

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Шуплик Михаил Николаевич

Москва, 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время способ искусственного замораживания широко используется для возведения подземных сооружений в сложных гидрогеологических условиях. Зачастую данный способ применяют для защиты от водопритока объектов неглубокого заложения, в том числе автодорожных и метро тоннелей. Для таких объектов принято использовать замораживание с помощью замораживающих колонок с поверхности земли. Однако, в случае плотной городской застройки или из-за особенностей рельефа данная схема затруднена. В связи с этим возникает необходимость в горизонтальном замораживании для формирования ледопородного ограждения (ЛПО) вокруг тоннеля, которое выполняет функцию временной крепи на время проходки тоннеля и возведения постоянной крепи. Опыт применения горизонтального замораживания в последние годы помимо России имеет место в Норвегии, Швеции, Финляндии, Японии, США и других странах. С учетом 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 закономерность формирования ЛПО. Существующие методы определения времени замораживания для создания ЛПО проектной толщины были разработаны применительно к ЛПО, создаваемых с помощью замораживающих колонок, пробуренных с поверхности земли. Обоснованность их применения к ЛПО, сформированным с помощью колонок, расположенных вдоль оси тоннеля, не установлена. 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.

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 напряжённо-деформированного состояния породного массива, вмещающего тоннель, а также

методика исследования реологических свойств мёрзлых пород в условиях объёмного напряжённого 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 $H/D \geq (1,5 \div 2) \cdot \lambda$.
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 цитирования Scopus, 1 – в тезисах докладов.

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

Автор выражает благодарность научному руководителю проф., д.т.н. М. Н. Шуплику, проф., д.т.н. Б. А. Картозия, коллективу кафедры СПСиГП, сотрудникам ООО «Газпром геотехнологии» за методическую помощь в проведении исследований, полезные замечания и ценные советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной диссертации, сформулированы цель, задачи исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ существующих исследований по проблемам замораживания горных пород горизонтальными замораживающими колонками, перспектив способа искусственного замораживания в подземном строительстве, рассмотрен опыт применения данной схемы в России и за рубежом.

Для замораживания горных пород с помощью замораживающих колонок, направленных вдоль оси тоннеля (горизонтальное замораживание), 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 замораживающих колонках при температуре от -35 до -196 °С (безрассольный способ замораживания).

В результате анализа проведённых исследований по искусственному замораживанию горных пород можно сделать вывод, что данный способ нашел применение при строительстве автодорожных, коллекторных и кабельных тоннелей, шахт, тоннелей метрополитена, строительство которых ведётся в сложных гидрогеологических условиях – при пересечении сильно обводнённых горных пород.

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.

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 др. 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. Берггрена, Б. Ладаного.

Однако, объем выполненных ранее исследований оказался недостаточен, особенно при использовании способа искусственного замораживания для проходки тоннелей неглубокого

заложения. При возведении ЛПО в тоннелях неглубокого заложения процесс замораживания может быть замедлен, а форма ЛПО искажена от воздействия теплопритока от земной поверхности к ЛПО. Вследствие этого ЛПО имеет неправильную форму и переменную толщину.

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 точно определить, за какое время сомкнется ледопородное ограждение.

Методика расчета ЛПО для горизонтальных выработок, разработанная И. Д. Насоновым, М. Н. Шупликом, В. И. Ресиным и В. Н. Пуголовкиным, 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.

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 вокруг шахтных стволов. Стоит отметить, что исследования устойчивости проводились для ЛПО, созданных с помощью вертикальных или наклонных замораживающих колонок, а устойчивость ЛПО горизонтальной формы оценена не была.

В результате анализа литературных источников и опыта промышленного внедрения технологии замораживания горных пород при проходке горизонтальных выработок были сформированы задачи, решение которых позволяет достичь поставленные цели.

Во второй главе проведено исследование влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ЛПО, выполнен анализ расчетных методик по определению времени замораживания вертикально направленными замораживающими колонками для проходки шахтных стволов и изучена возможность их применения для замораживания горизонтальными колонками при проходке тоннелей в обводненных породах, установлена способность самопроизвольного увеличения толщины ЛПО после окончания замораживания.

Для оценки влияния теплопритока от земной поверхности на закономерность формирования ЛПО, создаваемого через замораживающие колонки, расположенные параллельно оси тоннеля, рассмотрим задачу в следующей постановке.

Ледопородное ограждение (рис. 1) расположено на глубине H от поверхности земли, горные породы однородные с коэффициентом теплопроводности λ .

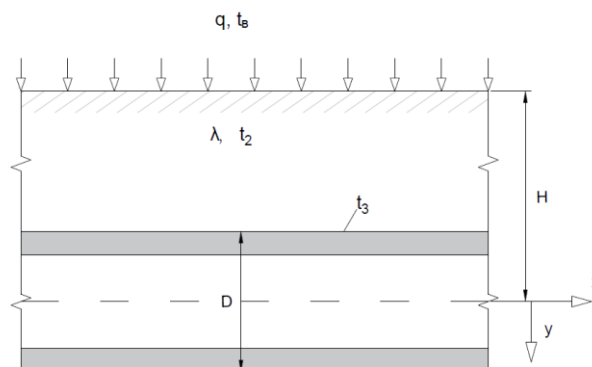


Рисунок 1 — Расчетная схема влияния теплопритока от земной поверхности на ЛПО

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

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

В формуле (1) 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 (1). 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.

Анализ выполненных расчетов по формуле (1) при различных исходных данных показывает, что тепловой поток от поверхности земли в основном зависит от соотношения H/D и коэффициента теплопроводности горных пород λ .

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

В диссертации приведен анализ существующих методов определения времени замораживания горных пород, широко используемых в реальных проектах. К настоящему времени для расчета времени замораживания с целью создания ЛПО вокруг шахтных стволов используют следующие методы: балансовый метод; метод Х. Р. Хакимова, метод Н. Г. Трупака и метод Я. А. Дормана.

Результаты анализа указанных расчетных методов применительно к горизонтальному замораживанию при строительстве тоннелей представлены в таблице 1. Существующие методы расчета времени замораживания породного массива были проверены на реально построенных объектах, в том числе для тоннелей Яузского разгрузочного канала, коллектора под Новолюблинским тоннелем и тоннеля в центре г. Осло (Норвегия).

Таблица 1 — Время замораживания горизонтальными колонками

	Реальное время замораживания	Расчетное время по методу:			
		Тепловой баланс	Хакимов	Трупак	Дорман
	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

Анализ расчетных формул для определения времени замораживания при создании ЛПО в горизонтальных выработках, подтвержденный отечественной и зарубежной практикой строительства тоннелей, показал, что метод теплового баланса оказался наиболее точным из всех перечисленных.

Анализ литературных источников по вопросам формирования ЛПО во времени показал, что после завершения подачи в замораживающие колонки холодоносителя наблюдается дальнейший рост толщины ЛПО. Свойство ЛПО увеличивать свою толщину после прекращения подачи холодоносителя в колонки можно назвать свойством тепловой инерции ледопородного ограждения, происходящей в результате выравнивания температур в ЛПО. В современной практике проектирования процесса замораживания свойство инерционности не учитывается и исследования по его изучению не проводились, хотя учет такого свойства может привести к существенному сокращению времени и средств на создание ЛПО заданных размеров при проходке тоннелей с применением способа искусственного замораживания.

В работах И. О. Королева и М. Н. Шуплика получено уравнение для определения координатно-временного положения границы промерзания ЛПО произвольно расположенными в плане замораживающими колонками N:

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

где Ei – интегральная экспонента; q – теплосъём с единицы длины замораживающей колонки в единицу времени; x, y – текущие координаты; x_i, y_i – координаты расположения замораживающих колонок; t – текущее время, τ – безразмерное время.

В диссертационной работе решена задача по исследованию закономерности формирования ледопородного ограждения по прекращению подачи холодоносителя в замораживающие колонки.

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

$$Ei \left(\frac{x^2}{4t_0\tau} \right) - Ei \left[\frac{x^2}{4t_0(\tau-1)} \right] - \frac{t_0}{t_1} Ei(\alpha^2) = 0, \quad (3)$$

где t_0 – безразмерная величина.

Так как толщина ледопородного ограждения E в замковой плоскости равна $2u$ при $x = 1/2$, то из уравнения (3) следует уравнение для определения зависимости $E(\tau)$:

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ Ei \left[\frac{E^2 + (2n-1)^2}{16t_0\tau} \right] - Ei \left[\frac{E^2 + (2n-1)^2}{16t_0(\tau-1)} \right] \right\} - \frac{t_0}{t_1} Ei(\alpha^2) = 0 \quad (4)$$

По вышеприведенным формулам были выполнены расчеты, в которых принято, что замораживание осуществляется в горных породах со следующими теплофизическими свойствами: $Q = 10^8$ Дж/м³; $\lambda_1 = 2,9$ Вт/м °С; $\lambda_2 = 2,3$ Вт/м °С; $C_1 = 2,06 \cdot 10^6$ Дж/м³ °С; $C_2 = 2,64 \cdot 10^6$ Дж/м³ °С. Начальная температура горных пород и температура фазового перехода принимались равными соответственно 10 °С и 0 °С. Расчеты проводились с применением ЭВМ и 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 и 3, где кривая 1 соответствует температуре ледопородного цилиндра $\bar{T} = -15,6$ °С; кривая 2: $\bar{T} = -44,2$ °С; кривая 3: $\bar{T} = -57,7$ °С.

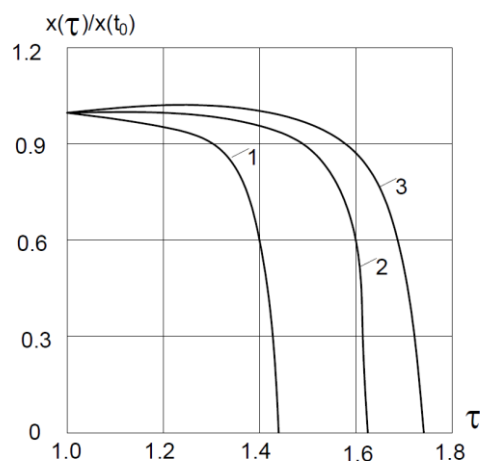


Рисунок 2 — Зависимость относительного радиуса ледопородного цилиндра от относительного времени

Анализ кривых, изображенных на рис. 2 показал, что свойство инерции развития одиночного ледопородного цилиндра выражено довольно слабо – относительное приращение радиуса цилиндра на 13% происходит лишь при начальной средней температуре последнего $\bar{T} = -57,7\text{ }^{\circ}\text{C}$; однако, при низкотемпературном безрассольном замораживании (например, при замораживании жидким азотом) следует ожидать больших значений относительного приращения радиуса ледопородного цилиндра.

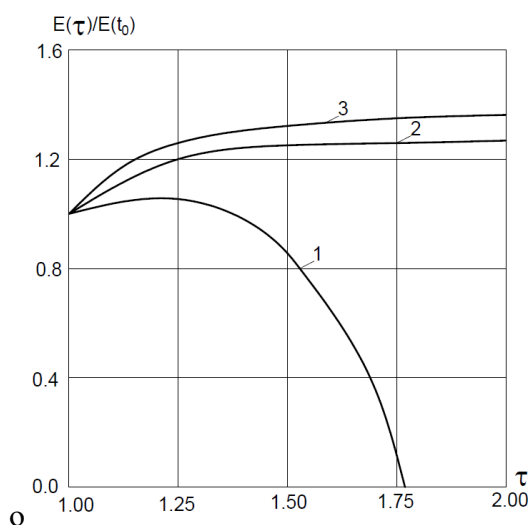


Рисунок 3 — Зависимость относительной толщины ЛПО от относительного времени

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что свойство инерции в развитии ЛПО выражено 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 рис. 3 следует, что продолжительность инерционного нарастания толщины ограждения может превышать время активного замораживания.

В третьей главе представлена методика определения реологических свойств образцов многолетнемёрзлых пород (ММП), разработана методика компьютерного моделирования устойчивости ледопородной крепи тоннеля. Выполненные исследования предусматривали экспериментальное определение прочностных и деформационных свойств ММП в лабораторных условиях для расчета устойчивости подземного сооружения.

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 ММП 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 минус 15 °С и поддерживать её постоянной величиной с погрешностью $\pm 0,2$ °С. Испытания проводились при температуре минус 6 °С, 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 ММП в условиях сжатия. Для исследования изготавливались образцы из монолитов ММП, как это регламентирует ГОСТ 12248-2010.

Для испытания ММП в условиях одноосного и трехосного сжатия использовался стабилометр, который разработан НПП «Геотек» (рис. 4).



Рисунок 4 — 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 минус 10 °С.

В качестве гидравлической жидкости, создающей боковое давление, использовалась водно-спиртовая смесь, незамерзающая при температурах до минус 15 °С.

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 в нагрузочном устройстве до 50 кН с полным контролем напряжений и деформаций при температуре минус 6 °С.

В процессе нагружения производилось по три цикла «разгрузка-нагрузка».

Статистическая обработка результатов определения деформационных характеристик (E) и (μ) представлена в виде гистограмм на рисунках 5-6. На графиках представлены средние значения и доверительный интервал отклонений. Отклонения не превышают 10%, что соответствует корректности полученных результатов.

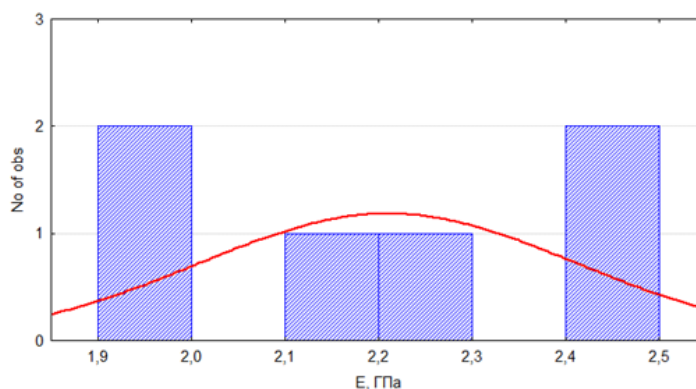


Рисунок 5 — Гистограмма распределения модуля Юнга (E) по результатам шести определений

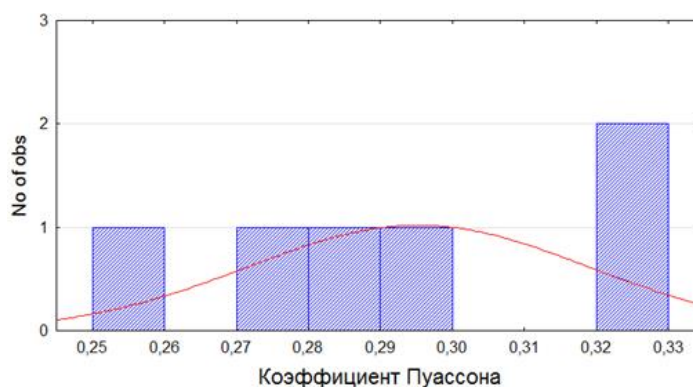


Рисунок 6 — Гистограмма распределения коэффициента Пуассона (μ) по результатам шести определений

По результатам испытаний прочностных показателей ММП в условиях трехосного сжатия при $\sigma_2 = \sigma_3$ построен паспорт прочности для исследованных образцов, аппроксимированный линейной зависимостью. Данный график представлен на рис. 7.

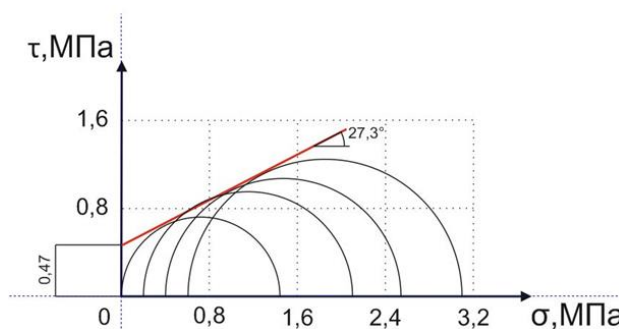


Рисунок 7 — Паспорт прочности, построенный по результатам испытания ММП в условиях одноосного и трёхосного сжатия и аппроксимированный линейной зависимостью

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 ММП 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.

Оценка напряженно-деформированного состояния системы «крепь-ЛПО» выполнялась методом компьютерного моделирования.

Численное моделирование было проведено в расчётном модуле «Rocscience RS2», в основе которого лежит использование метода конечных элементов. Модель разделена на

конечные элементы с известными размерами и напряжённно-деформируемыми свойствами, что позволяет моделировать распределение напряжений в скальных и дисперсных 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 рис. 8.

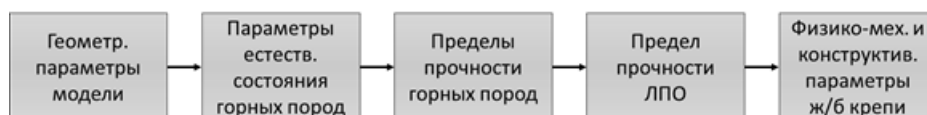


Рисунок 8 — Этапы подготовки модели в «Rocscience RS2»

При составлении моделей были приняты следующие упрощения:

- вегетативный слой горных пород не учтён в модели;
- анализ распределения смещений применен 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), рис. 9.

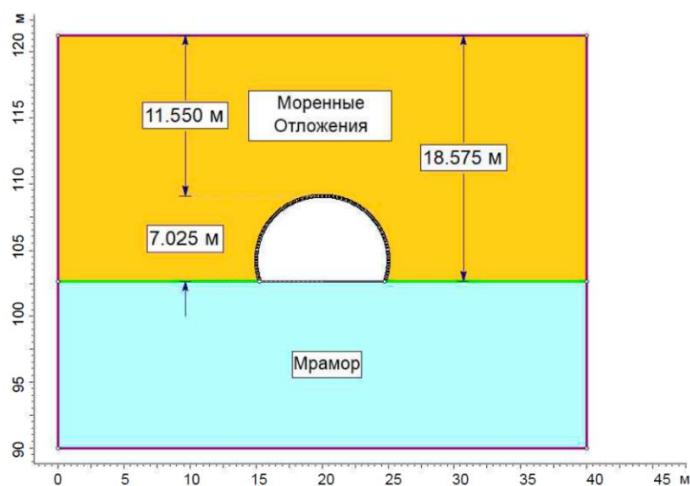


Рисунок 9 — Расчетная схема модели тоннеля

Принимая во внимание, что ЛПО сформировано до проходки тоннеля через участок дезинтегрированных пород, допускается, что тоннель будет разрабатываться за одну заходку. Таким образом, для используемой 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.

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

- проходка тоннеля проводится в моренных отложениях с учётом того, что его почва расположена на слое устойчивых пород, представленных мрамором;
- проходка тоннеля проводится полностью в моренных отложениях

Исследование устойчивости крепи включает анализ трёх состояний тоннеля:

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

Формула (5) описывает общее распределение смещений в крепи, где D_x и D_y – соответственно горизонтальные и вертикальные смещения.

$$D_t = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (5)$$

На рис. 10 показано смещение породного массива тоннеля при отсутствии крепи.

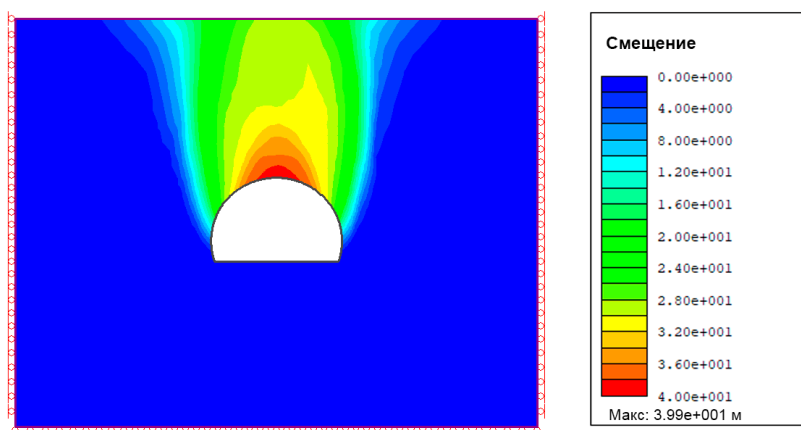


Рисунок 10 — Смещения породного массива при отсутствии крепи тоннеля

Как видно из рис. 10, область основной концентрации смещений породного массива лежит выше свода тоннеля, поэтому в случае проходки тоннеля в неустойчивых породах без крепи происходит его обрушение.

Для моделирования устойчивости тоннеля, закреплённого монолитной железобетонной крепью, были проанализированы реализованные проекты проходки тоннелей 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.

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 в стандарте по креплению тоннелей ж/б обделкой, принятым в Норвежском управлении общественных дорог. Как видно из рис. 11, наибольшая концентрация смещений при использовании крепи толщиной 0,7 м происходит в боковых частях свода тоннеля и составляет 0,34 см.

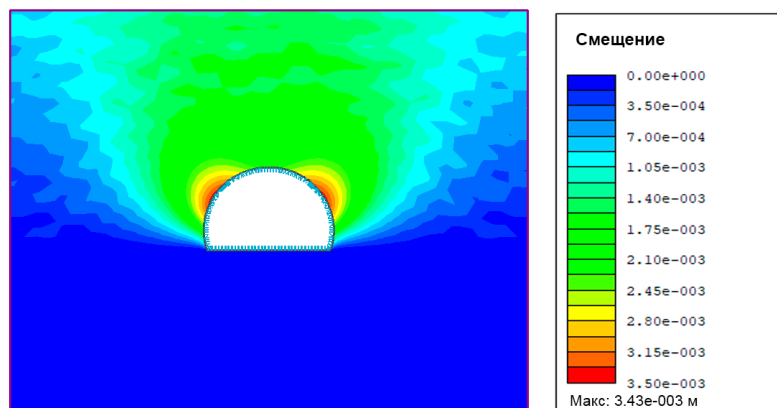


Рисунок 11 — Смещения, возникающие в крепи тоннеля толщиной 0,7 м

При моделировании тоннеля с уменьшенной толщиной крепи (рис. 12) смещения возрастают до 0,44 см. Очевидно, что такое увеличение смещений не может повлиять на устойчивость тоннеля.

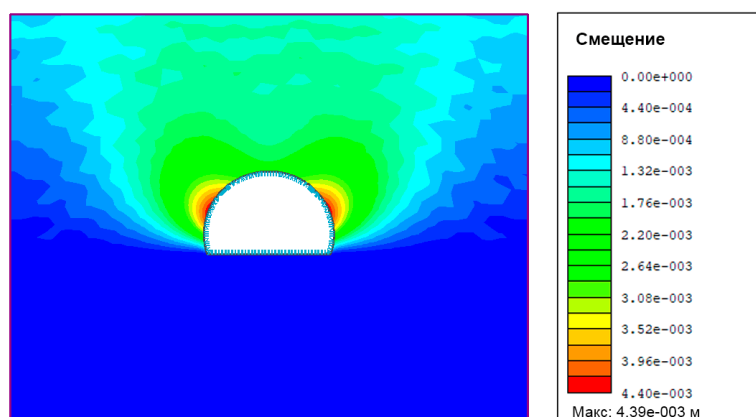


Рисунок 12 — Смещения, возникающие в крепи тоннеля толщиной 0,3 м

Моделирование устойчивости тоннеля под защитой ЛПО учитывает два варианта размещения тоннеля:

1. Проходка тоннеля осуществляется в моренных отложениях с учетом того, что его почва расположена на слое скальных пород, представленных мрамором. В этом случае ЛПО принятой толщиной 1,2 м интегрировано в модель. На рис.13 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.

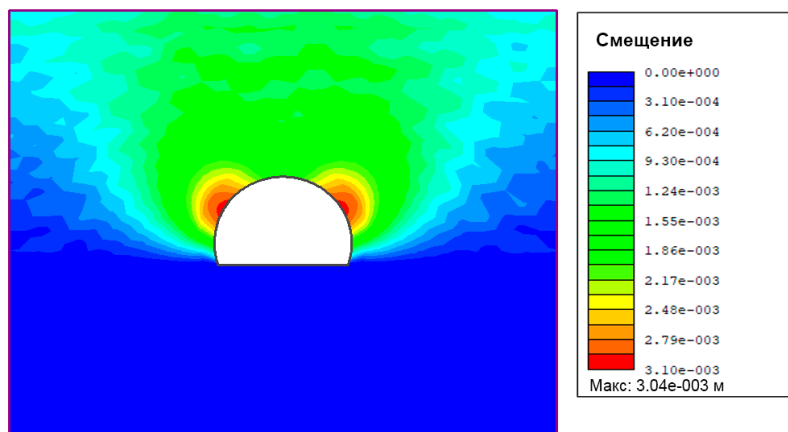


Рисунок 13 — Смещения в ледопородной крепи тоннеля

2. Проходка тоннеля осуществляется полностью в моренных отложениях.

В этом случае проходка тоннеля осуществляется в моренных отложениях на 5 м выше от залегающего слоя мрамора. Модель тоннеля в расчетном модуле «Rocscience RS2» приведена на рис. 14.

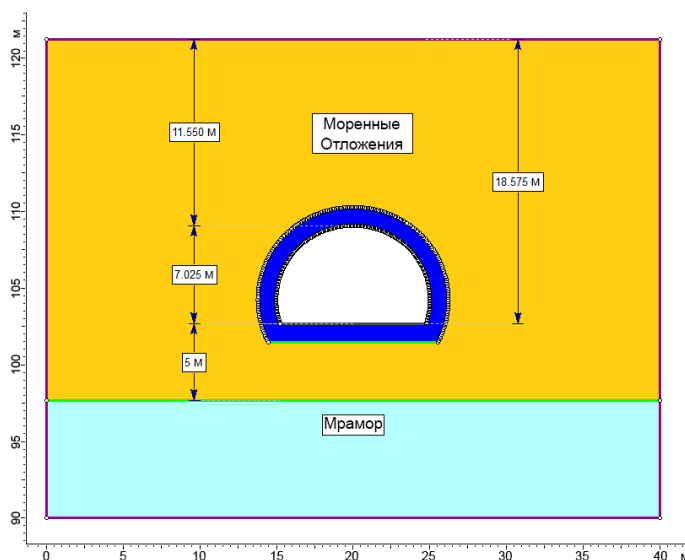


Рисунок 14 — Модель тоннеля в моренных отложениях

Учитывая, что водонасыщенные горные породы окружают тоннель по всему его периметру, ЛПО должно полностью изолировать тоннель от массива водонасыщенных пород с помощью пробуренных замораживающих скважин под почвой тоннеля (рис. 14). Толщина ЛПО под почвой тоннеля принята равной толщине основного ЛПО.

В результате выполненных исследований установлено, что распределение смещений при расположении тоннеля в массиве моренных отложений отличается от полученных ранее моделей при проходке тоннеля, опирающегося на скальные породы. Наибольшие смещения

сконцентрированы под почвой тоннеля и достигают 2,41 см в ЛПО (рис.15) и 3,17 см в ж/б крепи (рис.16). Можно сделать вывод, что смещения ледопородной крепи в данном случае в 10 раз больше, чем при проходке тоннеля, опирающегося на слой скальных пород.

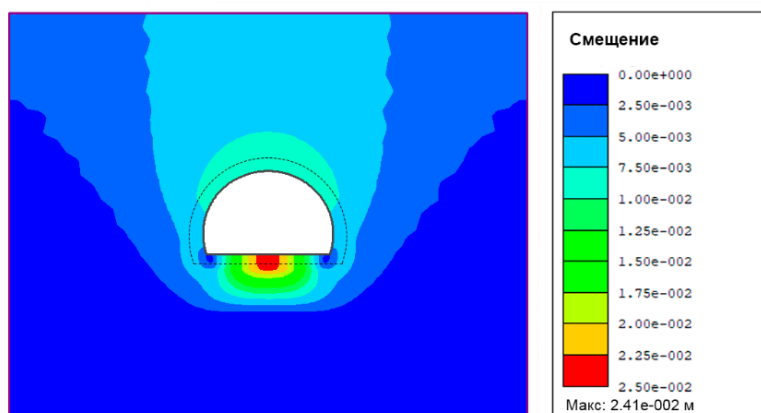


Рисунок 15 — Смещения ледопородной крепи тоннеля

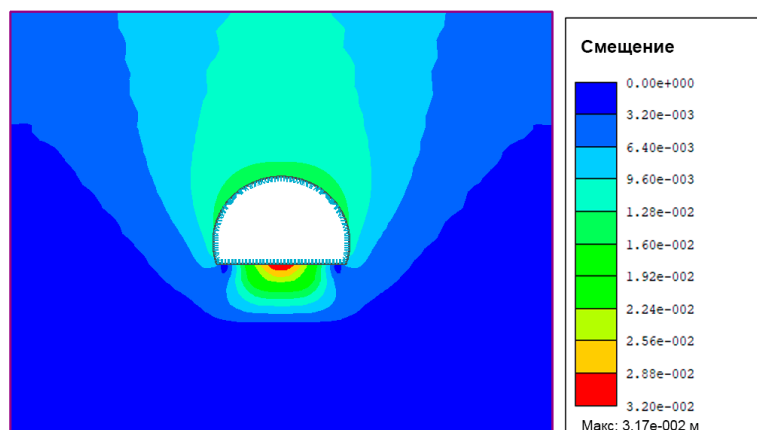


Рисунок 16 — Смещения монолитной железобетонной крепи тоннеля

Для определения влияния прочностных параметров моренных отложений на устойчивость тоннеля проектные величины угла внутреннего трения (φ), сцепления (c) и модуля Юнга (E) были изменены на 10% и 20%, как это показано в таблице 2.

Таблица 2 — Изменение параметров φ , c и E

		Горные породы в естественном состоянии					Горные породы в замороженном состоянии				
		-20%	-10%	Проект. значение	+10%	+20%	-20%	-10%	Проект. 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 рис. 17.

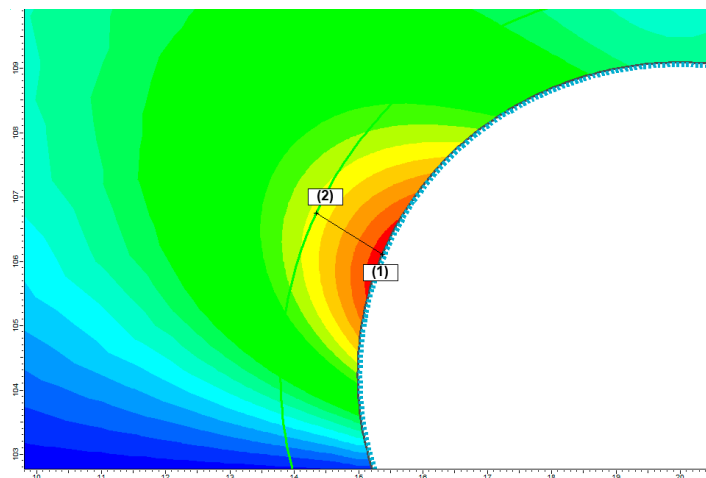


Рисунок 17 — Выбранные точки (1); (2) для оценки максимальных смещений крепи тоннеля

Графики на рисунках 18-20 показывают распределение смещения при изменении модуля Юнга (E), сцепления (c) и угла внутреннего трения (ϕ) моренных отложений.

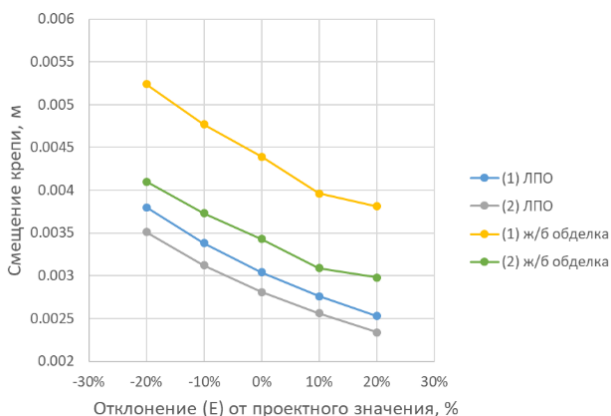


Рисунок 18 — Изменение модуля Юнга (E)

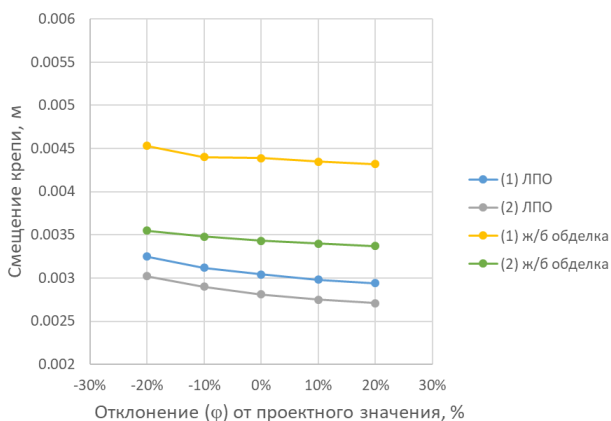


Рисунок 19 — Изменение угла внутреннего трения (ϕ)

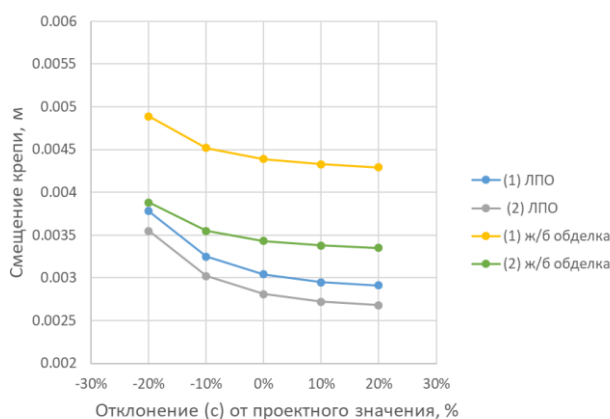


Рисунок 20 — Изменение коэффициента сцепления (c)

Как видно из рисунков 18-20, 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 рис. 18.

Прочностные параметры (φ) и (c) имеют меньшее влияние (рисунки 19; 20). Однако, при уменьшении коэффициента сцепления, смещения на стадии использования ЛПО резко увеличиваются и почти достигают показателя смещения для постоянной крепи.

Четвертая глава содержит описание рекомендаций по искусственному замораживанию горных пород горизонтальными колонками.

Проектирование 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 (размеры, материал), времени замораживания, необходимой мощности замораживающей станции.

Рекомендации, предложенные автором работы, могут использоваться для проектирования искусственного замораживания с помощью горизонтальных колонок, расположенных параллельно оси тоннеля.

Оценку напряженно-деформированного состояния системы крепь-ЛПО, 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, форма его поперечного сечения).
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.

Для определения времени замораживания (τ , сут) следует использовать метод теплового баланса:

$$\tau = \frac{Q_3}{[(Q_k - Q_{ox})24]} , \quad (6)$$

где Q_3 – количество холода, необходимое для замораживания заданного объема горных пород; Q_{ox} – количество холода, необходимое для охлаждения пород, окружающих ЛПО; Q_k – теплопоглощающая способность замораживающих колонок.

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

Тогда:

$$Q_{ox} = 2\pi(R_H + R_B)H \cdot q_{ox} + q_\phi \quad (7)$$

Значение, полученное в выражении (7), затем подставляется в общую формулу определения времени (6).

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 уточнения времени замораживания необходимо решить систему трансцендентных уравнений (формулы 2-4).

В качестве примера внедрения рекомендаций представлен проект искусственного замораживания для тоннеля Бергосен (Норвегия).

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 крепь-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 «Rosscience», 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России

1. Смирнов В.И. Практика и перспективы строительства подземных хранилищ жидких углеводородов в вечномёрзлых породах / В.И. Смирнов, М.Н. Шуплик, И.С. Вакуленко // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (Научно-технический журнал) — 2014. — № 5. — С. 108-114.
2. 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.
3. Вакуленко И.С. Опыт строительства и перспективы использования подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах для захоронения отходов бурения / И.С. Вакуленко, В.И. Смирнов, С.Д. Сурин // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (Научно-технический журнал) — 2016. — № 1. — С. 222-229.
4. Шуплик М.Н. Особенности формирования ледопородного ограждения после окончания подачи холодоносителя в замораживающие колонки / М.Н. Шуплик, И.С. Вакуленко // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (Научно-технический журнал) — 2019. — № 5. — С. 44-50.

В прочих изданиях

5. 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 — 2017. — № 3. — С. 18-22.
6. Vakulenko I. Artificial Ground Freezing technique for tunnel stabilizing / I. Vakulenko, B. Nielsen, T. Ingeman-Nielsen // Proceedings of the conference AIC2018 : Transportation Infrastructure Engineering in Cold Regions — 2018. — P. 85-86.