — Акад. наук СССР Ин-т мерзлотоведения им. В. А. Обручева. — Изд-во Академии наук СССР, 1957. — 191 с.
15. *Лукьянов, В. С.* Применение метода гидравлических аналогий к расчетам температурного режима грунтов с учетом переноса тепла и к выводу некоторых критериев подобия / В. С. Лукьянов // Инж.-физ. журн. — 1962. — Т. 5. — С. 52—57.
16. *Васильева, М. В.* Конечно-элементная реализация задачи замораживания фильтрующих грунтов / М. В. Васильева, Н. В. Павлова // Математические заметки СВФУ. — 2013. — Т. 20, № 1.
17. *Jessberger, H. L.* Theory and application of ground freezing in civil engineering / H. L. Jessberger // Cold Regions Science and Technology. — 1980. — Vol. 3, no. 1. — P. 3—27.
18. *Harris, J. S.* Ground freezing in practice / J. S. Harris. — London : Thomas Telford, 1995. — 264 p.
19. *Трупак, Н. Г.* Замораживание грунтов в подземном строительстве / Н. Г. Трупак. — Москва : Недра, 1974. — 278 с.

20. *Маршак, С. А.* Сооружение горизонтальных выработок в сложных горногеологических условиях [Текст] : Автореферат дис. работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. А. Маршак. — М., 1961. — 20 с.
21. *Малиованов, Д. И.* Совершенствование технологии и средств механизации проходки вертикальных стволов шахт [Текст] : Автореферат дис., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук / Д. И. Малиованов. — М., 1963. — 50 с.
22. *Карасев, Ф. А.* Исследование способа проведения горизонтальных горных выработок с применением подземных передвижных замораживающих установок в условиях шахт Подмосквовного угольного бассейна : диссертация ... кандидата технических наук : 05.15.04 / Ф. А. Карасев. — М., 1975. — 162 с.
23. *Гелескул, В. Н.* Исследование и совершенствование технологии замораживания пород горизонтальными колонками при проведении выработок в особо сложных гидрогеологических условиях : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.15.04 / В. Н. Гелескул. — Тула, 1993. — 22 с.
24. *Sanger, F.* Thermal and rheological computations for artificially frozen ground construction / F. Sanger, F. Sayles // *Engineering geology*. — 1979. — Vol. 13, no. 1—4. — P. 311—337.
25. THE PRINCIPLES OF NORWEGIAN TUNNELLING / A. Hansen [et al.]. — 2017. — Publication no 26. NORWEGIAN TUNNELLING SOCIETY.
26. *Backer, L.* The Oslofjord subsea road tunnel. Crossing of a weakness zone under high water pressure by freezing / L. Backer, O. Blindheim // *Challenges for the 21st Century*, Alten et al.(eds). — 1999. — P. 309—316.
27. *Andreassen, F.* Oslofjordtunnelen – Erfaringer fra frysing og driving gjennom frysesonen / F. Andreassen // *Proceedings from the Norwegian conference on rock blasting, rock mechanics and geotechnical engineering*. — NJF. 1999.
28. *Jøsang, T.* Ground freezing techniques used for tunneling in Oslo City Centre / T. Jøsang // *2nd Int Symp on Ground Freezing, Norway, Trondheim*. — 1980. — P. 969—979.

29. *Berggren, A.-L.* Grunnfrysing for tunnel under Moss sentrum [Электронный ресурс] / A.-L. Berggren. — 2007. — URL: https://www.moss.kommune.no/_f/i978c0a0e-b313-4e77-a5f9-21beaf276f0b/referanse_3_geofrost_iup-00-a-01582_00_001.pdf.
30. *Sturk, R.* Advanced Ground Freezing at the Hallandsås Project, Sweden / R. Sturk, B. Stille // *Geomechanics and Tunnelling*. — 2008. — Vol. 1, no. 5. — P. 512—517.
31. *Schubert, T.* Experiences from the TBM drive through the Hallandåsen in Sweden / T. Schubert // *Fjellsprengningsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk, Oslo*. — 2013. — P. 3.1—3.22.
32. *Johansson, T.* Artificial Ground Freezing in Clayey Soils: Laboratory and Field Studies of Deformations During Thawing at the Bothnia Line : PhD thesis / Johansson Teddy. — KTH, 2009.
33. *Vuorela, M.* The driving of metro tunnels at Helsinki with the aid of ground freezing / M. Vuorela, T. Eronen // *Developments in Geotechnical Engineering*. Vol. 28. — Elsevier, 1982. — P. 377—384.
34. *Forchheimer, P.* Wasserbewegung durch boden / P. Forchheimer // *Z. Ver. Deutsch, Ing.* — 1901. — T. 45. — С. 1782—1788.
35. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства / И. Д. Насонов [и др.]. — М. : Недра, 1992. — 351 с.
36. Временные методические рекомендации по определению оптимальных параметров технологии замораживания пород при сооружении стволов шахт. — Белгород : ВИОГЕМ, 1978. — 32 с.
37. Технологические схемы замораживания горных пород при проходке вертикальных стволов шахт Донбасса. — Харьков : ВНИИОМШС, 1978.
38. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей ВСН 189-7. — М. : МИНТРАНССТРОЙ, 1978. — 116 с.
39. *Трупак, Н. Г.* Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений / Н. Г. Трупак. — М. : Недра, 1979. — 344 с.
40. *Хакимов, Х. Р.* Замораживание грунтов в строительных целях / Х. Р. Хакимов. — М. : Госстройиздат, 1962. — 187 с.

41. *Королёв, И. О.* Обоснование параметров технологии замораживания грунтов при нерегулярном расположении колонок : диссертация ... кандидата технических наук : 05.15.04 / И. О. Королёв. — М., 1987. — 149 с.
42. *Шуплик, М. Н.* Обоснование математической модели формирования ледогрунтовых ограждений при строительстве подземных сооружений / М. Н. Шуплик, И. А. Никитушкин // *Строительная геотехнология.* — 2017. — С. 69.
43. *Вакуленко, И. С.* Особенности формирования ледопородного ограждения после окончания подачи холодоносителя в замораживающие колонки / И. С. Вакуленко, М. Н. Шуплик // *ГИАБ.* — 2019. — С. 100.
44. *Цытович, Н. А.* Механика мерзлых грунтов: общая и прикладная : учебное пособие для инженерно-строительных вузов / Н. А. Цытович. — 2-е изд. — URSS : Либроком, 2009. — 445 с.
45. *Andersland, O. B.* Frozen ground engineering / O. B. Andersland, B. Ladanyi. — 2nd. — Hoboken : Wiley, 2004. — 363 p.
46. *Ageenko, V. A.* Triaxial compression testing of frozen soils for the determination of rheological parameters / V. A. Ageenko, M. N. Tavostin, I. S. Vakulenko // *Горные науки и технологии.* — 2018. — Т. 3. — С. 18—24.
47. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М. : Стандартинформ, 2011. — 84 с.
48. *Hoek, E.* Support for very weak rock associated with faults and shear zones / E. Hoek // *Rocscience.com.* — 1991.
49. *Saiang, D.* Hoek-Brown vs. Mohr-Coulomb—results from a three-dimensional open-pit/underground interaction model / D. Saiang, X. Gywnn, N. Marshall // *Bergmekanikdagen 2014.* — 2014.
50. *Сас, И. Е.* Об особенностях модели поведения скального грунта Хоека-Брауна и задании её исходных параметров / И. Е. Сас, А. В. Бершов // *Инженерные изыскания.* — 2015. — № 13. — С. 42—47.
51. *Hoek, E.* Rock mass properties / E. Hoek // *Practical rock engineering.* Available at www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner. — 2007.

52. *Александров, А. С.* Развитие теоретических положений комплексного расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу и пластическому деформированию : диссертация ... доктора технических наук : 05.23.11 / А. С. Александров. — Омск, 2017. — 377 с.
53. *Geosciences, T.* Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials (Geologic and Otherwise) [Электронный ресурс] / T. Geosciences. — 2013. — URL: <http://www.jsg.utexas.edu/tyzhu/files/Some-Useful-Numbers.pdf>.
54. *Karlsrud, K.* Design and performance of deep excavations in soft clays / K. Karlsrud, L. Andresen. — 2008.
55. *Geotechdata.info.* Soil Young's modulus [Электронный ресурс] / Geotechdata.info. — 2018. — URL: <http://geotechdata.info/parameter/soil-elastic-young-modulus.html>.
56. *Melbourne School of Engineering.* 8. Strength of soils and rocks [Электронный ресурс] / Melbourne School of Engineering. — 2018. — URL: https://people.eng.unimelb.edu.au/stsy/geomechanics_text/Ch8_Strength.pdf.
57. *Gella, K. P.* Geotechnical and Geological Characterization of a Quick Clay Site at Flotten, Trondheim : Master's thesis / Gella Konjit Paulos. — NTNU, 2017.
58. *Yershov, E. D.* General geocryology / E. D. Yershov. — New York : Cambridge university press, 2004. — 580 p.
59. *Andersland, O. B.* An introduction to frozen ground engineering / O. B. Andersland, B. Ladanyi. — New York : Chapman & Hall, 1994. — 351 p.
60. *Akagawa, S.* Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe / S. Akagawa, K. Nishisato // Cold Regions Science and Technology. — 2009. — Vol. 57, no. 1. — P. 13—22.
61. *Johansson, M.* Ground freezing of weathered rock in the Mölleback zone at the Hallandsås project: Calculations for optimal freezing design / M. Johansson. — 2012.
62. *Langåker, M. Ø.* Joberget tunnel-Analysis of stability and support design for tunneling in soil : Master's thesis / Langåker Margrete Øie. — NTNU, 2014.
63. *Prosesskode 1.* Standard beskrivelse for vegkontrakter / Statens Vegvesen. — R761. — 2015.

64. Rock Support in NORWEGIAN TUNNELLING / P. Bollingmo [et al.]. — 2010. — Publication no 19. NORWEGIAN TUNNELLING SOCIETY.
65. *Berggren, A.* The Oslofjord subsea tunnel, a case record / A. Berggren // Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils. Louvain-La-Neuve, Belgium: AA Balkema. — 2000. — P. 267—272.
66. *Вакуленко, И. С.* Опыт строительства и перспективы использования подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения отходов бурения / И. С. Вакуленко, В. И. Смирнов, С. Д. Сурин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 1.
67. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска. — М. : Стандартинформ, 2012. — 69 с.
68. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000-2010 Менеджмент риска. Принципы и руководство. — М. : Стандартинформ, 2012. — 20 с.
69. *Shahriar, K.* Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions / K. Shahriar, M. Sharifzadeh, J. K. Hamidi // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2008. — Vol. 23, no. 3. — P. 318—325.
70. *Phoon, K.-K.* Risk and reliability in geotechnical engineering / K.-K. Phoon, J. Ching. — CRC Press, 2017. — 624 p.
71. Geoteknikk E6-01/02. N-TR/SMALVATNET-BÅFJELLMO NORD-MOSJØEN PARSELL: BRATTÅSEN-LIEN, PROFIL 0-7475 / Statens Vegvesen. — 2013. — Ressursavdelingen Nr. 2010231837-66.
72. Hydrologi, Ev. 06 Bergåstunnelen, Svenningdal - Valryggen, hydrogeologisk rapport / Statens Vegvesen. — 2018. — Ressursavdelingen, 50725-HYDR-2.
73. Geologi. E6 Tunnel ved Trofors i Grane kommune. Ingeniørgeologisk rapport til reguleringsplan / Statens Vegvesen. — 2013. — Ressursavdelingen Nr. 2010231837-66.
74. *Ng.no.* Bedrock N250 [Электронный ресурс] / Ng.no. — 2018. — URL: <http://geo.ngu.no/kart/kartkatalog/>.

75. *Selmer-Olsen, R.* Ingeniørgeologi del 1, generell geologi, 2. utg., 281 pp / R. Selmer-Olsen // Tapir, Trondheim. — 1976.
76. *Martin-Luther-Universität.* 3 Results: Plasticity, compaction, and unconfined compressive strength (qu) [Электронный ресурс] / Martin-Luther-Universität. — 2018. — URL: <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/06/06H107/t4.pdf>.
77. *Håndbok 021: Vegtunneler / Statens Vegvesen.* — Oslo, 2010.
78. *Repski, A.* Artificial ground freezing refrigeration plant optimization : Master's thesis / Repski Alex. — University of Saskatchewan, 2015.
79. *Norges Bank.* Price calculator [Электронный ресурс] / Norges Bank. — 2018. — URL: <https://www.norges-bank.no/en/Statistics/Price-calculator/>.
80. *Johansen, Ø.* Varmeledningsevne av jordarter / Ø. Johansen. — Trondheim, 1975.
81. *Farouki, O.* Thermal Properties of Soils / O. Farouki, C. R. Research, E. L. (U.S.) — U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research, Engineering Laboratory, 1981. — (CRREL monograph).

Приложение А

Сравнение проектов по искусственному замораживанию горных пород в странах Скандинавского полуострова

Проект	Тип горных пород	Положение замораживающих колонок	Глубина тоннеля	Длина замораживаемой зоны	Кол-во замораживающих колонок	Толщина ЛПО	Темп. холодоносителя	Время замораживания
-	-	-	[м]	[м]	-	[м]	[°C]	[Недели]
Тоннель в центре г. Осло (1980, Norway)	Обломочные породы	Горизонт.	15	26	56	5	-15	8
Тоннель Ослофьорд (1999, Norway)	Верхний слой: Моренные отложения (гравий, песок, суглинок) Нижний слой: Обломочные породы	Горизонт.	120	30	28	2,5	-28	12
Тоннель в г. Мосс (2007, Norway)	Моренные отложения	Горизонт.	22	200	35x7	3-4	-40	144
Тоннель Халландсос (2011, Sweden)	Выветренный гранит и глинистые материалы	Горизонт.	150	233	16x3	2,1-5,4	-40	26
Тоннель Ботния (2002, Sweden)	Моренные отложения	Вертикал.	25	95	350	3	-15	13
Тоннель в г. Хельсинки (1980, Finland)	Моренные отложения	Горизонт.	25	30	34	2,5	-26	8

Приложение Б

**Параметры, определяемые для проектирования ледопородного
ограждения**

Параметр	Ед. изм.	Обозначение	Значение
Толщина ледопородного ограждения	м	E	1,8
Наружный радиус замораживающих колонок	м	r_0	0,073
Расстояние между колонками	м	l	1,2
Количество колонок	шт	N	22
Радиус, по которому расположены колонки	м	R_0	3,34
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта	Вт/(м °С)	λ_1	2,9
Удельная теплоемкость мерзлого грунта	кДж/(кг °С)	c_1	1,046
Удельная теплоемкость талого грунта	кДж/(кг °С)	c_2	1,256
Объемный вес мерзлого грунта	кг/м ³	γ_1	1800
Объемный вес талого грунта	кг/м ³	γ_2	1900
Льдистость	д. е.	i	0,19
Пористость грунта	д. е.	n	0,37
Удельный вес грунта	кг/м ³	γ	2100
Весовая влажность грунта	д. е.	w	0,225
Естественная температура грунта	°С	t_e	12
Средняя температура в мерзлой зоне	°С	t_{cp}	-8
Радиус влияния замораживания	м	R	7
Теплосодержание грунта	кДж/м ³	ρ	146440
Температура рассола в замораживающих колонках	°С	t_p	-20
Температура промерзания грунта	°С	t_0	0
Земной теплоприток к замораживающим колонкам	Вт/м ²	q	2,326
Средняя влажность грунта	д. е.	w_{cp}	0,7
Средняя плотность грунта	кг/м ³	ρ_r	1500
Удельная теплоемкость тв. частиц грунта	кДж/(кг °С)	c_r	1,256
Плотность воды	кг/м ³	ρ_v	1000
Удельная теплоемкость льда	кДж/(кг °С)	c_{λ}	334,9
Коэффициент теплопередачи от поверхности замораживающих колонок к горным породам	Вт/(м ² °С)	a	139,2
Удельная теплоемкость воды	кДж/(кг °С)	C_v	4,186
Плотность льда	кг/м ³	ρ_{λ}	900

Приложение В

Справка о внедрении рекомендаций по технологии искусственного замораживания горных пород

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО «Газпром геотехнологии»

_____ Хлопцов В.Г.

14» мая 2019 г.



СПРАВКА

Результаты диссертационной работы Вакуленко Ивана Сергеевича «Обоснование параметров технологии искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах» переданы в ООО «Газпром геотехнологии» в виде «Рекомендаций по технологии искусственного замораживания горных пород при проходке тоннелей в водоносных породах» и приняты к использованию для определения реологических свойств мерзлых пород по разработанной автором методике при проектировании подземных резервуаров на полуострове Ямал.

Начальник отдела технологического проектирования и сопровождения объектов подземного хранения в криолитозоне

_____ О.И. Савич

Приложение Г

Параметры для определения времени замораживания при проектировании ЛПО для тоннеля Бергосен

Параметр	R_i	R_e	L	$E_{\text{ЛПО}}$	S
Размерность	м	м	м	м	м
Значение	5,21	6,41	20	1,2	0,8

Параметр	N	n	t_s	t_f	t_0
Размерность	-	-	°C	°C	°C
Значение	25	0,4	2,5	-16	0

Параметр	ρ_{gw}	ρ_i	ρ_s	q_f	k_f
Размерность	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	кДж/(м ² ч)	Вт/(м °C)
Значение	1000	900	1680	16	2

Параметр	r_0	Q	C_i	C_{gw}	C_s
Размерность	м	кДж/кг	кДж/(кг °C)	кДж/(кг °C)	кДж/(кг °C)
Значение	0,076	330	2,108	4,187	3,515