

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Мукминова Диана Зинуровна



**ОЦЕНКА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПОРОД С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЭСКАЛАТОРНЫХ  
ТОННЕЛЕЙ СПОСОБОМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ**

25.00.16 Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,  
маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
к.т.н., доцент, Волохов Е.М.

Санкт-Петербург – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ВРЕДНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ СПОСОБОМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Проблема оценки вредного влияния при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания .....	13
1.2 Технология проходки эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов .....	16
1.3 Инженерно-геологические особенности при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов.....	20
1.4 Проблема оценки инженерно-геологических условий.....	23
1.5 Факторы и механизмы развития деформационных процессов, и их изученность.....	25
1.6 Существующие методы оценки сдвижений и деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей .....	33
1.7 Выводы по первой главе.....	41
<b>ГЛАВА 2 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ .....</b>	<b>44</b>
2.1 Существующие методы мониторинга деформаций на земной поверхности	44
2.2 Натурные данные маркшейдерских наблюдений, полученных по результатам наблюдений за процессом сдвижений на земной поверхности .....	46
2.2.1 В период активной и пассивной стадии замораживания.....	47
2.3.2 В период естественного оттаивания .....	52

2.4	Влияние геомеханических процессов технологии искусственного замораживания грунтов на деформации обделки эскалаторного тоннеля .....	58
2.5	Анализ результатов натуральных исследований.....	62
2.7	Выводы по второй главе.....	64
<b>ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ В ПЕРИОД АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ СТАДИИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ.....</b>		<b>66</b>
3.1	Существующие методы математического моделирования. Метод конечных элементов .....	66
3.2	Особенности моделирования эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов.....	74
3.3	Моделирование в период активной и пассивной стадии замораживания. Факторы, влияющие на развитие сдвижений и деформаций .....	77
3.4	Распределение сдвижений и деформаций в массиве в период активной и пассивной стадии замораживания.....	90
3.5	Влияние пассивной стадии замораживания на деформации обделки эскалаторного тоннеля.....	96
3.6	Анализ данных моделирования в период активной и пассивной стадии замораживания. Распределение сдвижений и деформаций на земной поверхности .....	100
3.7	Выводы по третьей главе .....	103
<b>ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ В ПЕРИОД ЕСТЕСТВЕННОГО ОТТАИВАНИЯ ПОРОД .....</b>		<b>105</b>
4.1	Моделирование в период естественного оттаивания пород. Факторы, влияющие на развитие сдвижений и деформаций.....	105
4.2	Распределение сдвижений и деформаций в массиве .....	107
4.3	Влияние естественного оттаивания на обделку эскалаторного тоннеля..	112

4.4 Анализ данных моделирования в период естественного оттаивания. Распределение сдвижений и деформаций на земной поверхности .....	114
4.5 Выводы по четвертой главе .....	118
<b>ГЛАВА 5 МЕТОДЫ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ УСЛОВИЯ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГ .....</b>	<b>120</b>
5.1 Определение зоны влияния и оценка границ мульд сдвижений.....	120
5.2 Методика оценки положения точки максимального оседания .....	124
5.3 Определение значения точки максимального оседания .....	126
5.4 Оценка формы кривой оседаний .....	127
5.5 Инженерная методика прогнозної оценки и исходные параметры для условий города Санкт-Петербург.....	128
5.6 Апробация предложенной методики прогноза для эскалаторных тоннелей города Санкт-Петербург.....	130
5.6.1 Для эскалаторного тоннеля «Сенная» .....	131
5.6.2 Для эскалаторного тоннеля «Садовая».....	132
5.6.3 Для эскалаторного тоннеля «Проспект славы II».....	133
5.6.4 Для эскалаторного тоннеля «Международная».....	134
5.7 Рекомендации по проведению натуральных маркшейдерских наблюдений ....	135
5.8 Выводы по пятой главе.....	137
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>139</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>141</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Параметры мульд сдвижений для эскалаторных тоннелей, пройденных с помощью искусственного замораживания грунтов в городе Санкт-Петербург .....</b>	<b>153</b>

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б** Распределение оседаний на земной поверхности и в породном массиве при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Проспект Славы II»..... 154

**ПРИЛОЖЕНИЕ В** Способ мониторинга развития пучений, вызванных строительством наклонных подземных выработок, пройденных с замораживанием грунтов ..... 155

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Метрополитен в крупных городах является неотъемлемой частью транспортной инфраструктуры. Из всех выработок наибольшие деформации, проявляющиеся на земной поверхности, оказывает строительство эскалаторных тоннелей.

Главной проблемой обеспечения безопасных условий строительства эскалаторных тоннелей способом замораживания является оценка напряженно-деформированного состояния пород, связанного с процессами искусственного замораживания грунтов вокруг будущего сооружения, проходкой эскалаторного тоннеля и последующим оттаиванием замороженной толщи. Период нарастания ледопородного ограждения характеризуется большими деформациями пучений, превышающих уровень опасных.

Все имеющиеся исследования, относящиеся к этой проблеме можно разделить на три больших сектора: сектор механики пучинистых грунтов и мерзлотоведения, технологический сектор — область исследований в части технологий искусственного замораживания грунтов, и сектор горно-геомеханический (оценки сдвижений).

К первому сектору относятся работы отечественных и зарубежных ученых: Н.А. Цытовича, Э.Д. Ершова, Б.Н. Достовалова, В.А. Кудрявцева, В. Ladanyi, О.В. Andersland. Эти работы ориентированы на рассмотрение механики мерзлых грунтов оснований зданий и сооружений, связанных с циклическими процессами оттаивания и промерзания приповерхностных толщ грунтов, большая часть работ посвящена механике грунтов в условиях вечной мерзлоты, здесь не рассматриваются процессы искусственного замораживания в подземном строительстве.

Характерной чертой работ второго сектора является упор на рассмотрение теплофизических и геомеханических процессов в искусственно замораживаемых обводненных породах при строительстве подземных сооружений. Здесь необходимо отметить работы Н.Г. Трупака. Труды посвящены обеспечению заданных параметров толщины ледопородного ограждения, прочности, изменения

модуля деформаций в сложных инженерно-геологических условиях. В работах данного сектора не рассматриваются вопросы проявления деформаций на земной поверхности.

Работы третьего сектора в свою очередь можно разделить на три основные группы: группа теоретических методов исследований (С.Г. Авершина, С.П. Колбенкова, Р.А. Муллера), группа эмпирических и полуэмпирических методов (В.Ф. Подакова, В.П. Хуцкого, М.В. Долгих, Н. Cai, Z. Liu, S. Li, T. Zheng) и группа методов моделирования (С.Н. Сильвестров, Ю.А. Лиманов, Д.А. Потемкин, Н.А. Беляков, Е.М. Волохов, С.Ю. Новоженин, В.И. Киреева). Работы специально ориентированы на расчет деформаций. Но, труды данных исследователей в основном посвящены горизонтальным тоннельным выработкам и практически все не рассматривают замораживание как силовой или механических фактор.

Из упомянутых выше работ наиболее глубокая и комплексная проработка вопросов оценки сдвижений при строительстве эскалаторных тоннелей, включающая наработки всех трёх секторов, осуществлена С.Н. Сильвестровым. Разработанный метод оценки влияния строительства эскалаторных тоннелей был опубликован в «Пособии по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена» (рук. В.Ф. Подаков). Несмотря на достоинства такого подхода здесь не учитывается влияние процессов, происходящих в период нарастания ледопородного ограждения, упрощены подходы к определению точки максимальных оседаний, к форме и границе зоны деформаций.

Основными недостатками применяемых методов и подходов в оценки деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания являются:

– использование в большинстве работ одного класса методов при оценке сдвижений, отсутствие комплексного подхода для выявления закономерностей и оценки реальных параметров ледопородного ограждения;

- усреднение параметров ледопородного ограждения по литологическим разностям и по сечению выработки;
- игнорирование стадии формирования ледогрунтового ограждения;
- отсутствие прямых указаний для выбора параметров процесса сдвижения под конкретные горно-геологические условия, которые традиционно присутствуют в инженерных методах.

Итак, изучению процессов сдвижений и деформаций посвящено большое количество работ, однако задача разработки прогнозных методов оценки сдвижений и деформаций горных пород, влияние их на земную поверхность при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания не решена. Влияние активного и пассивного замораживания на состояние массива практически не изучалось.

Таким образом, оценка сдвижений и деформаций горных пород при строительстве эскалаторных тоннелей является актуальной задачей.

**Объект исследования** – объектами исследования являются породные массивы, ледопородные ограждения и обделка эскалаторных тоннелей.

**Предмет исследования** – закономерности развития процессов сдвижений и деформаций пород при строительстве эскалаторных тоннелей в массиве и на земной поверхности, вызванные эффектами замораживания-оттаивания грунтов и горнопроходческими работами.

**Цель работы:** состоит в повышении достоверности прогноза сдвижений и деформаций горных пород при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания.

**Идея работы:** повышение достоверности прогноза сдвижений и деформаций горных пород при строительстве эскалаторных тоннелей достигается путем учета активной и пассивной стадии замораживания на состояние массива.

**Задачи исследования:**

1. Изучение влияния технологии проходки и инженерно-геологических условий на геомеханические и теплофизические процессы;



2. Анализ существующих методов оценки сдвижений и деформаций горных пород при строительстве эскалаторных тоннелей;

3. Сбор, анализ и обработка данных натурных исследований в период активной и пассивной стадии замораживания и естественного оттаивания горных пород;

4. Проектирование и закладка специальной наблюдательной станции. Мониторинговые измерения и обработка полученных результатов;

5. Математическое моделирование поэтапного развития геомеханических процессов в период активной и пассивной стадии замораживания и в период естественного оттаивания;

6. Верификация математических моделей и выявление закономерностей геомеханических процессов для обоснования инженерной методики.

#### **Научная новизна работы:**

1. Выявлены механизмы и закономерности развития пучений для активной и пассивной стадий замораживания;

2. В результате анализа деформаций обделок установлено существенное влияние пассивной стадии замораживания на деформации обделок;

3. Определены основные факторы, определяющие развитие геомеханических процессов в период активной и пассивной стадии замораживания и в период естественного оттаивания;

4. Обоснован упрощенный подход для прогноза деформаций на базе использования численного моделирования методом конечных элементов с послойной оценкой параметров ледопородного ограждения по уровню природной влажности пород.

#### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Результаты работы позволяют осуществлять прогнозную оценку эффектов пучений в условиях развития деформаций растяжений, многократно превышающих критические значения. Такой прогноз ориентирован на обеспечение безопасности подрабатываемых зданий и сооружений при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов на всех

стадиях и комплексного решения вопросов охраны объектов наземной инфраструктуры;

2. Разработанные рекомендации по организации мониторинга деформаций за сдвигами и деформациями на земной поверхности позволят обеспечить оценку текущих уровней риска для подрабатываемых зданий и сооружений.

**Методология и методы исследования:**

1. Проектирование наблюдательных станций и производство натурных маркшейдерских наблюдений;

2. Методы математической статистики для анализа натуральных данных, оценки границ мульды сдвижений, расчета максимальных пучений и оседаний;

3. Методы типовых кривых и методы аналогии при анализе мульды сдвижения;

4. Методы математического моделирования геомеханических процессов при проходке эскалаторных тоннелей способом замораживания методом конечных элементов (МКЭ).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Стадии замораживания приводят к образованию обширной зоны опасных деформаций на поверхности над эскалаторным тоннелем, уровни которых кратно превышают предельные. Оценка прогнозных уровней сдвижений (пучений) и деформаций в период активной и пассивной стадий замораживания определяется показателем влажности горных пород.

2. Размер зоны влияния строительства эскалаторного тоннеля на поверхности определяется глубиной технологических элементов, инициирующих деформационные процессы в породном массиве. Границы мульды сдвижения определяются через граничные углы в их традиционной постановке.

3. Реализация метода типовых кривых в прогнозной оценке для стадий замораживания и для стадий оттаивания должна опираться на использование специально обоснованных границ полумульд и показательно-степенной функции для кривых. На стадии оттаивания точка максимального оседания в таком расчёте определяется глубиной основания наиболее водонасыщенного слоя.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается большим объемом построенных и обработанных с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Plaxis 3D математических моделей и внутренней сходимостью результатов моделирования и общей сходимостью с натурными данными маркшейдерских наблюдений, а также высокой сходимостью по предлагаемой упрощенной прогнозной методике с натурными данными, полученными при строительстве эскалаторных тоннелей петербургского метрополитена, пройденных с замораживанием грунтов.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертации представлялись и обсуждались на следующих конкурсах и конференциях: IV Международная научно-практическая конференция «Инновационное развитие современной науки: Проблемы, закономерности, перспективы» (г. Пенза, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Наука и научный потенциал – основа устойчивого развития общества» (г. Магнитогорск, 2018 г.); 13 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (TU Bergakademie Freiberg, г. Фрайберг, Германия, 2019 г.); XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля (г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящем в международную базу данных и системы цитирования *Scopus*. Получен 1 патент.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, проектировании и закладке наблюдательной станции для эскалаторного тоннеля Санкт-петербургского метрополитена станции метро «Казаковская», в обработке натурных данных маркшейдерских наблюдений при строительстве эскалаторных

тоннелей метрополитена способом замораживания грунтов, создании и обработке данных численных моделей.

### **Реализация результатов работы**

1. Внедрение в практику прогнозных оценок сдвижений и деформаций, выполняемых ЗАО «ВНИИ Галургии», ОАО «Ленметрогипротранс», ОАО «Метрострой».

2. Указанные методы прогноза сдвижений и деформаций, а также оценки их вредного влияния на здания и сооружения планируются к внедрению в практике наблюдений при разработке новых нормативных документов, регламентирующих охрану зданий и сооружений в условиях подъема подземного строительства в Санкт-Петербурге.

3. Внедрение в учебный процесс подготовки специалистов, обучающихся по специализации «Маркшейдерское дело» по дисциплинам «Маркшейдерские работы при строительстве шахт и подземных сооружений» и «Математическое моделирование геомеханических процессов».

### **Структура и объем работы**

Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 5 глав, введение, заключение, библиографический список из 101 наименования и 3 приложения. В работе 88 рисунков и 12 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы научному руководителю к.т.н., доц. Волохову Е.М., а также сотрудникам кафедры маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета.

Автор благодарит руководство ГСУ ОАО «Метрострой», в частности участковых маркшейдеров Д.А. Жданова и С.В. Сухова за помощь в организации закладки наблюдательной станции для эскалаторного тоннеля «Казаковская» Санкт-Петербургского метростроя и проведения деформационных измерений.

Автор выражает благодарность генеральному директору ООО «ГИРО» Савкову Б.М. за методическую помощь и представление ценной информации по деформационным наблюдениям.

# ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ВРЕДНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЭСКАЛАТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ СПОСОБОМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ

## 1.1 Проблема оценки вредного влияния при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания

Строительство эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов впервые было применено при сооружении станций Московского метрополитена «Дзержинская», «Кировская» и «Красные ворота» («Лермонтовская») в начале 30-х годов XX века. Так как проходка наклонных выработок должна была осуществляться в сложных инженерно-геологических условиях (строительство предусматривалось в водонасыщенных грунтах-плывунах) советскими инженерами было принято решение осуществить проходку с использованием замораживания пород через наклонные скважины, расположенные за внешним контуром тоннеля [78,79].

При проектировании данных станций инженеры столкнулись не только со сложными геологическими условиями, но с проблемами проходки в плотной городской застройке с насыщенной сетью подземных коммуникаций. Воспользоваться зарубежным опытом тогда не представлялось возможным, так как ранее строительство наклонных тоннелей в сложных обводненных условиях никем ещё не осуществлялось. Было принято решение вокруг строящегося сооружения создать временное ледогрунтовое ограждение путем бурения, оснастки и запуска наклонных замораживающих скважин. Для этого началась разработка новой методики проходки. В 1937 году была организована контора для проектирования специальных способов работ [81], одной из главных её задач было искусственное замораживание грунтов и геологоразведочные изыскания с применением бурения. Внимание, которое уделялось тогда делу метростроения, позволило обеспечить возможности выполнения новой сложной технологической задачи – сооружение эскалаторных тоннелей меньше чем за год. За весь период

строительства метрополитенов в Советском Союзе, наиболее преуспевшем в этом деле, пройдено более 100 эскалаторных тоннелей способом замораживания, в том числе в Москве, Санкт-Петербурге, Киеве, Баку, Тбилиси, Харькове [28]. Несмотря на развитие новых методов подземного строительства этот способ проходки эскалаторных тоннелей до сих пор остается весьма востребованным [71]. Так, например, в Санкт-Петербурге сейчас на один тоннель, сооружаемый по новой технологии с использованием тоннелепроходческого-механизированного комплекса (ТПМК), приходится два тоннеля сооружаемых по классической технологии с замораживанием пород (Рисунок 1.1).

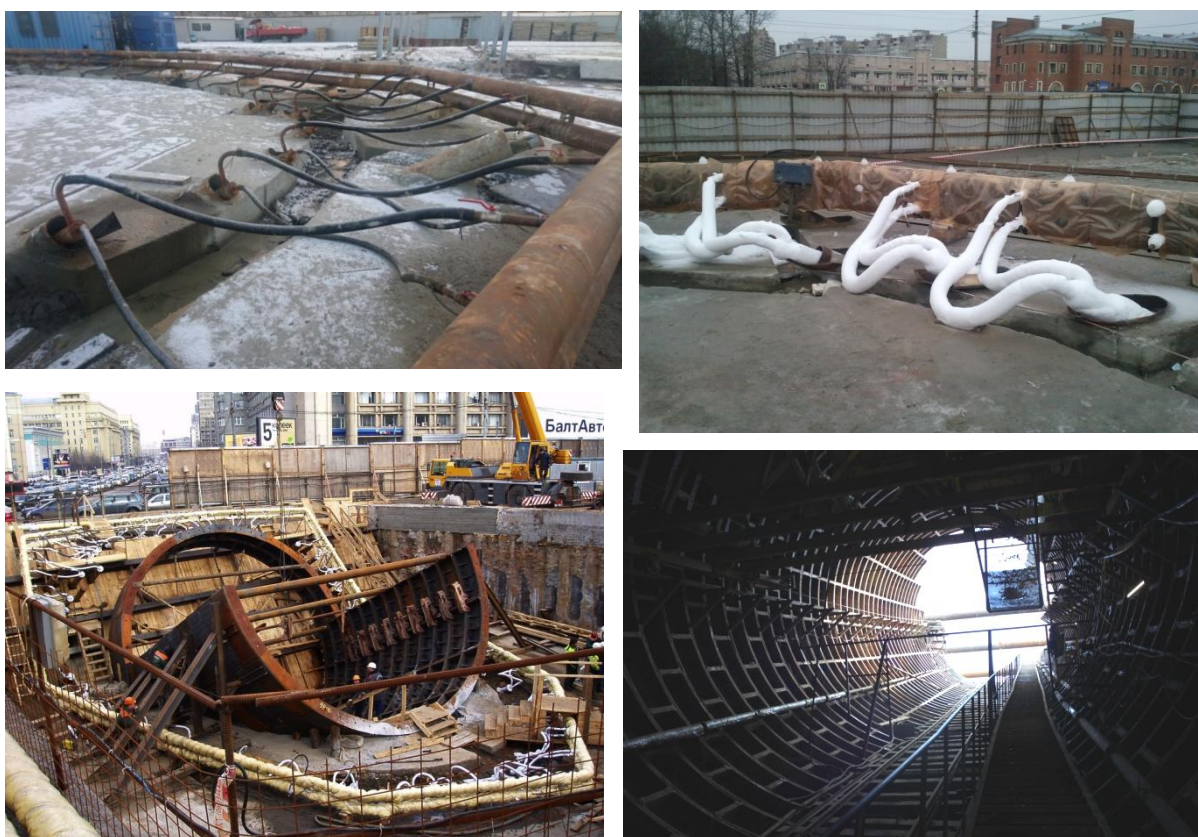


Рисунок 1.1 – Проходка эскалаторных тоннелей способом замораживания

При проходке эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов нужно выделять следующие основные этапы:

– процесс активного замораживания – процесс формирования ледопородного ограждения. Он характеризуется минимальными температурами хладоносителя и максимальной мощностью замораживающей станции. Период активного замораживания зависит от глубины выработок и инженерно-

геологических условий и может составлять 50-60 суток. Проходка эскалаторного тоннеля может быть начата при достижении проектной толщины ледопородного ограждения;

– процесс пассивного замораживания – процесс поддержание грунта в замороженном состоянии на весь период строительства, температура хладоносителя здесь несколько выше. Сама проходка с поддержанием ледогрунтового ограждения может продолжаться до 8-10 месяцев;

– процесс естественного оттаивания ледопородного ограждения. Сразу после завершения проходки в замороженной толще холодильные установки отключаются, оборудование в замораживающих и гидронаблюдательных скважинах демонтируется, сами скважины тампонируются.

Для первого этапа (этапа формирования ледопородного ограждения), характерно проявление неравномерного пучения пород массива. Максимальные значения пучений здесь могут достигать 100-120 мм (согласно имеющимся натурным данным маркшейдерских наблюдений).

Для второго этапа (этапа пассивного замораживания) значения сдвижений и деформаций также характерно проявление развития пучений. Скорость проявления пучений на земной поверхности в 2,5-3 раза меньше чем при активной стадии замораживания. Максимальные значения пучений здесь могут достигать до 250 мм (согласно имеющимся натурным данным маркшейдерских наблюдений), оказывая существенное влияние на обделку эскалаторного тоннеля. Сдвигения и деформации этих этапов, интенсивно развиваются, они значительны и могут быть опасны для объектов в зоне влияния. Однако именно их следует считать наименее изученными и поэтому плохо предсказуемыми. Данный процесс приводит к существенному изменению их физико-механических и фильтрационных свойств: существенно увеличивается прочность на сжатие и растяжение, сцепление, кратно возрастает модуль деформации, резко снижаются фильтрационные характеристики водонасыщенных пород.

Для третьего этапа (периода оттаивания пород) характерно постепенное развитие оседаний и деформаций в мульде за счет восстановления объема жидкой

фазы грунта, вторичного перераспределения напряжений и деформаций и снижения показателей прочностных и деформационных свойств пород. Этот этап, характеризующийся максимальными значениями сдвижений (оседаний) и деформаций, оказывающий существенное влияние на земную поверхность и обделку эскалаторного тоннеля. Процесс естественного оттаивания пород продолжается и после завершения строительства и сдачи тоннеля в эксплуатацию, он может длиться до 4–5 лет. Данный процесс имеет затухающий характер.

В связи с плохой изученностью процессов деформирования массива в различные этапы строительства эскалаторных тоннелей способом замораживания возникает необходимость в новой расчетной схеме для оценки сдвижений и деформаций [15,93].

## 1.2 Технология проходки эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов

Суть способа замораживания грунтов состоит в том, что вокруг будущего сооружения искусственным образом создается временное ледогрунтовое ограждение (Рисунок 1.2). Это ограждение формируется из ледопородных цилиндров замороженных пород, вокруг скважин, пробуриваемых по внешнему контуру будущего подземного сооружения [31,62].

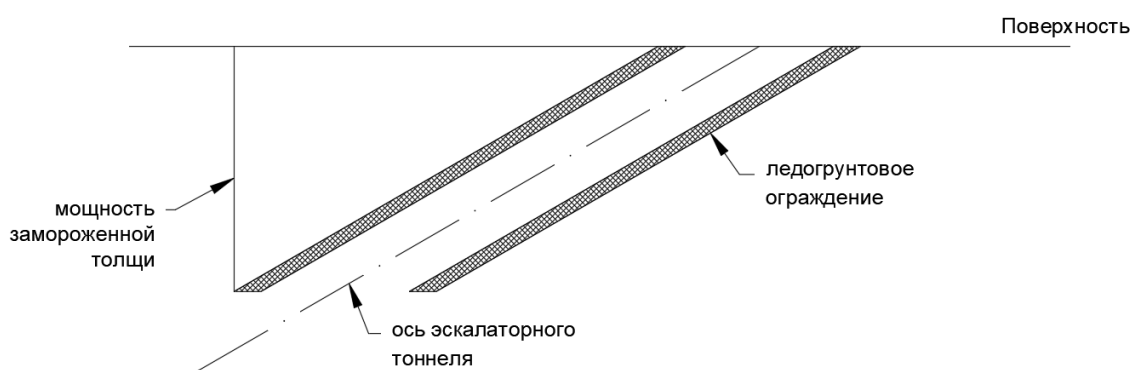


Рисунок 1.2 – Временное ледогрунтовое ограждение

Наибольшее распространение в практике метростроения получил способ рассольного замораживания [80]. При рассольном замораживании скважины оборудуются замораживающими колонками, по которым непрерывно



циркулирует хладоноситель. Производится бурение скважин роторными станками с дизельным двигателем с применением обсадных труб, кондукторов (Рисунок 1.3), опускаются замораживающие колонки в скважины, монтируются коллекторные и распределительные трубы рассольной сети.

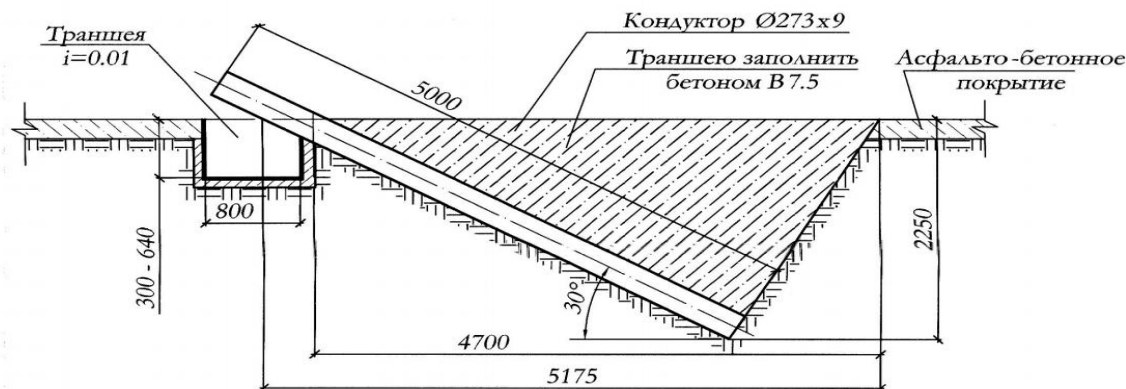


Рисунок 1.3 – Схема установки кондуктора замораживающих скважин

При рассольном замораживании скважины, закрепленные обсадными трубами, оборудуются замораживающими колонками, по которым запускают непрерывную циркуляцию хладоносителя — сильно охлажденного рассола (до  $-20$ – $-25^{\circ}\text{C}$ ). При его прохождении по колонке, между скважиной и окружающими её породами происходит теплообмен (рассол нагревается, а породы охлаждаются). В результате вода, содержащаяся в породах, постепенно кристаллизуется, а ледопородный цилиндр вокруг скважины увеличивается в диаметре. Рассол через сеть замораживающих колонок скважин поступает на замораживающую станцию и вновь охлаждается, т.е. циркулирует по замкнутому контуру, а растущие ледопородные цилиндры постепенно смыкаются, образуя замкнутое ограждение. Заморозка приводит к существенному изменению физико-механических и фильтрационных свойств пород: существенно увеличивается прочность на сжатие и растяжение, сцепление, кратно возрастает модуль деформации, резко снижаются фильтрационные характеристики водонасыщенных пород. Это и позволяет осуществлять проходку обычными средствами в слабых, неустойчивых и водонасыщенных породах.

В процессе замораживания грунтов должно обеспечиваться систематическое наблюдение за образованием ледогрунтового ограждения, его

реальными размерами и температурой. При таких наблюдениях определяются следующие показатели:

- температура грунтов в специальных контрольных термометрических скважинах (скважины Тс на Рисунке 1.4 и 1.5) для контроля наружной части ледогрунтового ограждения;
- температуры охлаждающего рассола на прямой и обратной линиях рассолопровода;
- уровни грунтовых вод в гидронаблюдательных скважинах для контроля замкнутости ледогрунтового ограждения.

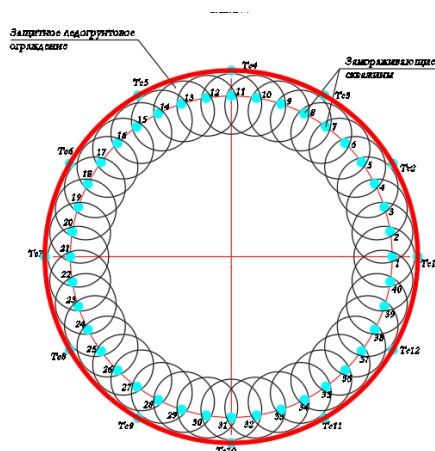


Рисунок 1.4 – Расположение замораживающих колонок перпендикулярно оси

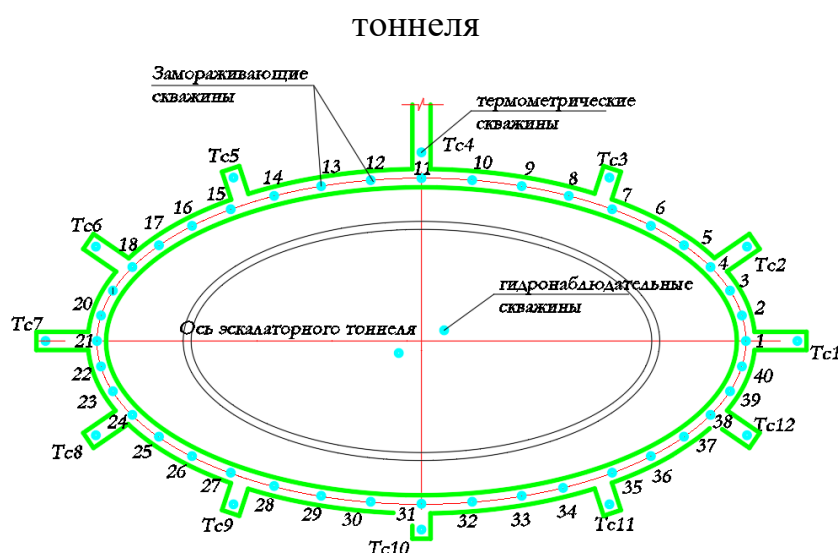


Рисунок 1.5 – Расположение замораживающих колонок на уровне земной поверхности

Разработка породы при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов производится с помощью отбойных молотков, скорость

проходки составляет – около 12 м/мес. (монтаж 15 колец). Монтаж, чугунных тубингов, осуществляется при помощи тубингоукладчика (Рисунок 1.6 и 1.7) [52].

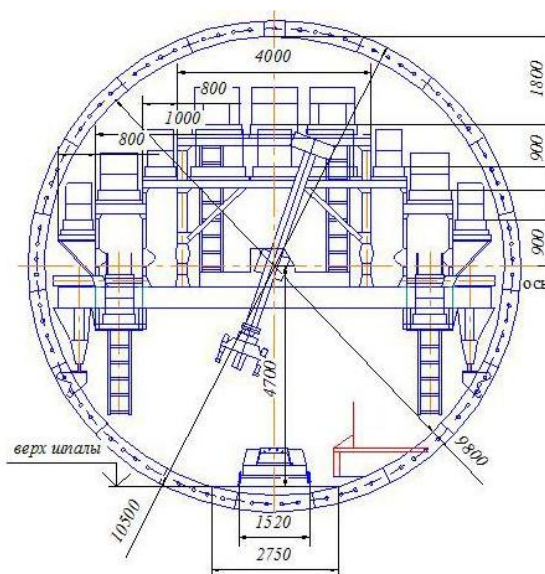


Рисунок 1.6 – Сооружение эскалаторного тоннеля. Тубингоукладчик ТНУ-4МА

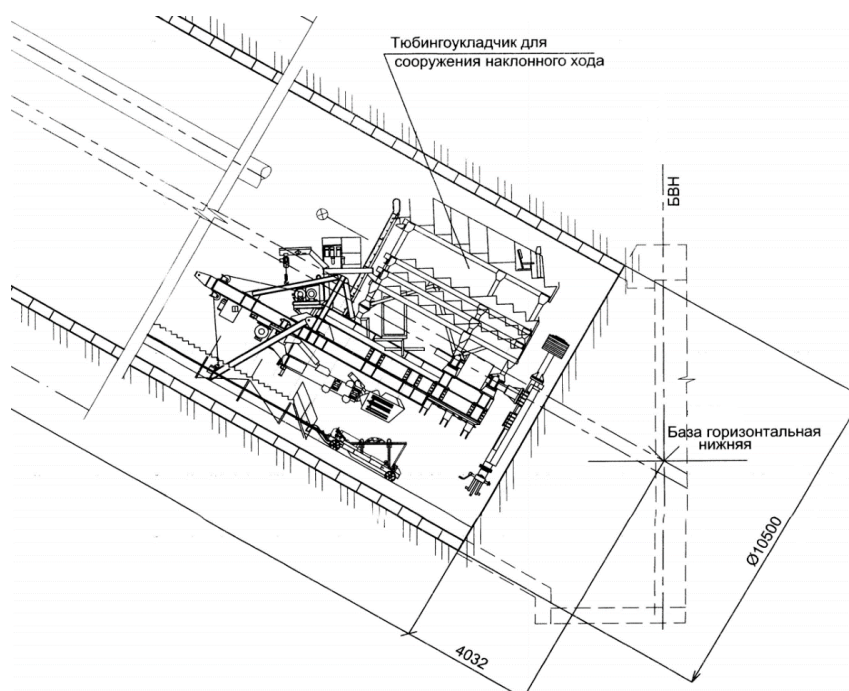


Рисунок 1.7 – Тубингоукладчик в разрезе

Чугунные тубинги транспортируют к забою на тележках, захватывающим приспособлением руки монтажный элемент доставляется к месту установки. Монтаж кольца производится с «лотка», затем последовательно с каждой стороны

добавляется по одному элементу, элементы между собой соединяются болтами и гайками с гидроизоляцией [51].

### **1.3 Инженерно-геологические особенности при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов**

Строительство эскалаторных тоннелей с применением искусственного замораживания грунтов осуществляется в сложных инженерно-геологических условиях. Большая часть данных собрана на объектах Санкт-петербургского метрополитена, поэтому более подробно изучено геологическое строение города Санкт-Петербург.

Строительство эскалаторных тоннелей в городе Санкт-Петербург предполагает пересечение выработкой нескольких различных слоев неустойчивой толщи осадочных отложений. Первые десятки метров представляют собой четвертичные образования, которые включают в себя современные, верхнечетвертичные и среднечетвертичные осадки [76,90].

Согласно проектным документам по строительству метрополитена в г. Санкт-Петербург, геологическое строение принимает следующее положение [76]:

**Современные образования** имеют повсеместное распространение, включают в себя техногенный грунт, почвенно-растительный слой.

Насыпные грунты чаще всего представлены песчано-супесчаным, реже песчано-суглинистым со строительным мусором (шлак, щебень, обломки кирпича, металла). Мощность слоя составляет 0,7 до 4,8 м.

Намывные грунты располагаются под насыпными грунтами. Представлены песками пылеватыми. Мощность слоя составляет 1,0 - 2,6 м.

**Верхнечетвертичные** отложения представлены позднеледниковыми (озерно-ледниковыми) образованиями и ледниковыми отложениями лужской морены.

Позднеледниковые образования имеют практически повсеместное распространение. В редких случаях они замещены озерно-морскими

отложениями. Подстилаются озерно-ледниковые отложения глинистой толщей лужской морены. Комплекс отложений представлен, преимущественно, слоистыми суглинками, реже ленточными суглинками и глинами, слоистыми супесями и линзами песков от пылеватых до средней крупности.

Ледниковые отложения лужской морены являются наиболее распространенным горизонтом четвертичной толщи. Морена представлена суглинками и супесями с включением гравия, гальки и обломков кварцевого песчаника от 5 до 20%, отдельных валунов.

**Верхне-среднечетвертичные** отложения получили ограниченное распространение по протяженности и мощности. Часто замещаются мореными отложениями. Это преимущественно слоистые суглинки и супеси.

Ледниковые отложения московской морены –толща не выдержана по мощности и по простирацию. Она представлена суглинками и супесями с включением гравия и гальки до 15-20%, в единичных случаях до 30%, с обломками кварцевого песчаника, с валунами.

**Переходный слой (переотложенные глины)** –прослеживается на отдельных участках и представлен коренными глинами с включением гравия и гальки 5-10%.

### **Гидрогеологические условия**

В пределах территорий, где были пройдены исследованные эскалаторные тоннели, «выделяются следующие подземные водоносные и водоупорные горизонты и комплексы:

- грунтовый – первый от поверхности – водоносный горизонт;
- водоупорный горизонт слоистых и ленточных суглинков;
- относительно водоупорный горизонт валунных суглинков лужской морены;
- внутриморенный водоносный горизонт в толще суглинков лужской морены;
- относительно водоупорный горизонт межледниковых отложений;
- водоупорный горизонт валунных суглинков;

– водоупорный комплекс коренных нижнекембрийских и верхнекотлинских глин.

**Воды грунтового водоносного горизонта** со свободной поверхностью приурочены к техногенным слоям, озерно-морским отложениям и к озерно-ледниковым образованиям. Водосодержащими грунтами являются намывные пески, песчано-супесчаный насыпной материал, пески пылеватые и мелкие, торф, слоистые супеси. Грунтовый водоносный горизонт развит повсеместно, однако является маломощным. Питание горизонта инфильтрационное. Основной источник питания и восполнения – атмосферные осадки, а также потери из городских канализационных систем. Суммарная мощность горизонта меняется в пределах 0,1-4,5 м.

**Водоупорный горизонт ленточных глин и суглинков** залегает под техногенными и озерно-морскими отложениями практически повсеместно. Он представлен ленточными и слоистыми суглинками и глинами. Суммарная мощность озерно-ледниковых отложений достигает 7,4 м.

**Относительно водоупорный горизонт валунных суглинков лужской морены** распространен повсеместно и залегает под позднеледниковыми образованиями. Представлен суглинками, реже супесями с включением гравия и гальки до 15% с единичными валунами. Мощность изменяется от 3,3 до 20,3 м.

**Водоупорный горизонт валунный суглинков московской морены** толща не выдержана по мощности и по простирацию. Она представлена супесями и суглинками с включением гравия и гальки 15-20%, в единичных случаях до 30%, с обломками кварцевого песчаника, с валунами. В отдельных случаях верха морены сложены отторженцами коренных глин мощностью до 3,8 м.

**Котлинский водоупорный горизонт** залегает под отложениями московской морены, либо переотложенными глинами. Горизонт сложен аргиллитоподобными глинами, максимальная молекулярная влажность которых обычно выше естественной влажности, что свидетельствует о том, что в естественном состоянии в них содержится только физически связанная вода, те глины гидравлически разделяют водоносные комплексы четвертичных и

дочетвертичных отложений и являются региональным водоупором. Однако в их толще отмечаются отдельные обводненные прослои песчаников, содержащие низкодебитные напорные воды, и залегающие в пределах глубин 14,0–63,6 м. мощность их в верхней части разреза, до глубины 30 м, составляет от 0,2 до 1,0 м, в редких случаях 2,1–5,9 м, ниже по разрезу мощность прослоев песчаника уменьшается до 0,1–0,2 м.

Величина напора зависит от глубины залегания песчаника и составляет для прослоев, залегающих на глубинах до 30 м от поверхности, от 2 до 17 м, пьезометрический уровень (при полном восстановлении) устанавливается на глубинах от 5,0 до 17,1 м от дневной поверхности [76].

#### **1.4 Проблема оценки инженерно-геологических условий**

При оценке сдвижений и деформаций на земной поверхности не маловажную роль играет количественная оценка свойств горных пород, вокруг которых будут сооружаться подземные объекты. Свойства этих пород определяются косвенными способами и методами в полевых и лабораторных испытаниях.

К косвенным способам определения свойств пород является геофизический метод, это комплекс методов испытаний геофизики, в основе лежит изучение естественных или искусственно заданных полей, применяется для изучения геологического профиля в естественном состоянии массива, что является его преимуществом перед другими методами и исключает недостатки точечных проб [9].

При строительстве эскалаторных тоннелей способом искусственного замораживания грунтов наибольший интерес представляют физико-механические характеристики геологических слоев на этапах замораживания-размораживания массива вокруг наклонной выработки. Под физическими свойствами понимают плотность, влагосодержание и т.д., а механические делятся на три группы: прочностные, деформационные и реологические.

К деформационным характеристикам относятся модуль деформации, угол внутреннего трения, сцепление.

Модуль деформации  $E$ , определяется как в полевых, так и в лабораторных условиях, подробные испытания, проводимые для получения значения приведены в ГОСТ 12248-2010 [18] и ГОСТ 20276-2012 [19].

Для определения модуля деформации чаще всего применяют метод компрессионного испытания в одометре. Недостатком этого метода является невозможность бокового расширения при приложении вертикальной нагрузки, что не позволяет определить коэффициент Пуассона, коэффициент бокового расширения. Полученные значения модуля деформаций разными способами существенно различаются между собой, например, модуль деформаций полученный при помощи штампа, в среднем, имеет значение в 2-6 раз больше, чем модуль деформации, полученный компрессионным способом [11]. Из-за больших расхождений, модуль деформаций определяют, как умножение табличного коэффициента перехода на модуль деформаций полученный компрессионным способом. Из-за разных режимов нагружения, данный способ оспаривается среди исследователей в данной области [26].

Еще один распространенный метод для определения значения модуля деформации — это метод трехостного сжатия. Из названия очевидно, что здесь подается пространственная нагрузка на грунт, что позволяет изучать свойства по всем трем направлениям, а также определить коэффициент Пуассона и угол внутреннего трения.

Для определения угла внутреннего трения и сцепления используют метод однополосного среза для глинистых органоминеральных грунтов и песков (кроме крупных и гравелистых). Этот метод является одним из старейших методов определения свойств. Данный способ достаточно универсален и прост в своей реализации, его суть состоит в фиксации поверхности скольжения, на которую искусственным образом задают нормальную и касательную нагрузку, касательная сила оценивается как сопротивление грунта. Из-за простоты в реализации, этот метод широко распространен, но, данные полученные таким способом зачастую



характеризуются заниженными значениями угла сцепления  $c$  и завышенными значениями угла трения  $\varphi$  [26].

Для выделения инженерно-геологических элементов (ИГЭ), полученные значения физико-механических свойств статистически обрабатываются, учитывается неоднородность геологических слоев с применением коэффициента вариации, определяемое ГОСТ 20522-2012 [20].

Хотелось бы выделить, что для определения параметров для породных слоев ИГЭ используются данные не только современные, но и многолетней давности, полученные в условиях лабораторных испытаний, проводимые на различном лабораторном оборудовании. Все имеющиеся данные усредняются, что может привести к широкому разбросу в пределах одного геологического слоя. Значения инженерно-геологических изысканий зависят от качества отобранных образцов и проблемы учета масштабного фактора [50].

### **1.5 Факторы и механизмы развития деформационных процессов, и их изученность**

Уже для первого этапа сооружения эскалаторного тоннеля (этапа формирования ледопородного ограждения, до проходки), характерно возникновение и развитие деформаций, неравномерных пучений пород в массиве. Они проявляются и на поверхности, приводя к развитию наиболее опасных для существующих объектов деформаций растяжения над осью тоннеля. А, при возможном вторичном замораживании (когда тоннель уже частично пройден и решено осуществить повторное замораживание), они могут приводить к существенным деформациям уже собранной обделки — максимальные значения смещений здесь могут достигать 100-120 мм (согласно имеющимся натурным данным маркшейдерских наблюдений).

Для второго этапа (этапа пассивного замораживания) также характерно проявление развития пучений (они не стабилизируются и продолжают нарастать). Скорость развития пучений на земной поверхности здесь в 2-3 раза меньше чем при активной стадии замораживания. Суммарные максимальные значения

пучений на поверхности уже могут достигать 200-250 мм (согласно натурным данным маркшейдерских наблюдений). Этап связан с проявлениями существенного влияния и на обделку эскалаторного тоннеля.

Кроме отмеченного существенного изменения свойств пород, на этих двух этапах интенсивно развиваются сдвиги и деформации от искусственного замораживания, они весьма значительны и могут быть опасны для объектов в зоне влияния. Однако, как показал анализ имеющихся исследований и работ, именно эти этапы следует считать наименее изученными и поэтому плохо предсказуемыми. Основное внимание исследователей и инженеров было традиционно приковано к проблеме обеспечения при заморозке технологических свойств пород (устойчивости и водопроницаемости), а механизмы распространения пучений и деформаций в породном массиве при искусственном замораживании изучены недостаточно.

Механизмы развивающихся во времени процессов кристаллизации грунтовых вод в породах весьма сложны, и не определяются замораживанием воды в расчетной зоне заморозки. Основным, инициализирующим деформации, силовым фактором для этих стадий, разумеется, являются силы объемного расширения кристаллизующейся воды в зоне искусственного замораживания, поэтому именно они должны рассматриваться в прогнозной расчетной схеме как главный фактор. Однако, для оценки параметров такого расширения необходимо учитывать неравномерный характер развития зон заморозки по глубине и литологическим разностям, по сечению и геометрии сети скважин, учитывать развитие зон во времени и развитие указанных выше сопутствующих процессов. Учитывая важность и сложность геомеханических процессов, инициированных расширяющимися в объеме зонами замороженных пород необходимо рассматривать такие методы оценки, которые бы строго учитывали в расчетной схеме именно их, при чем параметры процесса должны определяться для каждой литологической разности отдельно.

Наращение пучений в период пассивной стадии замораживания можно объяснить таким фактором, как миграция воды к фронту промерзания.

Миграция воды – это процесс передвижения воды в замерзающем грунте (Рисунок 1.8). Выделяют процессы, когда миграция воды осуществляется от фронта промерзания, в данном случае вода, содержащаяся в породах, увеличивается на 9% и процесс миграции воды к фронту замерзания, пучения в таких породах может достигать до 20% из-за постоянного притока воды [6].

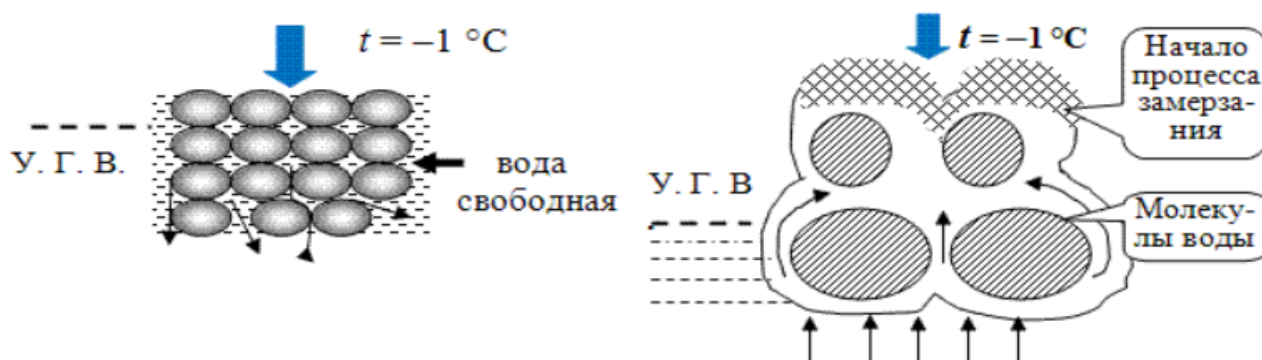


Рисунок 1.8 – Схема миграции воды

Пучение – увеличение объема грунта при его замерзании. На графике (Рисунок 1.9) приведены два характерных грунта:

–Глинистый грунт (красная кривая). В этом случае в начале замерзания возникают незначительные усадочные деформации. Затем при дальнейшем понижении температуры происходит интенсивное увеличение объема грунта (пучение).

–Песок (пунктир), который является не пучинистым грунтом. Для такого грунта деформации при понижении температуры (замерзании) не происходят [6].

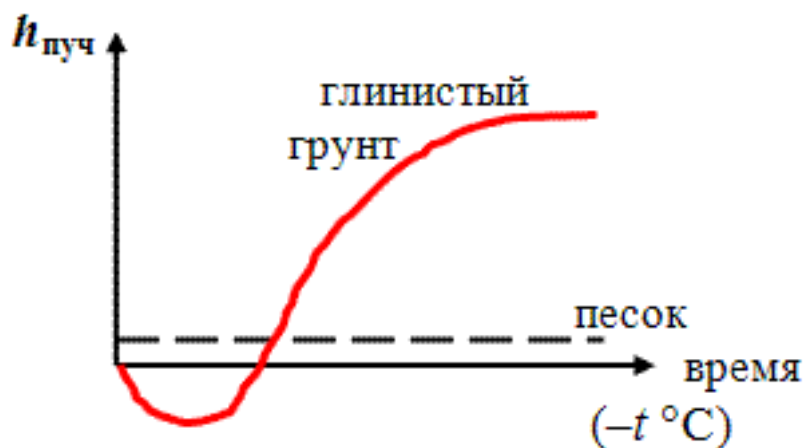


Рисунок 1.9 – Развитие пучений

Образование ледопородного ограждения без возможности миграции влаги в замороженную часть массива приводит к предсказуемому увеличению (или распучиванию) объема пород вследствие увеличения объема кристаллизующейся воды на 9%. Замороженная часть массива испытывает всестороннее увеличение объема на несколько процентов. В закрытых системах (без возможности бокового или вертикального расширения породы) это может привести к возникновению значительных напряжений на контакте с соседними породами (особенно при значительных параметрах их жесткости и прочности), здесь часто проявляется переуплотнение пород и их перемещение [67].

Замораживание водонасыщенных или неводонасыщенных пород с возможностью миграции влаги характеризуется вымерзанием воды и интенсивной миграцией незамерзшей части влаги к замершим участкам с интенсивным льдовыделением. В таких средах оценка конкретных показателей объемного расширения затруднена. Первостепенное значение в формировании напряжений и деформаций здесь оказывают локальные увеличения объема на 9% при ледообразовании, раскливающее действие тонких пленок мигрирующей незамерзшей воды и усадка минерального скелета мерзлой породы при дегидрации и т.д. [67]. В подобных массивах могут проявляться плохо контролируемые варианты перемораживания массива, когда толщина ледопородного ограждения значительно превышает проектные показатели, что неблагоприятно сказывается и на деформациях, и на технологических показателях.

Рассмотрение результатов многочисленных исследований в смежных областях [29,30,85,86,87,88], главным образом в области механики пучинистых грунтов и мерзлотоведения показало необходимость специальных исследований в части оценки параметров замораживания слабых и обводненных пород, теплопереноса и оценки пучинистости, где кроме теплофизических характеристик пород необходимо оценивать сложные процессы миграции влаги при заморозке, физическая природа которых до конца не изучена и не описана на уровне количественной оценки теплопереноса и увеличения влажности. Работы ориентированы на рассмотрение механики мерзлых грунтов оснований зданий и

сооружений, связанных с циклическими процессами оттаивания и промерзания приповерхностных толщ грунтов, большая часть работ посвящена механике грунтов в условиях вечной мерзлоты, в то время как специально организованное искусственное замораживание на больших глубинах (до 70-80 м от земной поверхности), практически не рассматривается исследователями.

Для третьего этапа (периода оттаивания пород) характерно постепенное развитие оседаний и деформаций в породном массиве за счет сложного сочетания процессов восстановления объема пород при разморозке, вторичного перераспределения напряжений и деформаций, снижения показателей прочностных и деформационных свойств пород, оказывая существенное влияние на земную поверхность и чугунную обделку эскалаторного тоннеля. Процесс оттаивания сопровождается сначала плавной асимметричной компенсацией пучений на поверхности, а после этого постепенным развитием оседаний (до 350÷450 мм). Обделка эскалаторного тоннеля также получает оседания в верхней части тоннеля (до 200÷250 мм). Из-за применения естественного размораживания, процессы сильно растянуты во времени, имеют затухающий характер и могут длиться более 4-5 лет.

Механизмы развивающихся во времени процессов разморозки грунтов и связанных с ними геомеханических процессов ещё более сложны, и не определяются только переходом грунтовых вод из твердой фазы жидкую. Здесь большое значение имеет и радикальное изменение свойств твердой фазы грунтов (из-за разрушающего действия заморозки), и миграция грунтовых вод с выносом твердых фракций грунтового скелета, и вторичная дренированная консолидация ослабленных грунтов. Расчет таких процессов должен обязательно учитывать накопленные на первых стадиях смещения и не равномерные по массиву упругие и пластические деформации грунтов. Большой сектор научных и технических разработок, позволяющий рассматривать большой спектр методов в обозначенной выше оценке деформаций, сосредоточен в области криологии [72,86].

После того как холодильные установки отключаются и начинается демонтаж замораживающих колонок, начинается процесс консолидации, массив

представляет собой тело, в состав которого входят отдельные слабо связанные между собой элементы, еще способные сопротивляться деформированию. Структура тающего ледопородного ограждения, из-за находящегося льда, называется «морозной» и эта структура имеет определенную плотность, следовательно, процесс консолидации протекает длительное время, пока весь лед не перейдет в стадию воды и оттаявшая вода под нагрузкой не мигрирует в массив. Этот процесс протекает до тех пор, пока массив не примет равновесное стабильное состояние. Деформации в массиве, происходящие в период консолидации и есть деформации вертикальных и горизонтальных сдвижений, которые тем больше, чем меньше была плотность грунтов до замораживания.

Длительность процессов консолидации зависит от первоначальной влажности горных пород, толщины ледопородного ограждения и скорости оттаивания горных пород. Оттаявшая вода отжимается как в боковые, так и в подстилающие слои, в этот период вода встречает сопротивление, на преодоление которого уходит длительный период времени. Исследования показали, что больший объем мигрирующей воды уходит в нижележащие геологические слои [72]. Выделяют первичную (фильтрационную) консолидацию, она протекает в водонасыщенных грунтах (таких как в инженерно-геологических условиях города Санкт-Петербург). Напряжения, возникающие в водонасыщенных грунтах, делятся на напряжения в грунтах и на поровое давление. Поровое давление в массиве имеет разное давление и как следствие под разной нагрузкой происходит миграция воды в менее нагруженную часть массива, под действием этих процессов происходит перестройка массива и вторичное уплотнение горных пород. Так же выделяют вторичную консолидацию, характеризующаяся ползучестью грунтов (или их реологические свойства), способность грунтов деформироваться с течением времени. Деформации вторичной консолидации протекают сразу после того как на грунт начинает действовать внешняя нагрузка. Для решения задач, связанных с оттаиванием горных пород, в исследованиях принято считать, что вторичная и первичная консолидация протекают одновременно [25,61].

При оттаивании, связующая способность льда исчезает, грунт теряет свою монолитность (Рисунок 1.10), с резким снижением прочностных и деформационных характеристик, т.е. проявляет просадочные свойства [6].

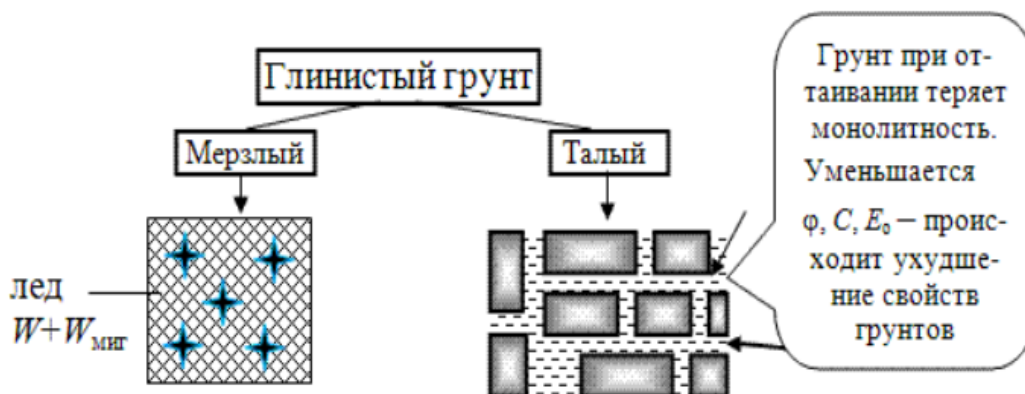


Рисунок 1.10 – Изменение структуры грунта (схематично)

Процессы, происходящие при оттаивании пород, напрямую зависят от процессов, происходящих в период их замораживания и начального (естественного) состояния. При оттаивании пород происходит уменьшение объема за счет перехода льда в воду, разрушение криогенной текстуры за счет собственного веса [46]. При переходе льда в воду существенно меняются физико-механические свойства, также происходит поглощение тепла. Вследствие этого происходит перестройка массива [29].

Для оценки или построения расчетных схем и методик прогноза деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания необходимо обозначить круг факторов, определяющих развитие таких деформаций, и классифицировать их. Анализ имеющихся наработок и проявлений этих процессов при строительстве эскалаторных тоннелей позволил выделить шесть основных групп факторов:

I. Геометрические факторы — факторы характеризующие размеры и взаимное расположение выработки, сети скважин и геологических элементов в массиве. Факторы и параметры этой группы могут быть потенциально учтены при использовании конечно-элементного моделирования геомеханических процессов;

II. Геомеханические факторы — факторы, которые определяются главным образом физико-механическими свойствами пород, типом и характером нагрузок в массиве. Факторы и параметры этой группы также могут быть учтены при использовании численного моделирования;

III. Технологические факторы — факторы, характеризующиеся параметрами работы системы замораживания (отклонениями геометрии скважиной сети от проекта, фактической температуры хладоносителя, времени и продолжительности фаз заморозки и т.д.) и параметрами проходки (скоростью проходки, качеством крепления, качеством заполнения заобделочного пространства, своевременностью и качеством чеканки швов и т.д.). При существенном отклонении от проекта, данная группа факторов может оказать значительное влияние на величину сдвижений и деформаций на земной поверхности. Учет подобных факторов в модельных и других расчетах представляет определенные сложности и потенциально может быть реализован косвенно, через интегральные показатели.

IV. Геокриологические факторы — факторы, определяющие характер развития зоны замороженных пород и изменения характеристик пород при заморозке и последующей разморозке. Строгий математический учет влияния данных факторов невозможен, ввод в расчетную схему также возможен косвенно через эмпирические показатели из опыта аналогичных проходок.

V. Гидрогеологические факторы — факторы, которые определяются типом и составом пород и грунтовых вод, фильтрационными характеристиками пород массива, пористостью, влажностью, смачиваемостью пород. Факторы потенциально можно учесть при использовании численного моделирования, что наиболее актуально для стадий разморозки;

VI. Теплофизические факторы — факторы, определяющие теплопроводные свойства пород и неоднородную динамику изменения температурного поля в замораживаемом массиве. Факторы могут быть учтены эмпирически по данным измерений в термометрических скважинах.

Из данного перечня видно, одновременный учет всех значимых факторов в задачах геомеханического прогнозирования невозможен, как в виду



непреодолимой сложности аналитической задачи, так и в виду отсутствия или низкой достоверности ряда параметров, определяющих форму и степень влияния каждого фактора.

Итак, задача количественной оценки параметров процесса сдвижений и деформаций в породном массиве при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания представляется нам наисложнейшей из тех, которые рассматриваются в подземной геотехнологии. Она связана с одновременным рассмотрением разных по физической природе процессов, сложным трехмерным и асимметричным характером силового воздействия, физических, теплофизических и гидрогеологических процессов, характеризуется влиянием шести групп факторов, параметры по которым ещё и меняются во времени. Без разделения задачи на ряд последовательных задач (как минимум на задачу о замораживании и размораживании массива), обоснованного исключения из расчета второстепенных параметров, привлечения теоретических методов и обобщения натурных данных, а также упрощения расчетных схем, здесь не обойтись.

### **1.6 Существующие методы оценки сдвижений и деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей**

Подземное строительство оказывает существенное влияние на земную поверхность и как следствие на подрабатываемые здания и сооружения [58]. В связи с интенсивным развитием городской инфраструктуры, строительство метрополитена осуществляется в условиях плотной городской застройки, поэтому оценка влияния строительства подземных сооружений в таких условиях должна быть первостепенной.

Оценкой вредного влияния горных работ на земной поверхности занимались отечественные и зарубежные ученые, из них можно выделить: С.Г. Авершин [1,2], Г.Н. Кузнецов [47], С.П. Колбенков [45], А.Г. Акимов [3,4,5], В.Н. Гусев [22,23,24], М.Г. Мустафин [57] и др. Отдельно следует выделить труды В.Ф. Подакова [65], К.П. Безродный [8], С.Н. Сильвестрова [73,74,75],

Ю.А. Лиманов [49] В.П. Хуцкого [83,84,85], М.В. Долгих [27], Е.М. Волохова [12,13,14], Н. Cai [91] и др., чьи вопросы посвящены сдвигению пород при подземном строительстве в условиях плотной городской застройки.

Для геологических условий города Санкт-Петербург применяется метод оценки вредного влияния, описанный в «Пособии...» Подакова В.Ф. [66]. Данная методика прогноза основана на первичной оценке параметров мульд сдвижений, таких как положение точки максимального оседания и величины максимального оседания. Сильвестровым С.Н. предложена формула (1.1) для расчета [75]:

$$\eta_0 = \frac{[\delta_p^2 + \delta_p(0,64D_B + 0,36D_G)] l_{cp.вз} \sqrt{m_0} h}{0,23K_p L_y}, \quad (1.1)$$

где  $\delta_p$  – толщина ледогрунтового ограждения, м;  $D_B$  – вертикальный диаметр, м;  $D_G$  – горизонтальный диаметр, м;  $l_{cp.вз}$  – средневзвешенное значение относительного уплотнения замороженной толщи;  $h$  – мощность, м;  $L_y$  – длина мульды сдвижения в главном сечении, м;  $m_0$  – параметр, определяющий крутизну склонов,  $1/m^2$ ;  $K_p$  – коэффициент разрыхления (для обводненных грунтов принимают  $K_p=1,0$ ; для необводненных грунтов -  $K_p=1,08$ ).

Положение точки максимального оседания в главном сечении мульды сдвижения, проходящем по оси эскалаторного тоннеля, определяется по формуле (1.2):

$$d = 0,26L_э, \quad (1.2)$$

где  $L_э$  - длина эскалаторного тоннеля, м.

Для расчета величины максимального оседания требуются отдельные исследования, для получения всех составляющих формулы. Недостатком данного выражения является то, что оно связано только со стадией естественного оттаивания пород и не учитывает влияние активного и пассивного замораживания.

Границы мульды сдвижений, проходящей через точку максимального оседания вдоль оси эскалаторного тоннеля, определяются геометрически, откладыванием углов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  от низа замороженной толщи (Рисунок 1.11).

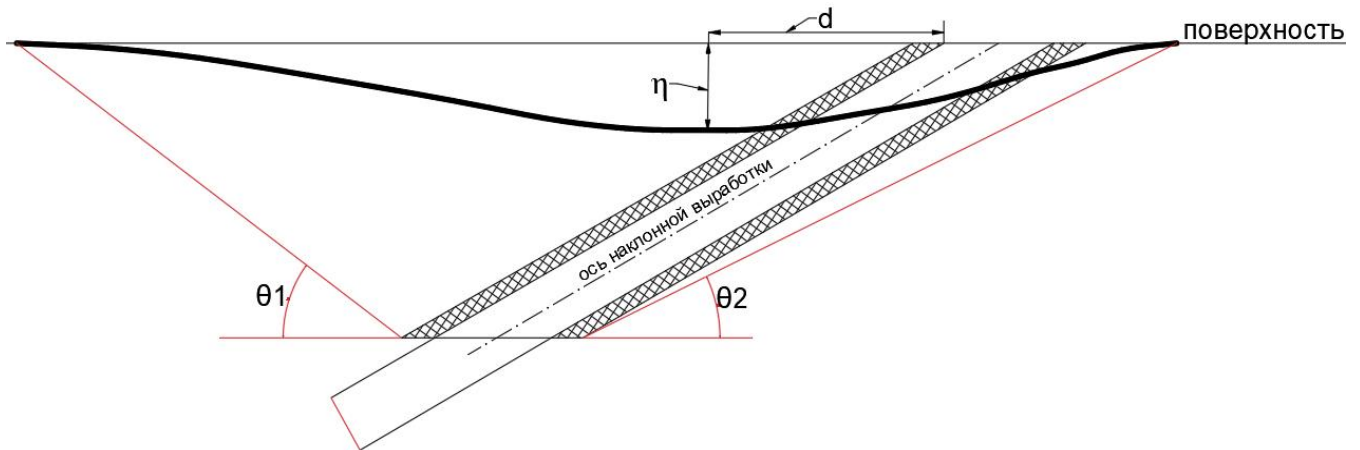


Рисунок 1.11 – Определение границ мульд свижений в главном продольном сечении

Оседания, наклоны и кривизна получают из выражений (1.3-1.5):

$$\eta(x) = \eta_0 S(z); \quad (1.3)$$

$$i(x) = \frac{\eta_0}{L} S'(z); \quad (1.4)$$

$$K(x) = \frac{\eta_0}{L^2} S''(z). \quad (1.5)$$

где  $\eta(x)$ ,  $i(x)$ ,  $K(x)$  – оседание, наклон и кривизна соответственно;

Определение этих параметров предложил М.А. Иофис [35-38]. Значения  $S(z)$ ,  $S'(z)$ ,  $S''(z)$  – это функции, характеризующие распределение оседаний, наклонов и кривизны соответственно, определяющиеся табличным способом (Таблица 1.1)

Таблица 1.1 – Функции распределения оседаний, наклонов и кривизны в мульде сдвижения» [38]:

$z=x/L$	$S(z)$	$S'(z)$	$S''(z)$
0	1,000	0	-2,3
0,1	0,923	-1,16	-5,9
0,2	0,768	-1,56	-2,3
0,3	0,610	-1,62	0,2
0,4	0,452	-1,53	1,8
0,5	0,312	-1,27	2,6
0,6	0,198	-1,00	2,7
0,7	0,111	-0,74	2,7
0,8	0,051	-0,46	2,6
0,9	0,018	-0,21	2,0
1,0	0	0	0

Полученная методика расчета применяется как для горизонтальных, так и для наклонных выработок, что не совсем корректно. Правильнее будет выделить отдельную типовую кривую для наклонных выработок, так как деформационные процессы в массиве при строительстве горизонтальных и наклонных выработок существенно отличаются друг от друга, так же эти горные выработки по-разному оказывают влияние на земную поверхность.

Известна типовая кривая, заданная аналитически, получившая широкое распространение для аппроксимации кривых на угольных месторождениях, представленная С.П. Колбенковым (Формула 1.6) [45,55]:

$$S(z) = (1 - z)^{az^b e^{az}} \quad (1.6)$$

где  $z=x/L$ ;  $L$  – длина полумульды;  $x$  – абсцисса рассматриваемой точки (начало координат в точке максимального оседания);  $E$  – основание натурального логарифма;  $a, b, c$  – коэффициенты, подбираются при помощи регрессионного анализа [98].

Также известна типовая кривая, предложенная Н.С. Баком (Формула 1.7) [16], имеющая всего два коэффициента, в отличие от функции, предложенной Колбенковым:

$$S(z) = (1 + az^2)^{e^{-bz^2}} \quad (1.7)$$

Наклоны и кривизна по двум представленным функциям находятся как первая и вторая производственные соответственно.

При исследовании вредного влияния на земную поверхность при сооружении эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов, необходимо отдельно выделить труды С.Н. Сильвестрова. Основной составляющей исследований является моделирование сдвижений земной поверхности методом эквивалентных материалов [73]. На специальном стенде постепенно моделируются все этапы строительства эскалаторного тоннеля способом замораживания: замораживание горных пород, выемка грунта, монтаж обделки и естественное оттаивание горных пород. Материалы, использованные при таком моделировании, подбирались таким образом, чтобы они имитировали

свойства грунтов в своем естественном состоянии, т.е. до начала горнопроходческих работ.

Для моделирования материалов использовались формулы (1.8) и (1.9):

$$\varphi_M = \varphi_H \quad (1.8)$$

$$c_M = \alpha \frac{\gamma_M}{\gamma_H} c_H \quad (1.9)$$

где  $\varphi_M$  – угол внутреннего трения для материалов, использованных в моделях;  $\varphi_H$  – угол внутреннего трения горных пород;  $c_M$  – сцепление для материалов, использованных в моделях;  $c_H$  – сцепление горных пород;  $\alpha$  – линейный коэффициент моделирования;  $\gamma_M$  – объемный вес для материалов, использованных в моделях;  $\gamma_H$  – объемный вес горных пород.

Формулы (1.6) и (1.7) позволяли имитировать четвертичные отложения.

Для моделирования обделки эскалаторного тоннеля использовались формулы (1.10) и (1.11):

$$E_M = \alpha \frac{\gamma_M}{\gamma_H} E_H, \quad (1.10)$$

$$\mu_M = \mu_H \quad (1.11)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Благодаря исследованиям С.Н. Сильвестрова, было выявлено, что не качественное нагнетание за обделку эскалаторного тоннеля дает порядка 25% от общей величины оседаний, а остальные 75% происходят за счет изменения физико-механических свойств грунтов в период естественного оттаивания горных пород и геомеханических процессов, описанных выше. Границы мульд сдвижений зависят от глубины замораживающих скважин и определяются граничными углами [75].

С целью уменьшения вредного влияния на земную поверхность от эффектов замораживания, разработаны следующие мероприятия:

– отказ от искусственного оттаивания, циркуляцией по замораживающим колонкам рассола с положительной температурой, в пользу естественного

оттаивания пород, при естественном оттаивании скорость оседаний значительно ниже и имеет затухающий характер;

– вторичное нагнетание за обделку эскалаторного, заполняют специальным цементным быстросхватывающим раствором, для уменьшения оседаний;

– отвод воды, образованной от тающего льда, для ограничения миграции влаги и избыточного льдовыделения.

Однако на практике, применяется только метод естественного оттаивания пород, при достижении эскалаторного тоннеля более устойчивых пород, например, коренных глин, холодильная установка полностью отключается, замораживающие колонки демонтируются.

Всё более часто в современных работах, посвященных оценке влияния горно-строительных работ на напряжено-деформированное состояние, исследователи опираются на математическое моделирование методом конечных элементов. Так, например, в работах Потемкина Д.А. [67] и Белякова Н.А. [10] предпринималась попытка оценить сдвиги пород и земной поверхности по результатам такого моделирования. Авторы пришли к выводу, что сдвиги на земной поверхности напрямую связаны с толщиной ледопородного ограждения. Сравнения данных, полученных при таком моделировании, с данными по методике «Пособия...» [66] и по натуре показали существенное различие. Это отчасти объясняется, часто имеющим место на практике, значительным перемораживанием грунта сверх проектного (рассчитанного по условиям прочности ледопородного ограждения) объема, а также тем, что общая величина оседаний складывается из двух групп составляющих: обусловленных замораживанием и оттаиванием пород и собственно горными работами при проходке тоннелей, которые сложно учесть одновременно. Главным недостатком таких модельных исследований следует признать не достаточное использование данных результатов маркшейдерских измерений, которые в принципе позволяют верифицировать такие конечно-элементные модели.

С точки зрения нормативного обеспечения здесь следует признать практически полное отсутствие нормативной базы в области оценки сдвижений,

защиты зданий и сооружений от вредного влияния горных работ при строительстве эскалаторных тоннелей. Единственным документом, проливающим свет на методику оценки сдвижений и деформации, является, уже упомянутое Пособие, датируемое 1971 годом. За прошедшие 50 лет проведено множество исследований в области технологий замораживания грунтов, накоплен большой опыт оценки динамики формирования ледопородных ограждений, изучены механизмы воздействия замораживания-размораживания на физико-механические свойства пород, собрано много натуральных данных по сдвигениям и деформациям земной поверхности.

Важным элементом текущей оценки сдвижений и деформаций традиционно считаются натурные наблюдения. Анализ современного состояния регламентации таких наблюдений при ведении горно-строительных работ также показывает практически полное отсутствие упоминаний об эскалаторных тоннелях, в маркшейдерских инструкциях не рассматриваются ни специальные методики наблюдений, ни конструкции наблюдательных станции. В единственном нормативном документе РД 07-166-97 [34], напрямую касающемся деформационных наблюдений в подземном строительстве (причем, к сожалению, действующего только для условий г. Москвы), эскалаторные тоннели отдельно не выделяются и не рассматриваются, поэтому приходится опираться только на общие рекомендации по наблюдениям. Простой иллюстрацией отсутствия должного внимания в документах к этому типу выработок и их особенностям является игнорирование вопроса оценки положения точки максимального оседания на поверхности, локализация которой здесь далеко не очевидна. Важным позитивным моментом в организации таких наблюдений является личная инициатива грамотных и ответственных горных инженеров маркшейдеров, создающих специальные наблюдательные станции и проводящих комплекс мониторинговых деформационных наблюдений даже при отсутствии прямых указаний нормативных документов. Очевидно, этого совершенно недостаточно для правильной постановки наблюдений, текущего маркшейдерского контроля и обеспечения безопасности строительства. Кроме того, нередки случаи сведения

наблюдений к типовым нивелировкам по нерегулярным сетям реперов временных наблюдательной станции, с реперами в столбах освещения или в виде забитых в асфальт дюбелей, а при наличии городской застройки в зоне мульды, лишь из примитивных стенных реперов. В целом приходится констатировать, что таким опасным, с точки зрения проявления деформаций, выработкам уделяется не достаточное внимание, здесь требуется обеспечить разработку и ввод соответствующих дополнений в маркшейдерские инструкции, отразить требования к натурным наблюдениям в нормативной базе для проектирования объектов метрополитена.

Итак, учитывая геометрическую сложность объекта исследований, наличие мощной вмещающей толщи дискретно неоднородных, слабых, неустойчивых и обводненных пород, плохую изученность вопросов оценки геомеханического состояния массива в условиях воздействия замораживания, а также практически полное отсутствие нормативной базы, проблему постановки оценки сдвижений и деформаций горных пород и охраны подрабатываемых сооружений при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания следует признать по-прежнему актуальной.

Наши исследования и исследования других авторов показывают широкую перспективу применения методов математического моделирования сдвижений и деформаций на базе метода конечных элементов. Наиболее сложным моментом такого моделирования является учет эффектов замораживания, для которых редко предлагаются специальные инструменты моделирования, поэтому приходится опираться на имеющийся арсенал средств и их компиляцию. Главное, что такой подход позволяет обеспечить рассмотрение геомеханических процессов на основе учета реальной физической картины явлений. Ключевым элементом обеспечения достоверности моделирования здесь является использования натурных маркшейдерских данных, полученных на эскалаторных тоннелях, для так называемой калибровки моделей.

Исследования возможностей организации натурных наблюдений показали необходимость: ввода в типовые наблюдательные станции дополнительных



профильных линий в крест простираения оси тоннеля (как минимум, в зоне максимальных оседаний и в зоне максимальной ширины мульды), ввода в станцию группы реперов на контуре устья выработки, выделения отдельного периода наблюдений на фазе активного замораживания для контроля временных пучений и оценки деформаций растяжения, продления типовых сроков периодических наблюдений на стадии затухания оседаний (при разморозке массива). Учитывая существенные особенности рассматриваемой выработки, технологии замораживания и возможностей современных измерительных систем, требуют отдельного обоснования базовые элементы типовой методики натуральных наблюдений: методов и средств наземного и подземного деформационного мониторинга; схем деформационных сетей и наблюдательных станций; оценки требуемой точности измерений; периодов, частоты и сроков проведения наблюдений.

### **1.7 Выводы по первой главе**

– Строительство метрополитенов - вынужденная мера для мегаполиса. Развитая инфраструктура и историческая застройка городов предполагает производить оценку вредного влияния такого подземного строительства на земную поверхность. При глубоком заложении линий метрополитена самой сложной технологически и опасной по деформациям является эскалаторный тоннель, сооружаемый по технологии замораживания;

– Применение технологии искусственного замораживания при строительстве выработок метрополитена по-прежнему весьма распространено — на каждый эскалаторный тоннель проходимый с использованием ТПМК приходится два тоннеля, сооружаемого способом замораживания. Эта технология используется в отечественной практике более 90 лет, на данный момент она хорошо отработана, оптимизирована, не требует использования специального дорогостоящего оборудования, долгих и дорогостоящих подготовительных и заключительных работ, характеризуется невысоким уровнем затрат на строительство. Такое подземное строительство характеризуется сложной

геометрией и горно-геологическими условиями, многостадийным физическим воздействием на слабые горные породы (активная и пассивная стадия замораживания, естественное оттаивание горных пород), проявлением самых больших деформаций на земной поверхности. Так, период нарастания ледопородного ограждения характеризуется проявлением больших и опасных деформаций пучения, с образованием мульды поднятий на земной поверхности с максимумом до 250-260 мм, а в период естественного оттаивания мульды оседания на поверхности, где оседания могут достигать 400-450 мм.

– Анализ известных работ в области искусственного замораживания грунтов показал недостаточную изученность геомеханического воздействия замораживания на породный массив и практически полное отсутствие методик оценки деформаций в массиве и на поверхности. Рассмотрение результатов многочисленных исследований в смежных областях, главным образом в области механики пучинистых грунтов и мерзлотоведения показало необходимость специальных исследований в части оценки параметров замораживания слабых и обводненных пород, тепломассопереноса и оценки пучинистости. Невозможность, на данном этапе развития науки, строгого количественного описания тепломассопереноса, предопределила использование в исследовании упрощенных теоретических способов и эмпирических данных при оценке деформаций пучений при искусственном замораживании и размораживании;

– Предварительный анализ механизмов геомеханических процессов, сопровождающих реализацию технологии проходки эскалаторных выработок способом замораживания, показал весьма сложный характер, одновременно развивающихся и взаимовлияющих друг на друга, процессов разной физической природы. Качественные и количественные показатели этих геомеханических процессов определяются одновременным влиянием шести групп факторов, исчерпывающий учет которых в расчётной схеме теоретически не возможен. Поэтому для построения расчетных методик оценки деформаций определена группа факторов, оказывающих наибольшее влияние на развитие

деформационных процессов в массиве и на земной поверхности. К ним, прежде всего, относятся: геомеханические и технологические факторы.

– Разработка достоверной прогнозной оценки вредного влияния таких горных работ и охрана зданий и сооружений должны базироваться на комплексном использовании зависимостей описывающих динамику формирования ледогрунтовых ограждений, математического моделирования сдвижений численными методами и натурных данных маркшейдерских наблюдений.

## **ГЛАВА 2 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Основным источником достоверных данных при изучении процессов сдвижений на земной поверхности являются методы натуральных маркшейдерских наблюдений. До начала работ над будущим сооружением закладывается наблюдательная станция. Началом работ при строительстве эскалаторных тоннелей принято считать включение холодильной установки. От того насколько качественно запроектирована и заложена наблюдательная станция над будущим сооружением перед началом работ, а также периодический мониторинг вертикальных и горизонтальных сдвижений дневной поверхности в период осуществления горнопроходческих работ и после способствует обеспечению безопасности и контролю подрабатываемых зданий и сооружений.

На основании многочисленных накопленных данных натуральных маркшейдерских наблюдений строятся основные закономерности сдвижений и деформаций. В условиях плотной городской застройки при строительстве эскалаторных тоннелей нормативная база по измерению вертикальных и горизонтальных сдвижений отсутствует.

В данной главе описаны методы натуральных маркшейдерских наблюдений при строительстве эскалаторных тоннелей, применяемых на сегодняшний день, выявлены их недостатки. Произведена обработка натуральных данных маркшейдерских наблюдений, набранных при сооружении эскалаторных тоннелей санкт-петербургского метрополитена, пройденных с помощью искусственного замораживания грунтов.

### **2.1 Существующие методы мониторинга деформаций на земной поверхности**

Одной из составляющих маркшейдерской службы является наблюдение и контроль за вертикальными сдвигами и деформациями на земной поверхности при строительстве подземных сооружений метрополитена, так как строительство ведется в условиях плотной городской застройки. Определенного

регламента по проведению наблюдений за вертикальными сдвигениями нет, наблюдения осуществляется традиционным геодезическим методом, соответствующий точности нивелированию III класса, по заранее закрепленным точкам, при необходимости, точки закладываются вдоль зданий.

Мониторинг деформаций земной поверхности осуществляется согласно следующим документам: ГОСТ 24846-81 «Грунты» [21], «Инструкцией по геодезическим и маркшейдерским работам при строительстве транспортных тоннелей» ВСН 160-69 [33], инструкцией РД 07-166-97 [34], «Инструкцией по нивелированию I, II, III и IV классов» [32]. Данные документы лишь косвенно имеют отношение к мониторингу за сдвигениями и деформациями.

Перед началом горнопроходческих работ производится первая серия наблюдений. Началом горнопроходческих работ при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов принято считать включение активной стадии заморозки.

Высота исходных реперов определяется путем их нивелирования, с точностью нивелирования II класса, рассчитываемая по формуле (2.1) [32]:

$$f_{\text{дон}} = \pm 5\sqrt{L_{\text{мм}}} \quad (2.1)$$

где  $L$  – длина хода нивелирования II класса, км.

Высотные положения реперов, которые будут приняты за исходные, определяются прокладыванием нивелирного хода III класса в прямом и обратном направлении, исходные отметки определяются как среднеарифметическое двух измерений. Последующие серии измерений производят в одном направлении с точностью нивелирования III класса [23]. Для каждой точки определяется высотное положение  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ . При помощи этих высот, строят профиль наблюдательной станции как разницу по высотной отметке между исходным и полученным значением  $Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n}$  (Формула 2.2)[23]:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= Z_1 - Z_{01}; \\ &\text{-----} \\ \eta_n &= Z_n - Z_{0n}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $\eta_1, \eta_n$  – вертикальные сдвигения.

От полученных вертикальных сдвижений, получаем распределение наклонов ( $i$ ) вдоль профильной линии, найдя первую производную от сдвижений (Формула 2.3) [24]:

$$\begin{aligned} i_1 &= (\eta_2 - \eta_1)/l \\ i_2 &= (\eta_3 - \eta_2)/l \\ &\text{-----} \\ i_n &= (\eta_{n+1} - \eta_n)/l \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $l$  – расстояние между реперами, м.

Взяв вторую производную от оседаний или первую от деформаций наклонов (Формула 2.4), получим распределение деформаций кривизны ( $K$ ) [24]:

$$\begin{aligned} K_1 &= (i_2 - i_1)/l & K_1 &= (\eta_3 - 2\eta_2 + \eta_1)/l^2 \\ K_2 &= (i_3 - i_2)/l & K_2 &= (\eta_4 - 2\eta_3 + \eta_2)/l^2 \\ &\text{-----} & &\text{-----} \\ K_n &= (i_{n+1} - i_n)/l & K_n &= (\eta_{n+1} - 2\eta_n + \eta_{n-1})/l^2 \end{aligned} \quad \text{или} \quad (2.4)$$

Системное наблюдение высотного положения исходных точек наблюдательной станции, обеспечит получение своевременной информации об изменениях на земной поверхности, и рассчитать значения наклонов и кривизны.

После каждой серии измерений проводится их камеральная обработка и составляются сводные таблицы промежуточных результатов.

Данные заносятся в каталог, в котором зафиксированы первичные отметки реперов наблюдательной станции с их описанием и планом расположения, в котором фиксируется изменения высотного положения каждой точки в момент времени  $t$ .

## 2.2 Натурные данные маркшейдерских наблюдений, полученных по результатам наблюдений за процессом сдвижений на земной поверхности

Обработку натуральных данных маркшейдерских наблюдений можно разделить на два этапа:

- период активного и пассивного замораживания;
- период естественного оттаивания пород.

### 2.2.1 В период активной и пассивной стадии замораживания

При строительстве эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена, пройденных с помощью искусственного замораживания грунтов, велись маркшейдерские наблюдения за изменением дневной поверхности, однако эти данные получены в основном после проходки выработок и несут информацию об изменении положения грунтовых реперов в период естественного оттаивания. В связи с этим до начала горнопроходческих работ будущего эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская» Красносельско-Калининской линии города Санкт-Петербург была запроектирована и заложена наблюдательная станция и произведены первичные и последующие серии измерений с занесением промежуточных результатов в электронный журнал. Наблюдения производились примерно раз в месяц.

Горно-геологические условия строительства эскалаторного тоннеля следующие:

$L_9$  – длина наклонного хода: 110 м;

$D_6$  – вертикальный диаметр наклонной выработки: 10,5 м;

$\delta$  – проектная толщина ледогрунтового ограждения: 2,75 м;

$h$  – проектная мощность замороженной толщи: 55,6 м;

$\theta_1, \theta_2$  – углы влияния горных выработок в четвертичных отложениях, соответственно 30 и 40 град.;

$\theta$  – угол сдвижения в четвертичных отложениях: 38 град;

$T$  – период активной стадии заморозки: 52 суток.

По методике Сильвестрова рассчитано положение точки максимального оседания и длины мульд в главном продольном и главном поперечном сечении.

Рассчитано расстояние  $d$  по формуле (2.5):

$$d = 0,26L_9 = 0,26 * 110 = 28,60 \text{ м} \quad (2.5)$$

На земной поверхности согласно проектным данным вынесена ось будущего наклонного хода и определена точка пересечения верхнего контура

выработки с земной поверхностью, от этой точки отложено расстояние  $d$ , таким образом, определена точка максимального оседания (Рисунок 2.1).

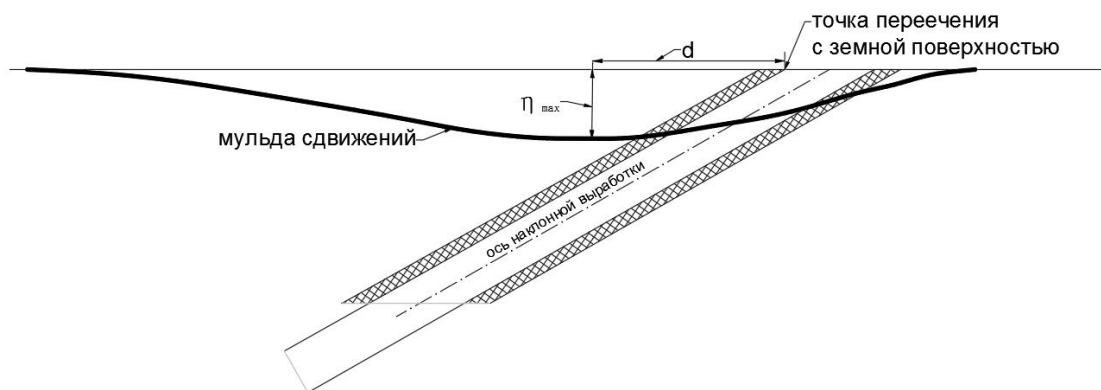


Рисунок 2.1 – Положение точки максимального оседания

Рассчитана длина мульды в главном продольном сечении по формуле (2.6):

$$L_y = 2(D_B + 2\delta) + h(ctg\theta_1 + ctg\theta_2) = 2(10,5 + 2 * 2) + 55,6(ctg 30 + ctg 40) = 191,56 \text{ м} \quad (2.6)$$

От точки максимального оседания, вдоль оси наклонного хода на длине равной 191,56 м закладываются остальные репера, удерживая расстояние в среднем от 15 до 20 м между реперами таким образом, чтобы между соседними точками сохранялась видимость, всего получилось 11 точек.

Рассчитана длина мульды в главном поперечном сечении по формуле (2.7):

$$L_x = 2hctg\theta = 2 * 55,6 * ctg 40 = 132,52 \text{ м} \quad (2.7)$$

От точки максимального оседания, перпендикулярно оси наклонного хода на длине равной 132,52 м закладываются точки главного поперечного сечения на расстоянии 15-20 м, сохраняя видимость между соседними реперами, всего получилось 9 точек. Данное сечение дублируется для двух дополнительных линий (Рисунок 2.2).

Таким образом определены границы будущих сдвижений и деформаций. помимо главного продольного и главного поперечного сечения, заложены две дополнительные профильные линии, перпендикулярные оси будущего эскалаторного тоннеля, расстояние между точками также составило порядка 15-20 м. Схема полученной наблюдательной станции представлена на Рисунке 2.2 [56].



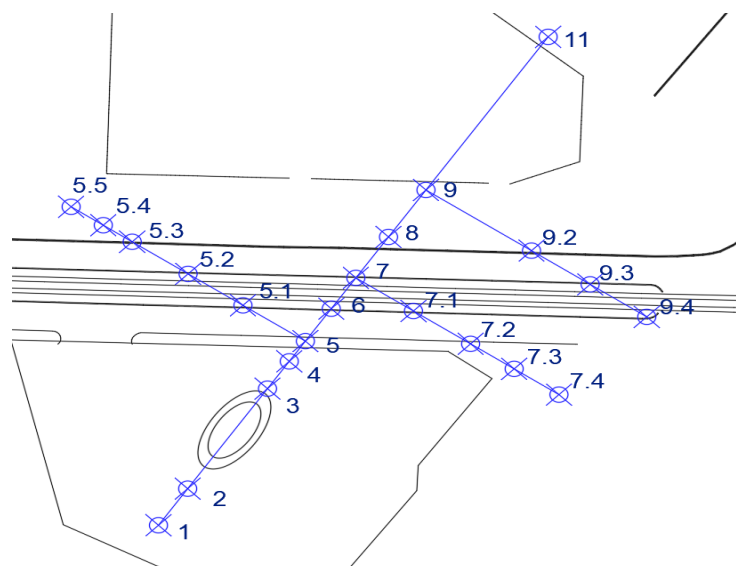


Рисунок 2.2 – Наблюдательная станция эскалаторного тоннеля станции метро «КазакOVская»

Активная стадия заморозки длилась в период с 28.02.2019г. по 22.04.2019г., что составило 54 суток, наблюдения за пучением пород производились два раза в неделю. Вдоль оси будущего эскалаторного тоннеля образовалась трещина на асфальте в районе ожидаемого максимального оседания (Рисунок 2.3), ширина трещины 54 мм, пучение пород на момент окончания активной стадии замораживания составило 98 см.



Рисунок 2.3 – Трещина, образованная в период активной стадии заморозки станции метро «КазакOVская»

После переключения холодильной установки с активного на пассивное замораживание, началась проходка эскалаторного тоннеля. Наблюдения за сдвигами и деформациями на земной поверхности показали, что пучения в период пассивного замораживания продолжались вплоть до отключения холодильной установки (Рисунок 2.4). Пассивная стадия замораживания длилась в период с 23.04.2019г. по 21.02.2020г., холодильная установка отключена 22.02.2020 г.

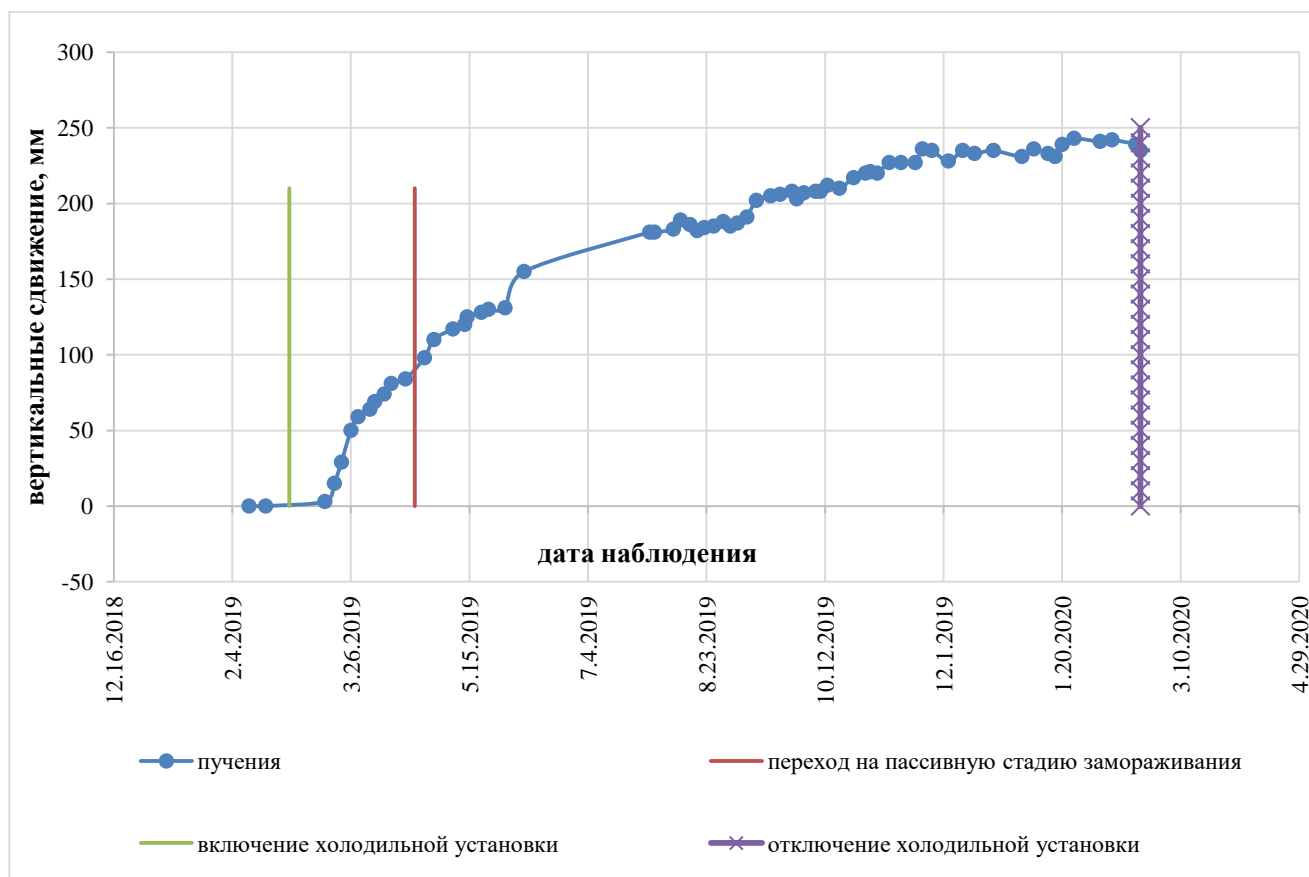


Рисунок 2.4 – Пучения, вызванные активной и пассивной стадией замораживания в точке ожидаемого максимального оседания

Натурные наблюдения в период активного и пассивного замораживания показали, что пучения нарастают постепенно. Развитие мульд сдвижения (поднятий) в главном продольном и главном поперечном сечении для эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская» представлены на Рисунке 2.5 и 2.6 соответственно.

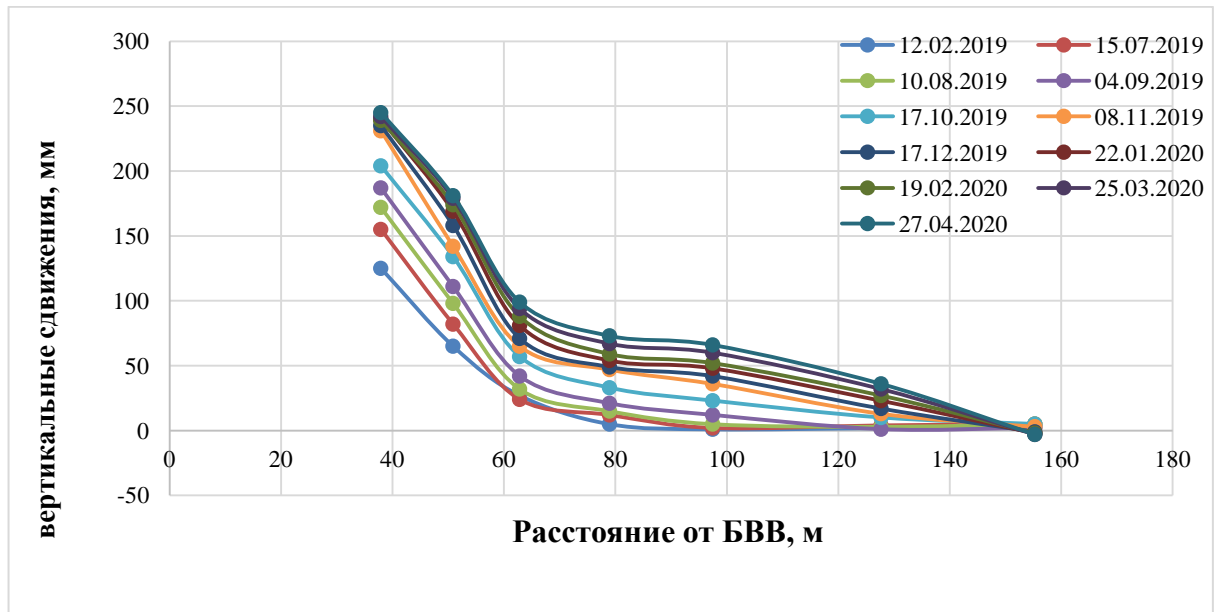


Рисунок 2.5 – Муфта главного продольного сечения станции петербургского метрополитена станции метро «Казаковская»

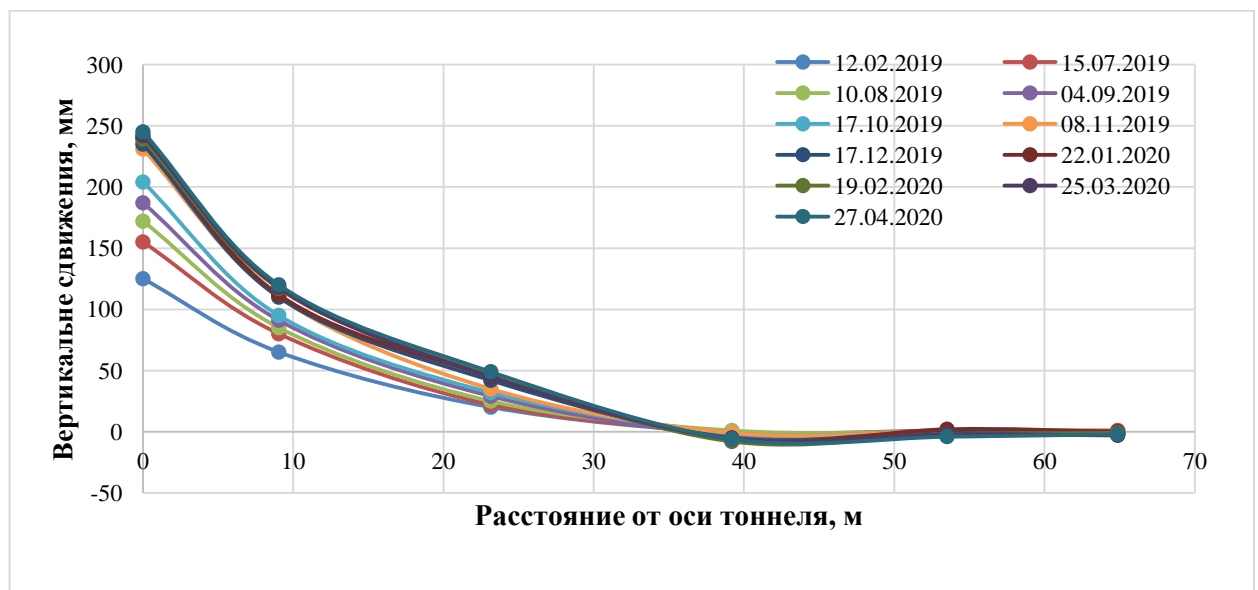


Рисунок 2.6 – Муфта главного поперечного сечения станции петербургского метрополитена станции метро «Казаковская»

В данном случае максимальные пучения на земной поверхности составили 98 мм на момент окончания активной стадии замораживания и 245 мм на момент отключения холодильной установки.

Как показывают натурные данные маркшейдерских наблюдений значения пучений на земной поверхности и в массиве в период активной и пассивной стадии замораживания имеют нарастающий характер вплоть до отключения

холодильной установки. Скорость распределения пучений в период активной стадии замораживания в среднем составляет 2-3 мм в сутки (Рисунок 2.5) на земной поверхности, в период пассивной стадии замораживания 10-12 мм в месяц (Рисунок 2.6).

Данные наблюдения показали, что вертикальные сдвигения в период активной и пассивной стадии замораживания превышают предельно-допустимые значения и оказывают влияние на подземную коммуникацию и подрабатываемые здания и сооружения. Однако данных по одному эскалаторному тоннелю недостаточно, для полного изучения влияния этих этапов строительства на дневную поверхность требуются дальнейшие исследования для оценки влияния пучений в период активной и пассивной стадии замораживания на подрабатываемые здания и сооружения.

### **2.3.2 В период естественного оттаивания**

Период естественного оттаивания горных пород характеризуется постепенным развитием оседаний и деформаций в мульде за счет восстановления объема жидкой фазы грунта, вторичного перераспределения напряжений и деформаций и снижения показателей прочностных и деформационных свойств пород. Этот этап, характеризующийся максимальными значениями сдвижений (оседаний). Максимальные оседания на момент окончания наблюдений могут достигать 400-500 мм, а длина мульды сдвижения в главном продольном может достигать 200-250 м, в главном поперечном сечении 150-200 м.

Наблюдательная станция должна представлять собой взаимно перпендикулярные линии, расположенные вдоль оси эскалаторного тоннеля и перпендикулярно ей [60]. Наблюдательные станции, организованные при проходке трех эскалаторных тоннелей (эскалаторные тоннели ст.м. «Проспект славы I», «Проспект славы II» и ст.м. «Международная») не представляют собой взаимно перпендикулярные линии грунтовых реперов (Рисунок 2.7), точки в основном расположены на фонарных столбах, вдоль зданий и сооружений.

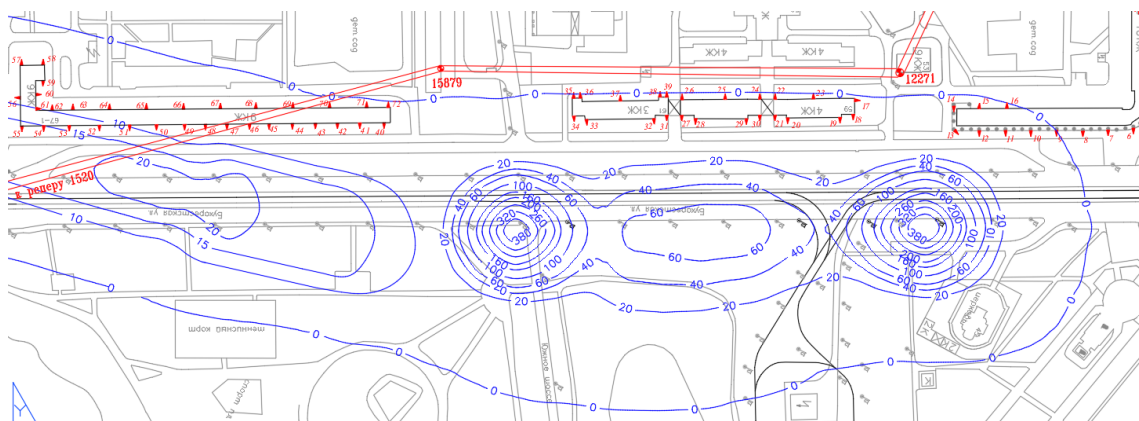


Рисунок 2.7 – Наблюдательная станция эскалаторного тоннеля станции метро «Проспект Славы I», «Проспект Славы II»

В случае строительства эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная» из-за плотно развитой инфраструктуры на земной поверхности, не было возможности производить наблюдения по главным сечениям, проходящим через точку максимального оседания, поэтому наблюдения осуществлялись за реперами, заложенными вдоль зданий и сооружений, также за деформационные точки принимались репера нивелирной городской сети, попадающие в зону вредного влияния от строительства эскалаторных тоннелей (Рисунок 2.8).

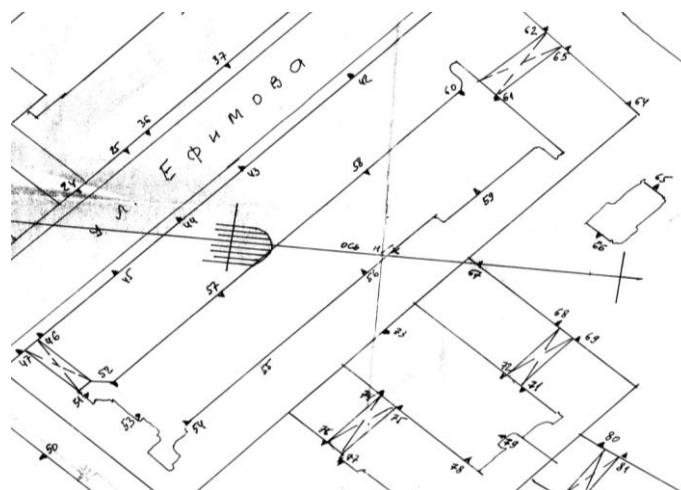


Рисунок 2.8 – Участок строительства эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная»

Результаты натурных маркшейдерских наблюдений, произведенных при проходке эскалаторных тоннелей в условиях Санкт-Петербурга, позволяют говорить о постепенном развитии мульд сдвижения на земной поверхности.

Пример развития мульды сдвижения при строительстве эскалаторного тоннеля станции «Сенная» в главных сечениях представлен на Рисунке 2.9 и 2.10 [60].

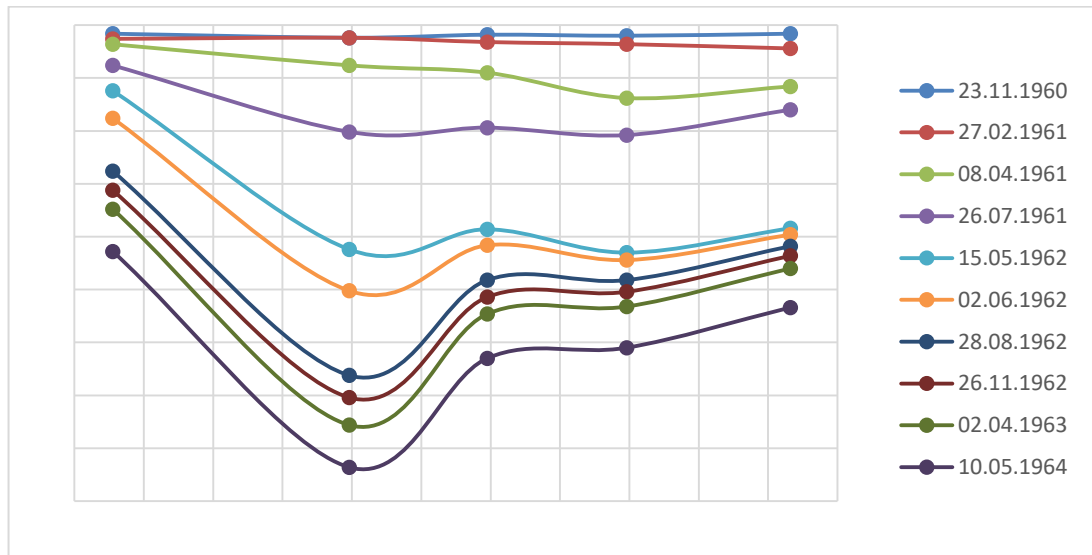


Рисунок 2.9 – Развитие мульды сдвижения эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная» в главном продольном сечении

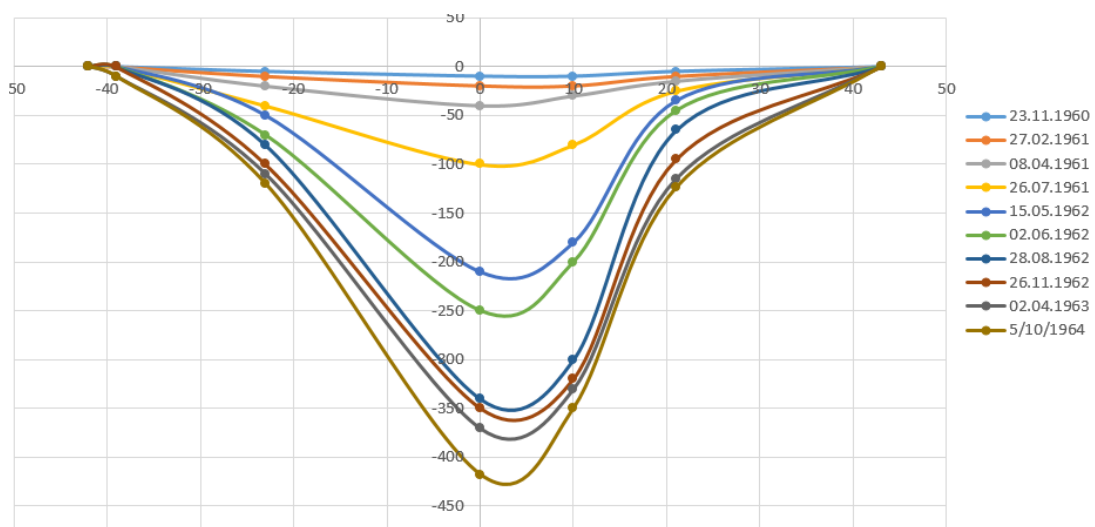


Рисунок 2.10 – Развитие мульды сдвижения эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная» в главном поперечном сечении

В данном случае (при сооружение эскалаторного тоннеля станции «Сенная» в Санкт-Петербурге) размеры мульды сдвижения на момент окончания наблюдений достигали 205 м и 185 м в продольном и поперечном направлениях соответственно (Рисунок 2.11). Максимальные оседания на земной поверхности составили 418 мм, деформации наклонов  $i=13,6 \cdot 10^{-3}$ , деформации кривизны  $k=6 \cdot 10^{-4}$  1/м (Рисунок 2.12 и 2.13) [60,92].



Рисунок 2.11 – Граница мульды вертикальных сдвижений (оседаний) на земной поверхности при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная» (вид в плане)

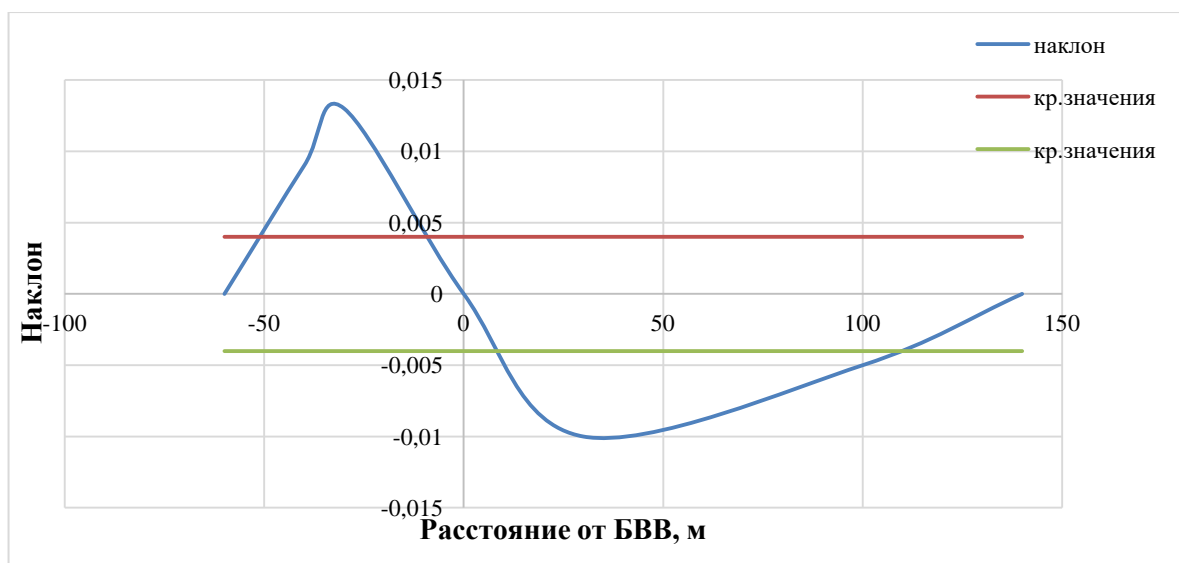


Рисунок 2.12 – Значения наклона в главном продольном сечении для станции метро «Сенная»

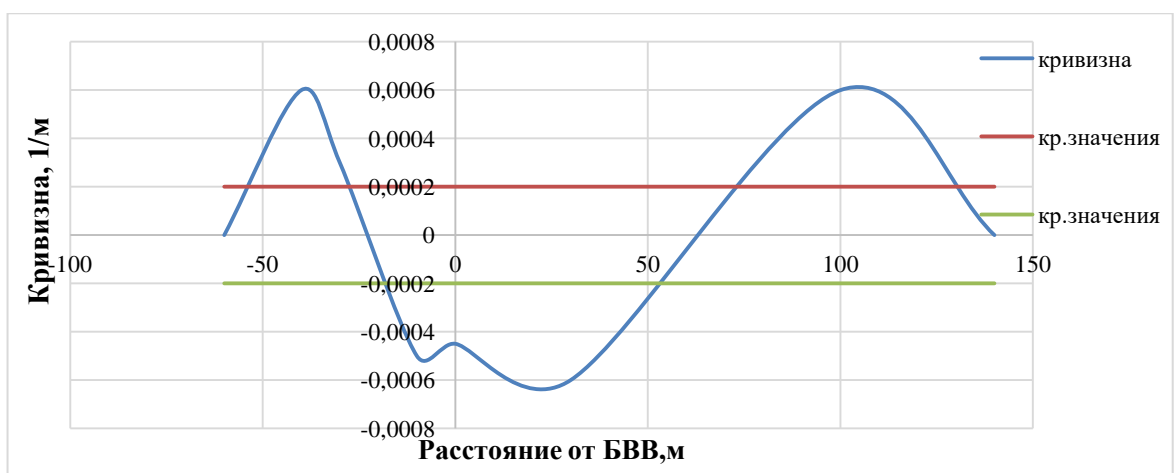


Рисунок 2.13 – Значения кривизны в главном продольном сечении для станции метро «Сенная»

Значения деформаций, рассчитанные по данным натуральных наблюдений, существенно превышают значения критических деформаций наклонов и кривизны, которые определяют зону опасного влияния согласно «Правилам охраны...» [68], в Приложении А представлены параметры мульд сдвижений для нескольких эскалаторных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена.

Мониторинг натуральных данных, как показывает практика, имеет несистематический характер. Существенным недостатком при обработке данных является нерегулярность размещения точек наблюдательной станции на поверхности, не обеспечивается их сохранность на весь период наблюдений. Данные факторы создают сложности при анализе и обработке натуральных данных.

Наблюдательные станции не позволяют рассмотреть процесс в главном продольном и главном поперечном сечении, поэтому для получения значений в главных сечениях приходилось функции интерполяции, но полученные данные таким образом могут отличаться от истинных значений, что не может в полной мере отразить полную картину деформаций на земной поверхности.

Как видно из представленных данных влияния (мульда сдвижения) работ по строительству эскалаторных тоннелей способом замораживания обширна, а деформации на поверхности весьма значительны, здесь они кратно превышают уровень предельных деформаций согласно классическим критериям Правил охраны [68]. Мульды сдвижения, как правило, характеризуются несимметричностью по полумульдам в поперечных сечениях, скачкообразным (неплавным) распределением оседаний в мульде (на графиках в основном представлены сглаженные кривые), существенной разностью значений максимальных оседаний и профилям мульд от тоннеля к тоннелю. Именно поэтому эскалаторные тоннели считаются наиболее сложной, с точки зрения охраны зданий и сооружений, выработкой метрополитена.

Однако зона опасных для зданий и сооружений деформаций в мульде ограничена и в целом изометрична, что позволяет рассматривать в качестве основной меры защиты зданий и сооружений объемно-планировочное решение для подземного комплекса, когда проектировщик использует зоны улиц и



площадей свободные от застройки, размещая ось выработки с наименьшим ущербом. Горные меры защиты по понятным соображениям здесь практически не рассматриваются (из-за отсутствия действенных методов влияния на отрицательные эффекты от заморозки пород), а конструктивные (строительные меры) могут быть актуальны только в краевых частях мульды.

Залогом корректного применения указанной меры защиты является достоверная прогнозная оценка сдвижений и деформаций и правильный выбор критериев для оценки степени влияния. В части последнего упомянутого аспекта приходится констатировать повсеместность неправомерного использования критериев современных строительных норм и правил, таких, например, как ТСН 50-302-2004 [69] и СП 22.13330.2016 [63]. Здесь в качестве основного критерия для оценки степени влияния выступает величина предельного оседания (или предельной осадки), причем авторы этих новых критериев до сих пор не представили убедительных доказательств работоспособности подобных критериев в рассматриваемом здесь контексте. Для корректной оценки влияния подземного строительства наиболее предпочтительным вариантом является использование деформационных критериев (т.е. деформаций как первой и второй производных от оседаний) из Правил охраны [68], таких как деформация кривизны, горизонтальная деформация или показатель суммарных деформаций. Даже по уровню превышения фактических деформаций (из натурных наблюдений для эскалаторных тоннелей) значений критических деформаций из указанных документов можно сделать вывод о корректности таких оценок. Так, согласно критериям ТСН или СП, максимальные деформации превышают критический уровень для зданий исторической застройки в 20-100 раз, а согласно критериям Правил охраны, в 2-3 раза. Критерии Правил охраны получены из наблюдений на сотнях наблюдательных станции при подработке тысяч зданий сооружений, они хорошо адаптированы под оценку деформаций в контексте охраны зданий и сооружений. А, критерии ТСН или СП оправданы лишь логикой наблюдений за сжатием оснований под зданиями, которая плохо подходит для контроля деформационных процессов, развивающихся при любых видах подработки.

## 2.4 Влияние геомеханических процессов технологии искусственного замораживания грунтов на деформации обделки эскалаторного тоннеля

При строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания используется чугунная обделка с наружным диаметром 8,5 и 10,5м. В настоящее время, при проектировании новых станций, диаметр в основном используют 10,5м (внутренний диаметр 9,8м), такое кольцо состоит из 20 чугунных элементов (Рисунок 2.14).

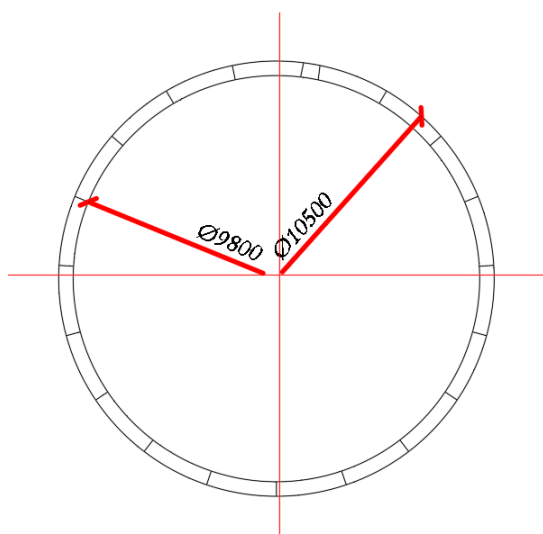


Рисунок 2.14 – Пример обделки эскалаторного тоннеля диаметром 10,5м

Монтаж производится с «лотка», затем монтируется по одному элементу с каждой стороны. Для каждого кольца определяется его эллиптичность – это разность между величинами фактического и проектного радиуса кольца (Рисунок 2.15). Эллиптичность определяется по четырем параметрам: горизонтальному ( $r1-r5$ ), вертикальному ( $r3-r7$ ), и правому и левому косому под углом  $45^{\circ}$  ( $r2-r6$  и  $r4-r8$  соответственно). Для сохранения геометрии уложенных колец, производится первичное нагнетание за обделку специальным раствором. В сложных инженерно-геологических условиях нагнетание производится непосредственно сразу после замыкания каждого уложенного кольца [54].

При строительстве эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская» деформационные измерения за сводом производились для каждого пятого кольца. Наклонная выработка включает в себя 138 колец, из них 18 временной обделки.



Рисунок 2.15 – Определение эллиптичности кольца

Данные наблюдений показали, что эффекты замораживания также оказывают существенное влияние и на обделку эскалаторного тоннеля. Монтаж кольца №20 производился 29.11.2019г. Свод кольца был установлен на 70 мм выше проектного значения. В период пассивного замораживания и дальнейшей проходки эскалаторного тоннеля кольцо поднялось еще на 77 мм, то есть положение кольца было выше проектного значения на 147 мм. Далее в период естественного оттаивания кольцо начало проседать и на конец января 2021 г. достигло своего проектного положения. Проходка кольца №20 осуществлялась в районе четвертичных отложений. График распределения изменения эллиптичности для свода кольца приведен на Рисунке 2.16.

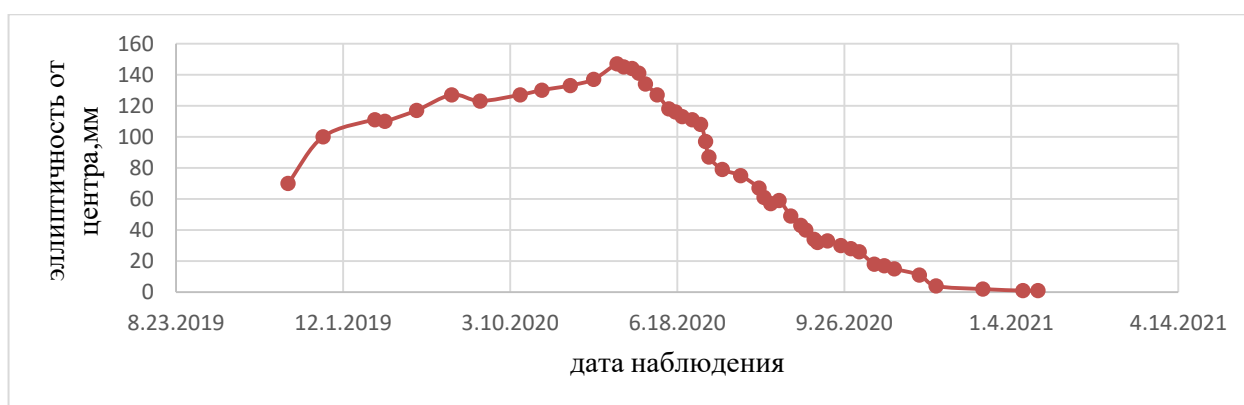


Рисунок 2.16 – Эллиптичность свода кольца №20

По мере дальнейшей проходки эскалаторного тоннеля (в период пассивной стадии замораживания), все наблюдаемые кольца постепенно поднимались относительно своего первоначального положения. На Рисунке 2.17 приведены

изменения вертикальной эллиптичности (изменений по радиусу) для колец, пройденных в пределах четвертичных отложений.

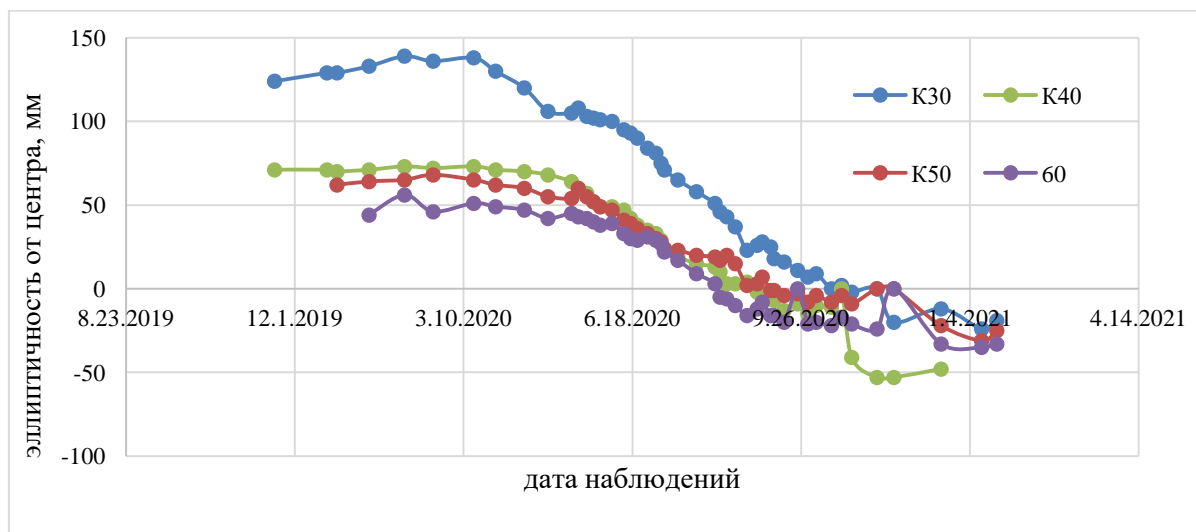


Рисунок 2.17 – Эллиптичность свода колец, пройденных в четвертичных отложениях

После отключения холодильной установки, кольца, пройденные в период пассивной стадии замораживания, начинают проседать.

Видно, что кольца, пройденные в протерозойских глинах, практически сохраняют свое первоначальное положение. Изучая данные по вертикальным смещениям можно увидеть, что пассивная стадия замораживания оказывает существенное влияние на обделку эскалаторного тоннеля. В последующих стадиях (при размораживании пород) большая часть деформаций компенсируется, создавая весьма неблагоприятные условия знакопеременных деформаций обделки.

С целью уменьшения неравномерных оседаний и деформаций обделки и конструкций эскалаторов, снижению водопитока в выработку через нарушенные швы между тубингами, при достижении максимальных оседаний целесообразно производить повторную чеканку швов колец, рихтовку положения смонтированного оборудования [54,95].

При сооружении эскалаторных тоннелей с наружным диаметром 10,5м на станциях «Международная» и «Проспект Славы II» г. Санкт-Петербург производились наблюдения за деформациями их обделки. Измерения

производились за сводом и лотком обделки на каждом пятом кольце. По результатам обработки данных наблюдений составлен типовой график оседаний сводов, совмещенный с геологическим разрезом в условиях города Санкт-Петербург (Рисунок 2.18).

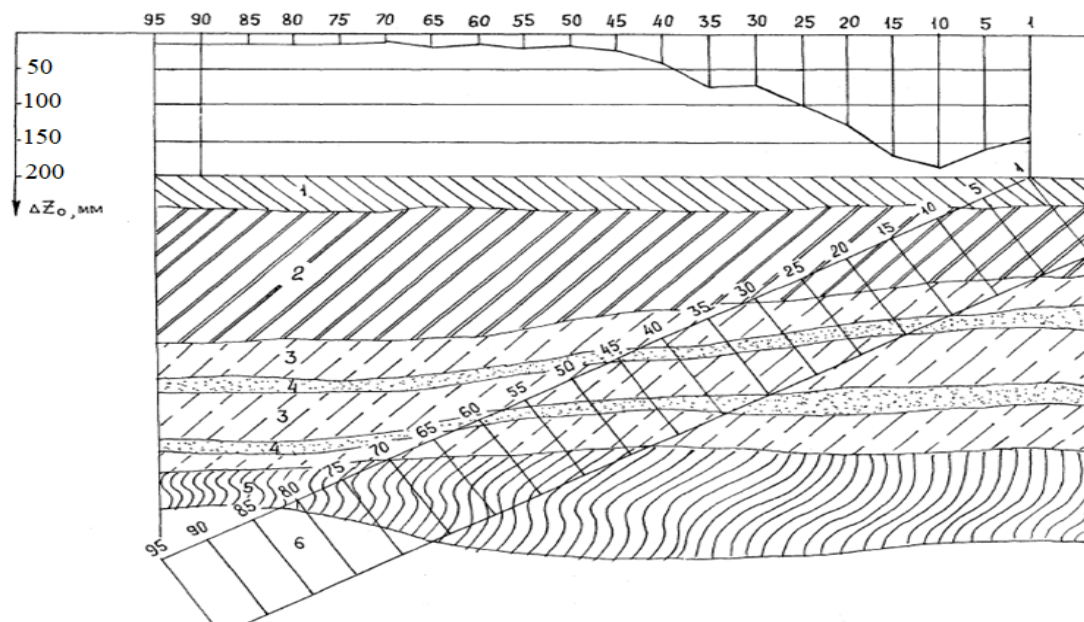


Рисунок 2.18 – Типовой график оседания сводов, совмещенный с геологическим разрезом (слои 1-4 – четвертичные отложения, слои 5-6 – протерозойские глины)

Кольца, пройденные в протерозойских глинах, сохраняют свое первоначальное положение. Изучая данные по вертикальным оседаниям можно определить, что пассивная стадия замораживания оказывает существенное влияние на обделку эскалаторного тоннеля, максимальные оседания в период естественного оттаивания происходят при пересечении эскалаторного тоннеля водонасыщенных геологических слоев в районе четвертичных отложений. С увеличением глубины заложения монтируемого кольца, на обделку эскалаторного тоннеля увеличивается вертикальная нагрузка, но деформации обделки уменьшаются, это связано с изменением физико-механических свойств пород, слагающих массив [27]. С целью уменьшения деформаций конструкций эскалаторов и снижению водопритока в выработку через щели между тубингами, образованными при оседании обделки, при достижении максимальных оседаний целесообразно производить повторную чеканку швов колец и съемку положения смонтированных колец.

Для более подробного изучения данного вопроса необходимо не только заложить наблюдательные станции, представленные цепочкой грунтовых реперов, но и необходимо производить контроль за обделкой наклонной выработки, измеряя эллиптичность в вертикальном и горизонтальном положении на протяжении всего периода строительства.

Из анализа имеющихся натуральных данных маркшейдерских наблюдений на обделку эскалаторного тоннеля можно сделать вывод, что на процесс деформирования влияет не только естественное оттаивание грунтов, но и период пассивной стадии замораживания. С целью уменьшения деформаций конструкций эскалаторов и снижению водопритока в выработку через щели между тубингами, образованными при оседании обделки, при достижении максимальных оседаний целесообразно производить повторную чеканку швов колец и рихтовку положения смонтированных колец.

## **2.5 Анализ результатов натуральных исследований**

Для всех эскалаторных тоннелей, рассмотренных в данной работе, произведен анализ результатов натуральных исследований. Исходные данные для эскалаторного тоннеля «Сенная», «Садовая», «Лиговский проспект» представлены журналами нивелирования, а для эскалаторных тоннелей «Международная», «Проспект славы I», «Проспект славы II» и «Казаковская» каталог велся в электронном виде, все измерения рассчитывались в программе Excel.

Имеющиеся данные натуральных маркшейдерских наблюдений описаны аналитической зависимостью, приведены к единичному виду. Как было отмечено выше, из-за недостатков натуральных наблюдательных станций, недостаточного количества грунтовых реперов, основной сложностью было определение размеров полумульд (граничных критериев). По обработанным натуральным данным маркшейдерских наблюдений за границы мульды сдвижений были приняты репера, где оседания не превышали 1-5 мм, в случае отсутствия таких реперов, границы находились при помощи интерполяции.

Изучение распределения мульд сдвижений заключается в определении аналитического выражения типовой кривой. Типовая кривая – безразмерная функция распределения основных видов сдвижений и деформаций. Аналитическое задание типовой функции наиболее удобно для последующих расчетов. В ходе исследования для описания формы кривой была выбрана функция, предложенная Н.С. Бак. Она имеет следующий вид (Формула 2.8) [16]:

$$S(z) = (1 + az^2)e^{-bz^2} \quad (2.8)$$

где  $S(x)$  – единичная функция распределения оседаний земной поверхности в сечении мульды сдвижений;  $z=x/L$  ( $L$  – длина полумульды,  $x$  – абсцисса рассматриваемой точки, начало координат в точке максимального оседания);  $e$  – основание натурального логарифма;  $a, b$  – постоянные коэффициенты.

Коэффициенты в формуле определяются оператором `genfit` в программном комплексе `Mathcad`, реализующимся методом нелинейной регрессии. Идея данной функции заключается в том, чтобы среднеквадратическое отклонение полученных по формуле величин оседаний и данных натурных маркшейдерских наблюдений было минимальным.

Для каждого эскалаторного тоннеля были определены коэффициенты  $a$  и  $b$ , описывающих форму полумульд сдвижений, возникающих от строительства эскалаторных тоннелей при помощи замораживания грунтов. Полученные коэффициенты для каждого эскалаторного тоннеля сведены в Таблицу 2.1.

Таблица 2.1 Коэффициенты  $a$  и  $b$  для эскалаторных тоннелей

Эскалаторный тоннель	$a$	$b$
Сенная	8,112	8,651
Садовая	8,404	8,824
Лиговский проспект	8,235	8,799
Проспект Славы II	8,476	8,698
<b>Средние значения</b>	<b>8,307</b>	<b>8,743</b>
Казаковская	0,003	10,806

Так как полученные коэффициенты для разных эскалаторных тоннелей получились близкими друг к другу, были усреднены. График полученной типовой кривой приведен на Рисунке 2.19.

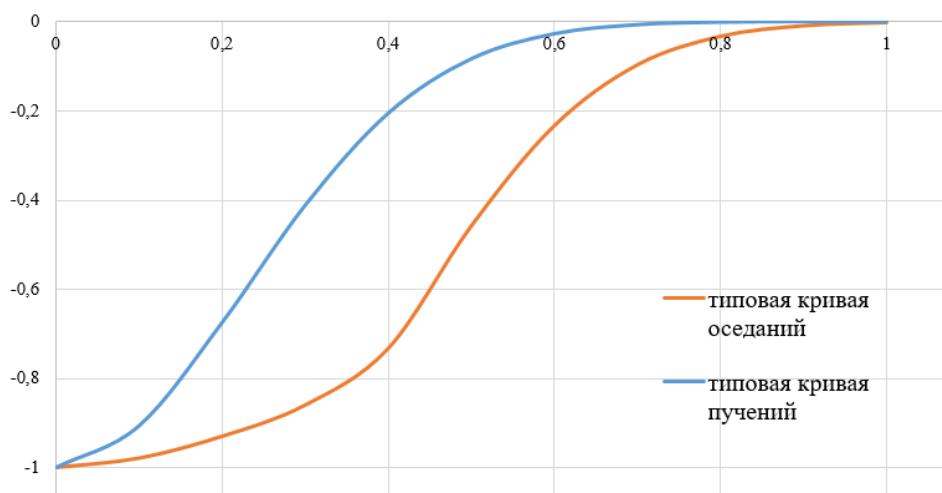


Рисунок 2.19 – Типовые кривые, построенные по данным натуральных маркшейдерских наблюдений

## 2.7 Выводы по второй главе

– Обработаны данные натуральных маркшейдерских наблюдений, полученных в период строительства эскалаторных тоннелей с помощью искусственного замораживания грунтов, на территории города Санкт-Петербург.

– На первых этапах работы, с целью корректного исследования и анализа количественных характеристик процессов сдвижений и деформаций земной поверхности, была спроектирована и заложена специальная наблюдательная станция. Организация мониторинговых наблюдений на строящемся эскалаторном тоннеле станции «Казаковская» впервые позволила детально исследовать влияние первых этапов сооружения, когда породный массив испытывает влияние активной и пассивной стадий замораживания. Помимо данных с этой наблюдательной станции, произведена обработка данных натуральных маркшейдерских наблюдений, полученных при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов для шести уже построенных эскалаторных тоннелей Петербургского метрополитена. Кроме оценки количественных показателей деформаций, выявлены недостатки применяемых в настоящее время методов натуральных маркшейдерских наблюдений, не позволяющие производить достоверную оценку сдвижений и деформаций на земной поверхности, особенно в краевых частях мульды сдвижений. Полученные значения сдвижений и деформаций на земной



поверхности показали, что деформации существенно превышают значения критических значений наклонов и кривизны, которые определяют зону опасного влияния процесса сдвижения на земную поверхность. Выявлено, что процессы сдвижений земной поверхности начинаются с момента включения активной стадии замораживания и продолжаются после отключения холодильной установки в среднем 4-5 лет, имея затухающий характер.

– Выявлены недостатки применяемых в настоящее время методов натурных маркшейдерских наблюдений:

1) Нерегулярное расположение реперов наблюдательных станций, что в ряде случаев обуславливает невозможность определения границ мульды;

2) Нерегламентированная продолжительность мониторинговых наблюдений, зачастую не позволяет оценить время окончания процесса сдвижения на земной поверхности;

3) Сохранность грунтовых и видимость стенных реперов не обеспечивается на весь период строительства эскалаторных тоннелей;

4) На основании анализа натуральных данных изучены мульды сдвижения от строительства эскалаторных тоннелей станций петербургского метрополитена, формы кривых описаны аналитически;

5) Наблюдательные станции не всегда позволяют произвести достоверную оценку для определения краевой части мульды сдвижений.

Для правильной постановки системы натуральных наблюдений на строящихся эскалаторных тоннелях необходимо учитывать не только сложную несимметричную геометрию мульды сдвижения и большие деформации, но многостадийность работы системы замораживания, определяющей разнонаправленность сдвижений и существенное изменение деформаций по стадиям, а также инициирующей проявление сложных, сильно растянутых во времени, реологических процессов в оттаивающем породном массиве.

### **ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ В ПЕРИОД АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ СТАДИИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ**

Достоверный прогноз сдвижений и деформаций в условиях плотной городской застройки является важной составляющей обеспечения безопасности подрабатываемых зданий и сооружений. Прогноз должен включать в себя оценку зоны влияния на земной поверхности от строительства эскалаторных тоннелей способом замораживания и своевременно обеспечивать защиту подрабатываемых сооружений.

Как показали данные натурных маркшейдерских наблюдений, этапы строительства эскалаторных тоннелей сопровождаются поднятиями (пучениями) и оседаниями на земной поверхности, связанные с ними деформации, могуткратно превышать уровень предельных (на поверхности образуются зоны опасных деформаций). Только данных натурных маркшейдерских наблюдений недостаточно для осуществления оценки сдвижений и деформаций. Присутствие слабых горных пород, в которых происходит проходка эскалаторных тоннелей, глубокое заложение горных выработок (в среднем 60-70м от земной поверхности) затрудняет применение аналитических методов. Для получения полной картины геомеханических процессов, происходящих и на земной поверхности, и в массиве, для повышения достоверности прогнозной оценки может быть применено математическое моделирование.

#### **3.1 Существующие методы математического моделирования. Метод конечных элементов**

Для моделирования геомеханических процессов выделяют четыре наиболее востребованных численных метода: метод дискретных элементов, метод конечных разностей, метод граничных интегральных уравнений и метод конечных элементов. Наиболее популярным и востребованным является метод конечных элементов [58,59].

МКЭ использовали в своих исследованиях С.Г.Ашихмин [7], Ю.Н.Гавриленко [17], Ю.А.Кашников [40-43]. Конечно-элементное

моделирование выработок тоннелей и метрополитенов отображено в исследованиях Е.М. Волохова [13,100], Д.В. Панфилова [64], С.Ю. Новоженина [59], В.И. Киреевой [44], А.В. Кашко [39], А.Р. Salimi [99], Н. Walter [101] и др. Данный метод позволяет моделировать большую часть известных геомеханических процессов.

МКЭ позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние неоднородного, анизотропного, нелинейного массива с разными физико-механическими свойствами, учитывая параметры заданной крепи и обеспечивая возможности поэтапного моделирования, в том числе опирающегося на технологию проходки [82].

Комбинация данных натуральных маркшейдерских наблюдений и численного моделирования геомеханических процессов позволяет обеспечивать достоверность такой оценки деформаций на количественном уровне, а такие модели позволяют выходить на прогнозную методику оценки сдвижений и деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания.

Суть метода конечных элементов заключена в его названии – это деление расчетной области на множество элементов, в каждом из которых в упрощенной форме решается линейное уравнение, описывающее напряжения и деформации для расчета напряженно-деформированного состояния массива. Таким образом, создается система линейных уравнений, коэффициенты которой объединяются в матрицу жесткости. Нагрузка, действующая в каждом отдельном заданном узле, составляет вектор перемещений, например, от собственной нагрузки крепи обделки или горных пород.

Согласно закону Гука, в котором говорится что рост нагрузки прямо пропорционален деформации, возникающей в упругом теле и направлен в противоположную сторону перемещения, можно получить значения напряжений и деформаций в первом приближении (Формула 3.1) [94,95]:

$$\sigma = [D][\varepsilon], \quad (3.1)$$

где  $[D]$  – матрица жесткости.

Выражение (3.2) описывает матрицу жесткости для плоского напряженного состояния, выражение (3.3) – для деформаций в плоской постановке.

$$[D] = \frac{E}{(1-\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[D] = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Модуль Юнга – основной модуль жесткости для линейно-упругих моделей и модели Кулона-Мора, зависимость модуля Юнга от других модулей описывается выражениями (3.4) – (3.6):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.4)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.5)$$

$$E_{ed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (3.6)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $E_{ed}$  – одометрический модуль [59].

Метод конечных элементов представляет возможность получить напряженно-деформированное состояние массива для каждой фазы расчета с определёнными входными параметрами, получая установившуюся связь между напряжениями и деформациями. Вектор перемещений узлов деформируемого тела, аппроксимируют полиномом, определяемым с помощью узловых значений этой величины. Полиномы в модели подбираются так, чтобы вдоль границ элемента сохранялась непрерывность элементов, таким образом, интегрирование дифференциальных уравнений приводится к системе простых линейных уравнений.

Введем обозначения  $u$  и  $v$  – это напряжения, направленные вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно. Разбив расчетную область на множество треугольных элементов, аппроксимируем вектор перемещений в пределах элементов следующими линейными уравнениями (3.7) и (3.8):

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y, \quad (3.7)$$

$$v(x, y) = a_4 + a_5x + a_6y \quad (3.8)$$

где  $a_1 \dots a_6$  - коэффициенты линейного уравнения.

Решение для вектора перемещений внутри компонента выражается с помощью формул (3.9) и (3.10) следующим образом:

$$\{\delta\} = [A]\{a\} \quad (3.9)$$

$$\{\delta\} = \{u_i, u_j, u_k, v_i, v_j, v_k\}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

где  $\{a\}$  - вектор узловых перемещения, выражающийся формулой (3.11):

$$\{a\} = [A]^{-1} \{\delta\} \quad (3.11)$$

Найдя все коэффициенты линейных уравнений  $a_1 - a_6$  и подставив их в выражение (3.7) и (3.8) получим следующий вид (Формулы 3.12 и 3.13):

$$u = N_i + N_j u_j + N_k u_k \quad (3.12)$$

$$v = N_i + N_j v_j + N_k v_k, \quad (3.13)$$

где  $N_i, N_j, N_k$  – функции элемента, имеющего треугольную форму [59].

Таким образом, деформации каждого элемента принимают вид (Формулы 3.14 и 3.16):

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = N'_{ix} u_i + N'_{jx} u_j + N'_{kx} u_k \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = N'_{iy} u_i + N'_{jy} u_j + N'_{ky} u_k \quad (3.15)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = N'_{iy}u_i + N'_{jy}u_j + N'_{ky}u_k + N'_{ix}u_i + N'_{jx}u_j + N'_{kx}u_k \quad (3.16)$$

В матричном виде эти выражения принимают следующую форму (3.17):

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}, \quad (3.17)$$

где,  $\{\delta\}$  определяется выражением (3.18) и  $[B]$  выражением (3.19):

$$\{\delta\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}\}^T \quad (3.18)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} N'_{xy} & N'_{jx} & N'_{kx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N'_{iy} & N'_{jy} & N'_{ky} \\ N'_{iy} & N'_{jy} & N'_{ky} & N'_{ix} & N'_{jx} & N'_{kx} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Силы в узлах  $F$  выражаются через вектор узловых перемещений по формуле (3.20):

$$\{F\} = [K]\{\delta\}, \quad (3.20)$$

где  $[K]$  - матрица жесткости для треугольного элемента, определяется по формуле (3.21):

$$[K] = \Delta [B]^T [D] [B] \quad (3.21)$$

Матрица жесткости треугольного элемента объединяет в систему простых линейных уравнений узловые силы и неизвестные узловые перемещения по формуле (3.22):

$$[K^c]\{\delta^c\} = \{F^c\} \quad (3.22)$$

Вес плоского элемента рассчитывается по формуле (3.23):

$$P = S\rho g \quad (3.23)$$

где  $S$  – площадь плоского элемента;  $\rho$  – плотность;  $g$  – ускорение свободного падения.

Полученное значение веса обычно распределяется поровну между узлами элемента.

Особенностями треугольного конечного элемента являются:

– перемещения  $u$  и  $v$  имеют линейную зависимость от их пространственного положения в пределах одного элемента, другими словами, прямые отрезки до

изменения напряженно-деформированного состояния, остаются прямыми и после деформации;

– производные от констант линейных уравнений  $N'$  не зависят от пространственного положения, их значения остаются постоянными в пределах элемента [95].

В данном исследовании построение и расчет моделей были реализованы в программном комплексе PLAXIS 3D. Основным элементом в данной программе является тетраэдр с 10-ю узлами (Рисунок 3.1).

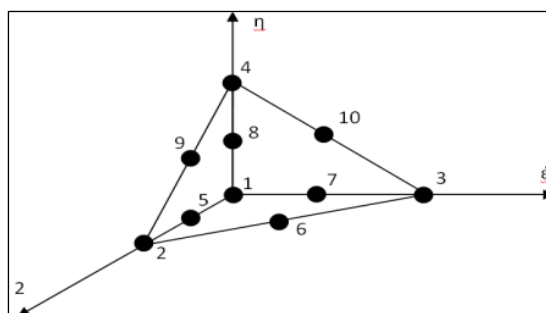


Рисунок 3.1 – Тетраэдр с 10-ю узлами

Достоинства МКЭ:

- возможность решения задач определения напряженно-деформируемого состояния для нелинейных сред: пластичных и вязкоупругих;
- простота реализации вычислительных алгоритмов и большое количество программного обеспечения;
- возможность решения задач в плоской и трехмерной постановке;
- моделирование неоднородных сред;
- возможность учета двухфазных сред (фильтрационные задачи);

Недостатки МКЭ:

- конечный результат расчетов определяется входными параметрами среды, которые определяются недостоверно;
- невозможность прямого обобщения, необходимо сделать большое количество расчетов для выявления закономерностей;
- достоверность оценки зависит от шага сетки.

Основные модели, применяемые при моделировании подземных выработок:

- Линейно-упругая модель;
- Идеальная упругопластическая модель Мора-Кулона;
- Упругопластическая модель с упрочнением грунта (HS - Hardening Soil).

Моделирование строительства эскалаторных тоннелей можно производить с разной степенью точности. Необходимо более детально рассмотреть характеристики вышеупомянутых моделей.

Линейно-упругая модель основывается на законе Гука. В данной модели используется всего два входных параметра: модуль Юнга ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\nu$ ). Она в основном применяется для моделирования прочных массивных конструкций. Грунт имеет значительное нелинейное и необратимое поведение, которое не может быть представлено линейно-упругой моделью. Данная модель в основном используется для моделирования прочных конструкций, но стоит учитывать тот факт, что напряженные состояния в такой модели не ограничены [44].

Идеальная упругопластическая модель Кулона-Мора включает в себя 5 основных параметров: модуль деформации ( $E$ ), коэффициент Пуассона ( $\nu$ ), угол внутреннего трения ( $\varphi$ ), сцепление ( $c$ ) и угол дилатансии ( $\psi$ ). Данные параметры берутся из инженерно-геологических испытаний. Здесь учитываются появления пластических деформаций [94,95,96,97]. Форма представления Кулона-Мора представлена на Рисунке 3.2.

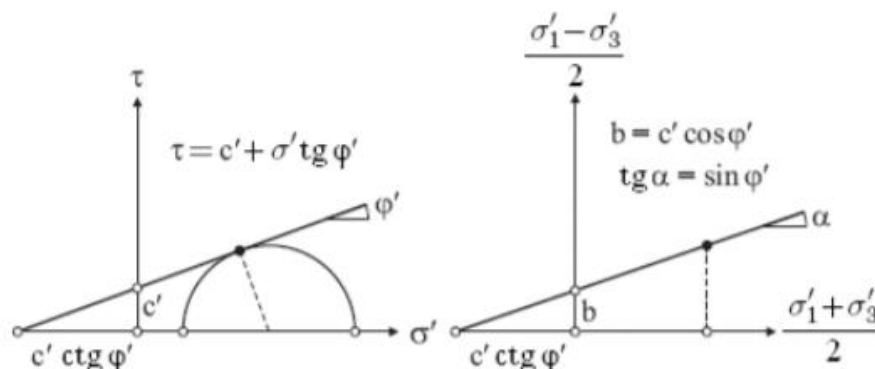


Рисунок 3.2 – Форма представления критерия Кулона-Мора

Данная модель рекомендована для первичной оценки напряженно-деформированного состояния, она позволяет учитывать основные свойства грунта, например, упругое поведение грунта при малых нагрузках.



Упругопластическая модель с упрочнением грунта (HS) применяется в условиях последовательной нагрузки и разгрузки грунта. В отличие от модели Кулона-Мора, здесь жесткость задается тремя входными параметрами: модуль деформации при трехосном нагружении  $E_{50}$ , при разгрузке  $E_{ur}$  и одометрический модуль  $E_{oed}$  [44].

При одометрических условиях напряжений и деформаций одометрический модуль находится по формуле (3.24):

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} (\sigma / p^{ref})^m \quad (3.24)$$

где  $E_{oed}^{ref}$  – пластическое деформирование, вызванное первичным сжатием,  $m$  – показатель степени, с помощью которого задается зависимость жесткости от напряжений,  $p^{ref}$  – эталонное давление,  $\sigma$  – действующее в данных условиях напряжение.

Зависящий от всесторонних напряжений модуль жесткости при первичном нагружении, модуль деформаций при трехосном нагружении рассчитывается по формуле (3.25):

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \phi - \sigma_3' \cdot \sin \phi}{c \cdot \cos \phi - p^{ref} \cdot \sin \phi} \right)^m \quad (3.25)$$

где  $E_{50}^{ref}$  – опорный модуль жесткости, соответствующий опорному всестороннему давлению,  $c$  – значение сцепления,  $\phi$  – угол внутреннего трения,  $\sigma_3'$  – наименьшее главное напряжение.

Модуль жесткости для траекторий напряжений при разгрузке и повторном нагружении рассчитывается по формуле (3.26):

$$E_{50} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cdot \cos \phi - \sigma_3' \cdot \sin \phi}{c \cdot \cos \phi + p^{ref} \cdot \sin \phi} \right)^m \quad (3.26)$$

где  $E_{ur}^{ref}$  – опорный модуль деформаций при разгрузке и повторном нагружении, соответствующий опорному давлению. Несмотря на все преимущества данной модели, ее главным недостатком является сложность получения исходных данных. В качестве значений разработчиками данной модели по умолчанию предлагаются соотношения:  $E_{ur} \approx 3E_{50}$ ,  $E_{oed} \approx 3E_{50}$ . [44]. Зависимость между

девиатором напряжений и относительной деформации представлена на Рисунке 3.3.

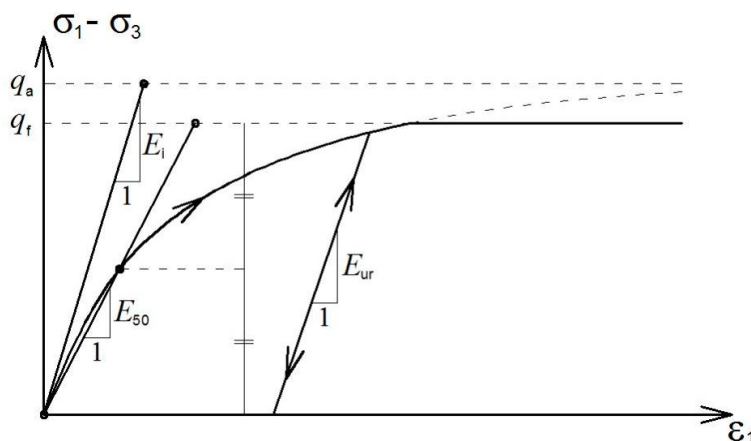


Рисунок 3.3 – Зависимость между девиатором напряжений и относительной деформацией для модели HS

Главной особенностью модели HS является принятая гиперболическая зависимость между вертикальной относительной деформацией  $\sigma_1$  и девиатором напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) при первичном трехосном нагружении. При этом при разгрузке и повторном нагружении эта зависимость принимается линейной [53].

Модель HS может применяться для всех видов дисперсных грунтов, как песчаных, так и глинистых. Особенно эффективна она при расчетах сильно заглубленных сооружений со значительными дополнительными нагрузками, так как позволяет успешно моделировать нелинейность деформаций и остаточные перемещения при разгрузке. Данная модель также отражает переуплотнение грунтов основания посредством коэффициента переуплотнения [53].

### 3.2 Особенности моделирования эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов

В данном исследовании построение и расчет моделей были реализованы в программном комплексе PLAXIS 3D. Это один из самых популярных и адаптированных программных комплексов для геотехнических расчетов, реализующий МКЭ.

В результате проведенных серий расчетов с использованием трех типов моделей, в данном исследовании для моделирования эскалаторных тоннелей, пройденных с помощью замораживания грунтов, в связи с высокой сходимостью результатов моделирования и натурных данных маркшейдерских наблюдений, было принято решение использовать упругопластическую модель с упрочнением грунта (HS) с дренированным типом грунтов в объемной постановке, обделка эскалаторного тоннеля моделируется двумерными элементами.

Геологические слои представлены горизонтальным залеганием литологических разностей, мощность геологических элементов относительно выдержана (Рисунок 3.4).

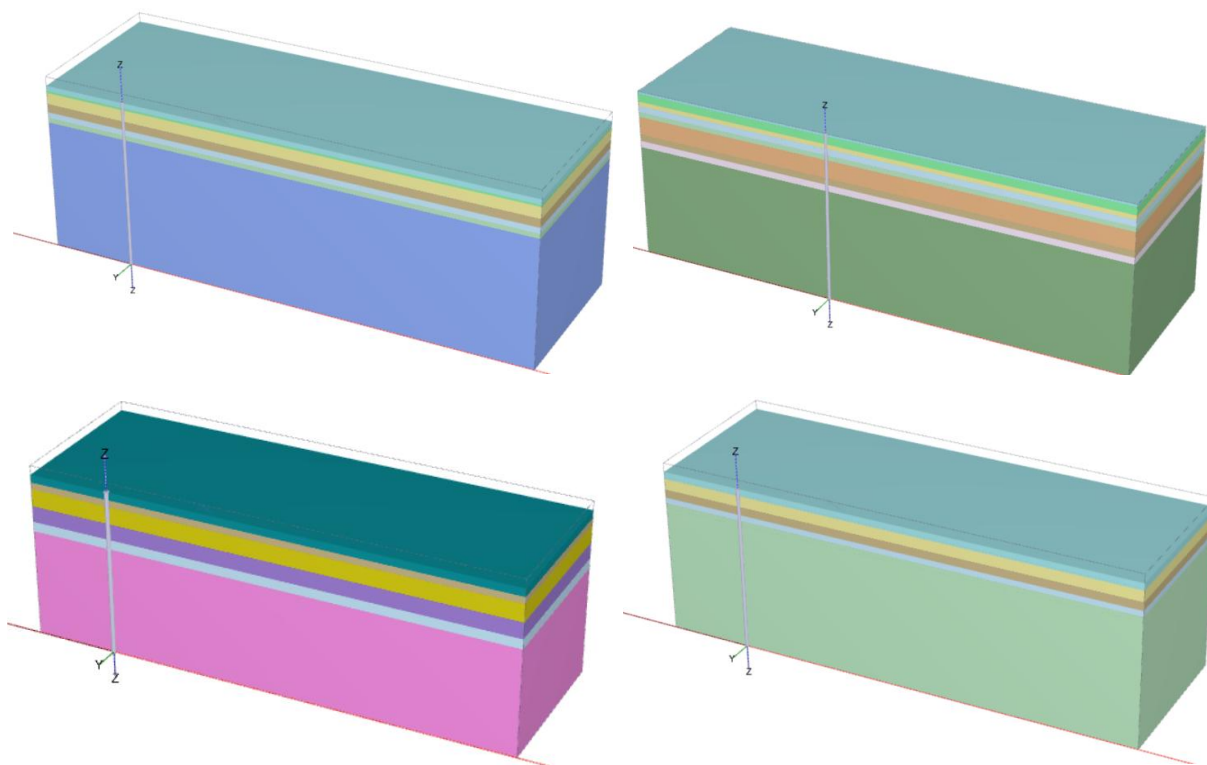


Рисунок 3.4 – Примеры моделей массива с горизонтальным залеганием литологических разностей

При построении массива и задании каждому геологическому слою свои физико-механические характеристики, полученные из инженерно-геологических изысканий, был задан уровень грунтовых вод на отметке 2-2,5 м ниже земной

поверхности, в зависимости от рассматриваемого геологического разреза (Рисунок 3.5).

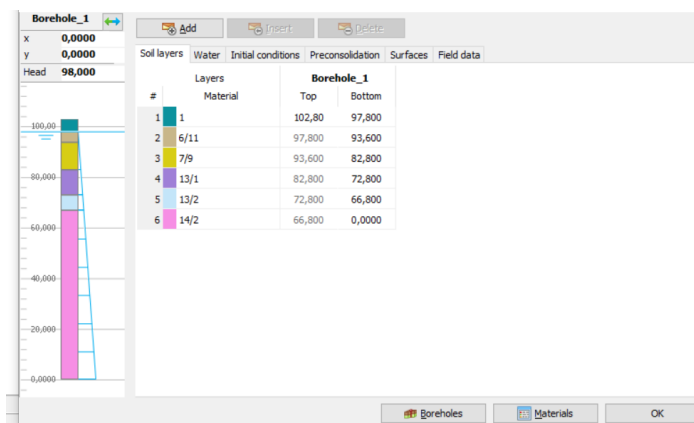


Рисунок 3.5 – Построение массива с заданными физико-механическими свойствами и уровня грунтовых вод

При моделировании эскалаторных тоннелей, основными элементами выступали горные породы с заданными физико-механическими характеристиками, полученные из инженерно-геологических изысканий, область ледопородного ограждения и обделка эскалаторного тоннеля (Рисунок 3.6).

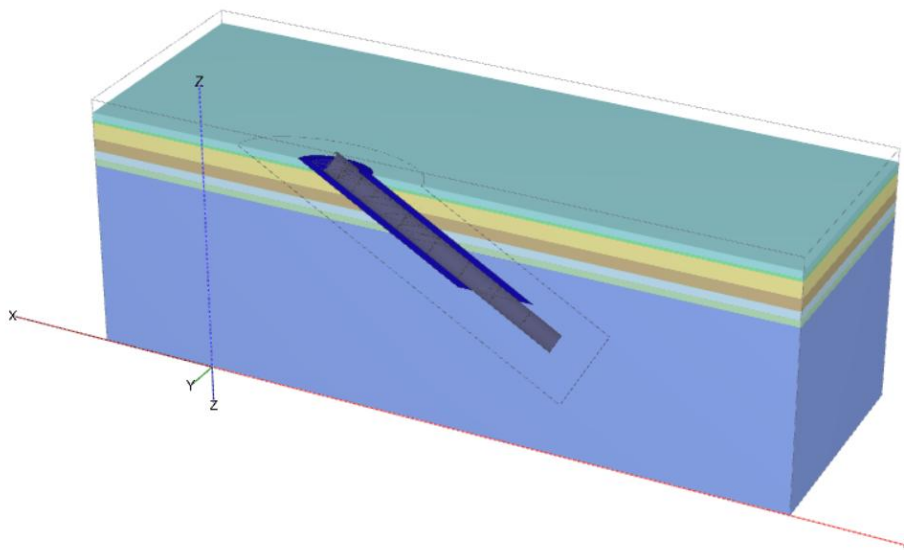


Рисунок 3.6 – Моделирование эскалаторного тоннеля

Исследования на первичных этапах показали, что ввиду симметричности объекта (эскалаторного тоннеля) можно использовать половины моделей, корректность такого подхода была проверена на полных моделях.

Массив, построенный в модели делится на множество отдельных элементов (узлов), а вокруг эскалаторного тоннеля количество элементов сгущается, так как в данной области ожидается концентрация сдвижений и деформаций (Рисунок 3.7).

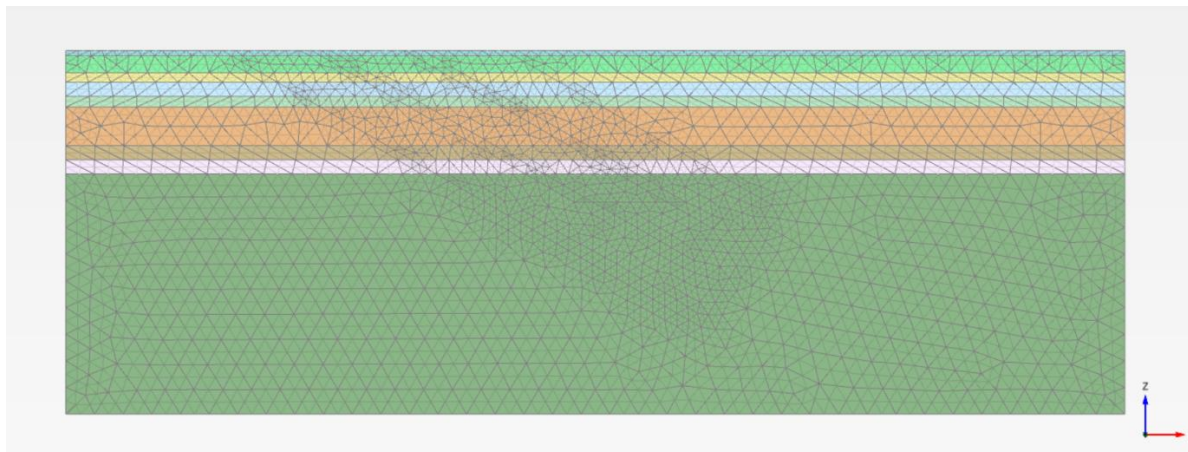


Рисунок 3.7 – Массив, разбитый на множество элементов (узлов)

В данном исследовании для всех эскалаторных тоннелей количество конечных элементов (узлов) составило порядка 100-120 тыс.

Для построения модели эскалаторного тоннеля необходимо учесть группы факторов, которые оказывают существенное влияние на массив: активная и пассивная стадия замораживания, технологические режимы проходки и естественное оттаивание пород.

### **3.3 Моделирование в период активной и пассивной стадии замораживания.**

#### **Факторы, влияющие на развитие сдвижений и деформаций**

Период активной стадии замораживания сопровождается нарастанием ледопородного ограждения вокруг замораживающих скважин. Данный этап характеризуется развитием пучений в массиве и на земной поверхности. Следует отметить факторы, которые были учтены при моделировании активной стадии замораживания:

- Геомеханический – в период нарастания ледопородного ограждения происходит увеличение объема воды, содержащейся в породе, на 9%, вследствие чего происходит первичное переуплотнение близлежащих слоев. Породы,

подверженные замораживаю уплотняются, в них резко возрастает модуль упругости, сцепление и другие физико-механические свойства. Изменение физико-механических свойств пород было учтено при моделировании эскалаторных тоннелей, данные получены из накопленных исследований в этой области;

– Технологический – связанный с глубиной замораживающих скважин и работой холодильных установок. При рассольном замораживании в условиях города Санкт-Петербург, температура хладоносителя составляет  $-21-23^{\circ}\text{C}$ , а глубина замораживания принимается равной  $\approx 2/3$  длины эскалаторного тоннеля. При несоблюдении проектного положения замораживающих скважин, их глубины, а также отклонении от режимов замораживания (увеличении периода активной стадии замораживая, изменении температуры хладоносителя), данный фактор может оказать значительное влияние на массив, земную поверхность и дальнейшее строительство эскалаторного тоннеля.

Итак, начало процесса замораживания водоносных грунтов связано с организацией в породном массиве искусственного теплообмена, при котором вокруг замораживающих скважин формируются зоны отрицательной температуры, где зарождаются и развиваются ледопородные цилиндры, которые имеют неоднородную толщину в каждом слое, а фронт замораживания движется неравномерно (с замедлением) и неоднородно по слоям. Параметры ледопородного цилиндра и его изменений во времени определяются целой группой независимых параметров: температура ( $t$ ), тип пород, их природная влажность ( $W$ ), плотность ( $\rho$ ), теплопроводность и т.д. Формирование ледопородного ограждения в период активной стадии замораживания связано с набуханием породы, образованием прослоек льда и т.п., и в конечном счете с развитием деформаций расширения и пучений в массиве и на земной поверхности.

С технологической точки зрения, основным показателем замораживания массива является толщина ледопородного ограждения. Замораживающие скважины пересекают множество геологических слоев с различными физико-

механическими и теплофизическими характеристиками, которые влияют на скорость нарастания льда. В условиях сложно предсказуемых теплофизических и гидрогеологических процессов на первый план выходит использование средств контроля параметров ограждения (наблюдательные и термометрические скважины, геофизические и др. методы), когда толщина ограждения обеспечивается вариацией режима замораживания опытным путем. Из практических наблюдений установлено, что глинистые водонасыщенные грунты тяжелее всего поддаются замораживанию [30], поэтому период активной стадии замораживания вынужденно принимается за период достижения проектной толщины ледопородного ограждения одного из таких «тяжелых» слоев, в это время в других слоях наблюдается так называемое перемораживание грунтов и фактическая толщина ледогрунтового ограждения превышает проектные значения.

Несмотря на указанную сложность этих процессов в целях предварительной оценки параметров замораживания (температуры и времени замораживания) исследователями предлагаются различные модели развития фронта замораживания и зависимости для толщины ледогрунтового ограждения, в том числе и временные. На практике эти предварительные технологические параметры корректируются по результатам контрольных наблюдений за замораживанием, а показатели модели уточняются для конкретных горно-геологических условий.

Для более точного прогноза поднятий на земной поверхности необходимо знать толщину ледогрунтового ограждения для каждого геологического слоя, который пересекает эскалаторный тоннель. Д.А. Потемкиным предложена зависимость (Формулы 3.27 и 3.28), позволяющая рассчитать толщину ледопородного ограждения [67]:

$$\xi(t) = \frac{A}{\xi(t)} + B$$

$$\xi^2 - B\xi - A = 0 \Rightarrow \xi_{1,2} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4A}}{2} \Rightarrow \quad (3.27)$$

$$A = -\frac{\lambda(T_c - T_{xl})}{\gamma(E_B W_0 + c(T_c - T_3))} t; B = \frac{7,67 \sqrt{\frac{c\lambda}{\gamma}} (T_3 - T_c)}{E_B W_0 + c(T_c - T_3)} \sqrt{t} \quad (3.28)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, кДж/м ч<sup>0</sup>С;  $W_0$  – влажность, %;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/кг<sup>0</sup>С;  $\gamma$  – объемный вес, т/м<sup>3</sup>;  $T_{xl}$  – температура стенки замораживающей колонки, <sup>0</sup>С;  $T_c$  – температура сублимации, <sup>0</sup>С;  $T_3$  – температура замерзания, <sup>0</sup>С;  $E_B$  – скрытая теплота льдообразования, кДж/кг.

Зависимость получена из общего уравнения теплопроводности, она учитывает зону перепада температур при охлаждении до начала формирования ледопородного ограждения, используемые параметры оценены для пород четвертичной толщи в районе Санкт-Петербурга. Данная зависимость позволяет рассчитать толщину ледопородного ограждения в момент времени  $t$  (т.е. потенциально может позволить решать задачи с учётом фактора времени), учитывает реальные теплофизические свойства четвертичных пород.

Данная формула позволяет рассчитать толщину ледопородного ограждения в момент времени  $t$ , учитывая физико-механические и теплофизические свойства массива. На Рисунке 3.8 приведен пример нарастания ледопородного ограждения от времени  $t$  для разных слоев.

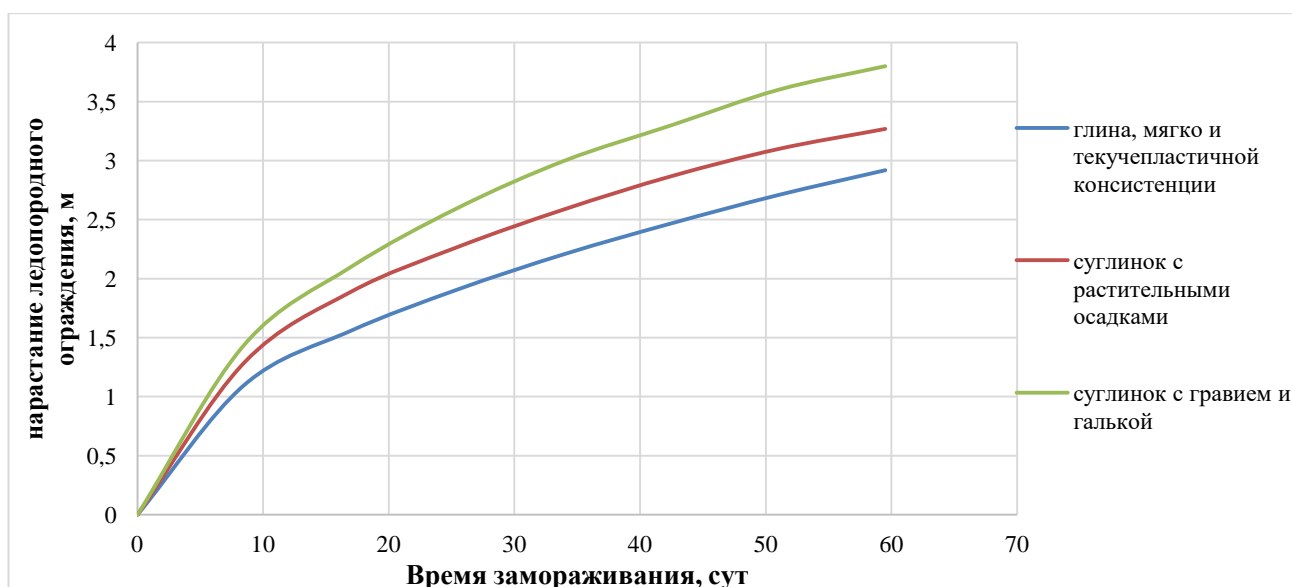


Рисунок 3.8 – Нарастание ледопородного ограждения от времени



Определяющим силовым фактором в расчетной схеме являются нагрузки, связанные с объемным расширением замороженных участков грунта. Поэтому задача его корректного учета по разным слоям здесь первостепенна. Главными параметрами в таком расчете являются геометрические размеры зоны замороженных пород и первичное удельное содержание влаги в породах.

Исходя из этих базовых, по своей физической сути очевидных и не требующих доказательства, постулатов была предпринята попытка подойти к расчету деформаций породного массива на стадиях замораживания только через корректный учёт объемного расширения грунтовых вод при их кристаллизации с учетом дифференцированной оценки геометрических параметров реального ледопородного ограждения. Реализация самой геомеханической задачи объемного расширения может быть основана на использовании численного моделирования (например, методом конечных элементов) в режиме заданных объемных деформаций, позволяющего корректно учесть геометрию стратиграфически неоднородного ледопородного ограждения для эскалаторного тоннеля. При таком упрощенном способе расчет производится на заданный момент времени замораживания, он позволяет учитывать измерение толщины ледопородного ограждения по породным слоям и параметров расширения (оцененной из влажности пород), дополнительную механическую нагрузку на породный массив и динамику его сложного деформирования. Он, не позволяет учесть сложные процессы миграции влаги, связанные с замораживанием или изменением фильтрационных свойств пород, неоднородность температурных полей и динамики её изменения (особенно после начала проходки тоннеля) и других факторов и процессов сопровождающих эту технологию, однако уровень их влияния на рассматриваемые деформационные процессы по нашим оценкам весьма невелик. Последнее утверждение требует обоснования или эмпирического подтверждения, которому в данной работе уделено отдельное внимание.

Первичный анализ показал, что именно эти параметры во многом и определяют динамику развития деформационных процессов в породном массиве, поэтому здесь мы сосредоточимся на правильном их учете в расчетной схеме.

Для учёта удельных показателей содержания воды можно воспользоваться данными стандартных испытаний пород при изысканиях. Здесь основной параметр – это относительная влажность по массе, поэтому его необходимо привести к объемным показателям. Для учёта геометрических размеров зон замороженных пород сложной формы можно воспользоваться формулами аналитической геометрии.

Ледопородное ограждение для разных геологических слоев нарастает с разной скоростью, поэтому в слоистом неоднородном массиве с различными физико-механическими свойствами толщину нарастающего ограждения необходимо рассчитывать для каждого слоя отдельно по секторам сложной геометрической формы (Рисунок 3.9 и 3.10).

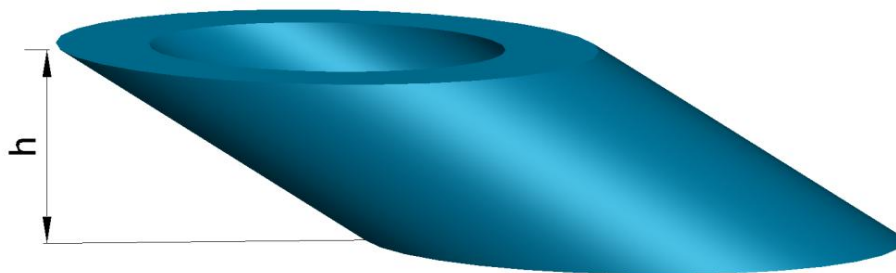


Рисунок 3.9 – Объем сектора ледопородного цилиндра мощностью  $h$

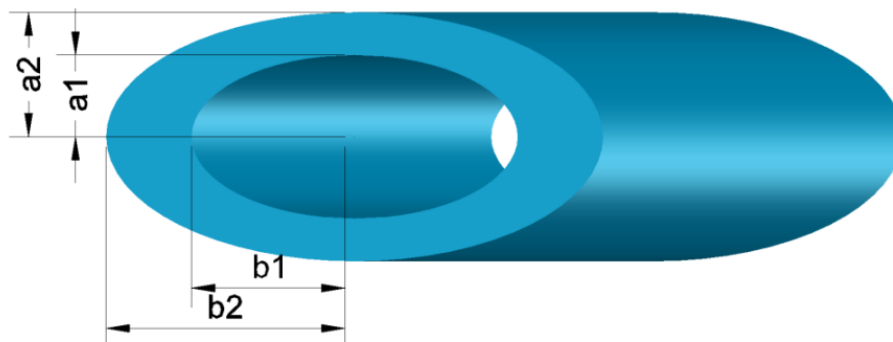


Рисунок 3.10 – Объем сектора ледопородного цилиндра мощностью  $h$  (вид в плане)

Объем замороженной породы для каждого геологического слоя рассчитывается по формуле (3.29):

$$V = \pi a_2 b_2 h - \pi a_1 b_1 h \quad (3.29)$$

где  $h$  – мощность толщи геологического слоя, м;

$a_2$  – внешний радиус ледопородного ограждения, м;

$a_1$  – внутренний радиус ледопородного ограждения, м;

$a_2 - a_1$  – проектная толщина ледопородного ограждения, м;

$b_2 - b_1$  – проекция толщины ледопородного ограждения с учетом наклона, м.

Так как проходка эскалаторного тоннеля ведется под углом в  $30^\circ$  то расстояние  $b$  можно выразить по формуле (3.30):

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 \sin 30^\circ = \frac{b_1}{2} \Rightarrow 2a_1 = b_1 \\ a_2 &= b_2 \sin 30^\circ = \frac{b_2}{2} \Rightarrow 2a_2 = b_2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Подставив выражение (3.30) в формулу (3.29) получим выражение (3.31):

$$V = \pi a_2 b_2 h - \pi a_1 b_1 h = \pi a_2 2a_2 h - \pi a_1 2a_1 h = 2\pi h (a_2^2 - a_1^2) \quad (3.31)$$

Таким образом получаем формулу для расчета объема замороженной толщи проектной толщины ледопородного ограждения для каждого геологического слоя мощностью  $h$ .

Как было сказано выше, нарастание ледопородного ограждения вдоль замораживающей колонки распределяется неравномерно по всей длине. Для моделирования геомеханических процессов необходимо для каждого геологического слоя рассчитать толщину ледопородного ограждения  $\xi_{расч}$  по формуле (3.28).

Однако, специфика модельных расчетов (когда размеры зон замораживания по литологическим разностям технически сложно дифференцировать и задать в модели) не позволяет просто вводить в расчет индивидуальные параметры по породам – обычно приходится обходиться однородной (на всю длину тоннеля) толщиной ледопородного ограждения. Для упрощения таких модельных расчётов в качестве такой условной однородной толщины логичнее принимать проектную толщину. Поэтому для корректной оценки в расчетах необходимо дополнительно аналитически учитывать несоответствие проектного объема ледопородного ограждения фактическому (например, оцененному по методу Д.А. Потёмкина).

Такой учёт возможен через расчёт показателя, учитывающего разницу этих объемов для каждого выделенного в модели слоя пород.

Другим, важным для наших геомеханических расчётов, параметром ледопородного ограждения является несимметричность развития ледопородных цилиндров вокруг скважин из-за неоднородности теплофизических параметров по внутреннему и внешнему контуру ограждения. Из практических наблюдений за развитием ледопородных ограждений, при строительстве эскалаторных тоннелей, в среднем, на внутреннюю часть приходится 60% от общей толщины и 40% на внешнюю часть (Рисунок 3.11).

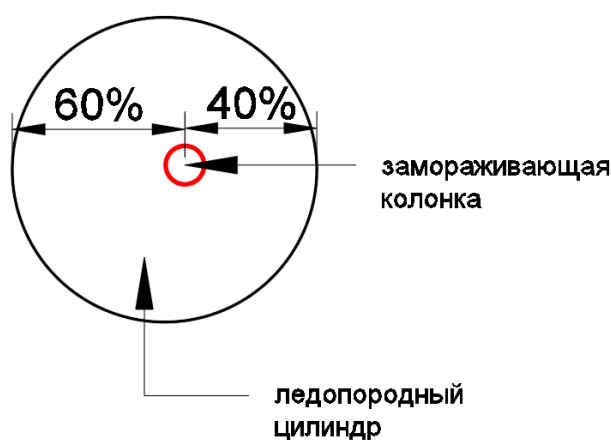


Рисунок 3.11 – Нарастание ледопородного ограждения вокруг замораживающей колонки

Для учёта указанной асимметрии и перехода на фактическую толщину ограждения, введем обозначение  $r$  – радиус, на котором расположены замораживающие скважины, и таким образом получим выражение (3.32):

$$\begin{aligned} a_1' &= r - 0,6\xi_{расч} \\ a_2' &= r + 0,4\xi_{расч} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Полученные выражения (3.32) подставляем в формулу (3.29) получим объем замороженной толщи, рассчитанный по формуле (3.33) для каждого геологического слоя мощностью  $h$ :

$$\begin{aligned} V' &= 2\pi h(a_2'^2 - a_1'^2) = 2\pi h((r + 0,4\xi_{расч})^2 - (r - 0,6\xi_{расч})^2) = \\ &= 2\pi h(r^2 + 0,8r\xi_{расч} + 0,16\xi_{расч}^2 - r^2 + 0,12r\xi_{расч} - 0,36\xi_{расч}^2) = \\ &= 2\pi h(2r\xi_{расч} - 0,2\xi_{расч}^2) = 4\pi h\xi_{расч}(r - 0,1\xi_{расч}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

где  $\xi_{расч}$  – толщина ледопородного ограждения, рассчитанная по формуле (3.29) для каждого геологического слоя мощностью  $h$ .

Теперь оценим параметры расширения горных исходя из известного параметра для кристаллизующейся воды, увеличивающейся на 9%. Традиционно в практике изысканий основной параметр, характеризующий содержание воды в породах, это удельная влажность пород, т.е. отношении массы воды к массе породы (Формула 3.34):

$$W = \frac{m_B}{m_{II}} \Rightarrow m_{II} = \frac{m_B}{W} \quad (3.34)$$

Общую массу замороженной породы можно выразить как сумму массы воды и массы породы или как произведение объема замороженной толщи на плотность породы (Формула 3.35):

$$m = m_B + m_{II} = V' \rho \quad (3.35)$$

Подставляя выражение (3.30) в (3.21), получим формулу для расчета массы воды в замороженном массиве (Формула 3.36):

$$m_B + m_{II} = V' \rho \Rightarrow m_B + \frac{m_B}{W} = V' \rho \Rightarrow m_B \left(1 + \frac{1}{W}\right) = V' \rho \Rightarrow m_B \left(\frac{W+1}{W}\right) = V' \rho \Rightarrow$$

$$m_B = \frac{V' \rho W}{W+1} \quad (3.36)$$

Зная массу воды, можем найти объем воды в замороженной толще (Формула 3.37):

$$V_B = \frac{m_B}{\rho_B} = \frac{V' \rho W}{\rho_B (W+1)} \quad (3.37)$$

где  $\rho_B$  – плотность воды (1000кг/м<sup>3</sup>).

Объем замороженной толщи с учетом увеличения (пучения) воды, содержащейся в породе на 9%, находим из выражения (3.38):

$$V_{пуч} = V' + 0,09V_B \quad (3.38)$$

Относительное изменение рассматриваемого объема или заданный показатель объемной деформации (для модельных расчётов) будет определяться следующими выражениями (3.39) или (3.40):

$$\varepsilon_{vol} = \frac{0,09V_g}{V} \quad (3.39)$$

Или,

$$\varepsilon_{vol} = \frac{0,09V' \rho W}{\rho_e (W+1)V} = \frac{0,36 \rho W \pi h \xi_{pac} (r - 0,1 \xi_{pac})}{\rho_e (W+1)} \quad (3.40)$$

Оценка этого показателя для наиболее востребованных типов пород показала следующие его уровни: для четвертичных отложений данный параметр варьируется в пределах 4-5%, для протерозойских пород 2-3%. Указанный показатель вводился последовательно по фазам — прирост составлял  $\Delta\varepsilon_{vol} = 0,5-1\%$  (одномоментный ввод таких больших деформаций за одну стадию не всегда приводил к корректным результатам).

В качестве основного тестового объекта выступал эскалаторный тоннель станции метро «Казаковская», на котором получена внушительная серия натуральных данных по пучениям на поверхности над тоннелем.

При моделировании эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская», для каждого геологического стоя (Таблица 3.1) была рассчитана толщина ледопородного ограждения и показатель объемной деформации (Таблица 3.2). Проектная толщина ледопородного ограждения для эскалаторного тоннеля составляет 2,75 м, радиус, на котором расположены замораживающие колонки, равен 7,15 м.

Таблица 3.1 – Нормативные характеристики свойств грунтов в районе строительства эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская»

Слой ИГЭ	Тип грунта	Мощность, м	Плотность, кН/м <sup>3</sup>	Коэф-т деформации, кПа	Коэф-т Пуассона
1нс	Насыпные грунты	3,3	17,5	8 000	0,33
3	Грунты	1,1	13,2	2 000	0,42
5/8	Супеси	0,3	18,6	5500	0,37
7/9	Суглинки	7	20,4	9000	0,35
7/9*	Суглинки	5,2	20,8	12 000	0,35
7/13	Суглинки	3,6	21,3	20 000	0,32
14/1	Глина	2,9	21,3	100 000	0,35
14/2	Глина	-	22,3	200 000	0,35

Таблица 3.2 – Параметры, полученные для моделирования эскалаторного тоннеля «Казаковская»

Слой ИГЭ	Влажность (W),%	Расчетная толщина ледопородного ограждения $\xi_{расч}$ , м (активная стадия)	Показатель объемной деформации $\epsilon_{vol}$ , % (активная стадия)
1	22	3,62	4,0
3	22	3,68	3,7
5/8	36	3,21	4,9
7/9	25	2,99	4,3
7/9*	22	3,21	4,0
7/13	21	3,27	4,0
14/1	17	2,75	2,3
14/2	14	2,74	2,0

В соответствии с предложенной упрощенной методикой находился показатель объемной деформации по формуле (3.36) для каждого геологического слоя, для реализации режима заданной деформации для каждого слоя встроенными средствами программного комплекса Plaxis 3D (Рисунок 3.12).

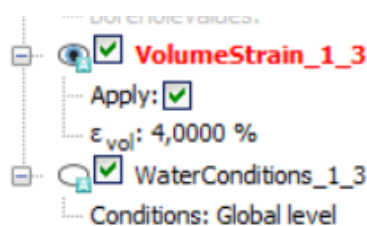


Рисунок 3.12 – Задание показателя объемной деформации для *i*-го слоя в программном комплексе PLAXIS 3D

При достижении проектной толщины ледопородного ограждения во всех геологических слоях, начинается проходка эскалаторного тоннеля. Период пассивной стадии замораживания длится до достижения оси эскалаторного тоннеля более устойчивых пород.

К группе факторов, влияющих на развитие сдвижений и деформаций в массиве и на земной поверхности следует добавить еще несколько параметров, которые учитываются при моделировании пассивной стадии замораживания:

- Внешний и внутренний диаметр обделки эскалаторного тоннеля;
- Материал обделки эскалаторного тоннеля;

- Первичное и вторичное нагнетание за обделку эскалаторного тоннеля;
- Скорость проходки.

В период пассивной стадии замораживания ледопородное ограждение продолжает нарастать из-за миграции влаги к фронту промерзания. Период пассивной стадии зависит от скорости проходки эскалаторного тоннеля, холодильные установки отключаются при достижении забоя эскалаторного тоннеля более устойчивых пород. Как показывают данные натурных маркшейдерских наблюдений, скорость нарастания пучений на земной поверхности в период пассивной стадии замораживания в 3 раза меньше, чем в период активной стадии замораживания, то можно выразить показатель объемной деформации для каждого геологического слоя по формуле (3.41):

$$\varepsilon_{vol}' = \frac{\varepsilon_{vol}}{3t} t_{nacc} \quad (3.41)$$

где  $\varepsilon_{vol}'$  – показатель объемной деформации в период пассивной стадии замораживания;  $\varepsilon_{vol}$  – показатель объемной деформации в период активной стадии замораживания;  $t$  – период активной стадии замораживания, сут;  $t_{nacc}$  – период пассивной стадии замораживания, сут.

Рассчитанный показатель объемной деформации в период пассивной стадии замораживания для эскалаторного тоннеля «Казаковская» приведен в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Показатель объемной деформации для периода активной стадии замораживания для эскалаторного тоннеля «Казаковская»

Слой ИГЭ	Показатель объемной деформации $\varepsilon_{vol}$ , % (пассивная стадия)
1	8,5
3	7,8
5/8	10,3
7/9	9,1
7/9*	8,4
7/13	8,4
14/1	4,8
14/2	4,2



Обделка эскалаторного тоннеля состоит из нескольких элементов чугунной обделки. Для упрощения моделирования чугунные тубинги задавались двумерными элементами эквивалентные реальной толщине тубинга, в программном комплексе Plaxis 3D обделка задавалась двумерным элементом. Параметры элементов, задаваемые в программе, представлены в Таблице 3.4,

Таблица 3.4. – Параметры элемента, моделирующего чугунную обделку эскалаторного тоннеля

Параметр	Обозначение	Ед. изм.
Толщина	0,35	м
Удельный вес, чугун	70	кН/м <sup>3</sup>
Модуль деформации	$23 \cdot 10^6$	кН/м <sup>2</sup>
Модуль сдвига	$10 \cdot 10^6$	кН/м <sup>2</sup>

Моделирование пассивной стадии замораживания осуществлялось несколькими фазами (поэтапная выемка породы и установкой обделки до достижения оси эскалаторного тоннеля более устойчивых пород на Рисунке 3.13).

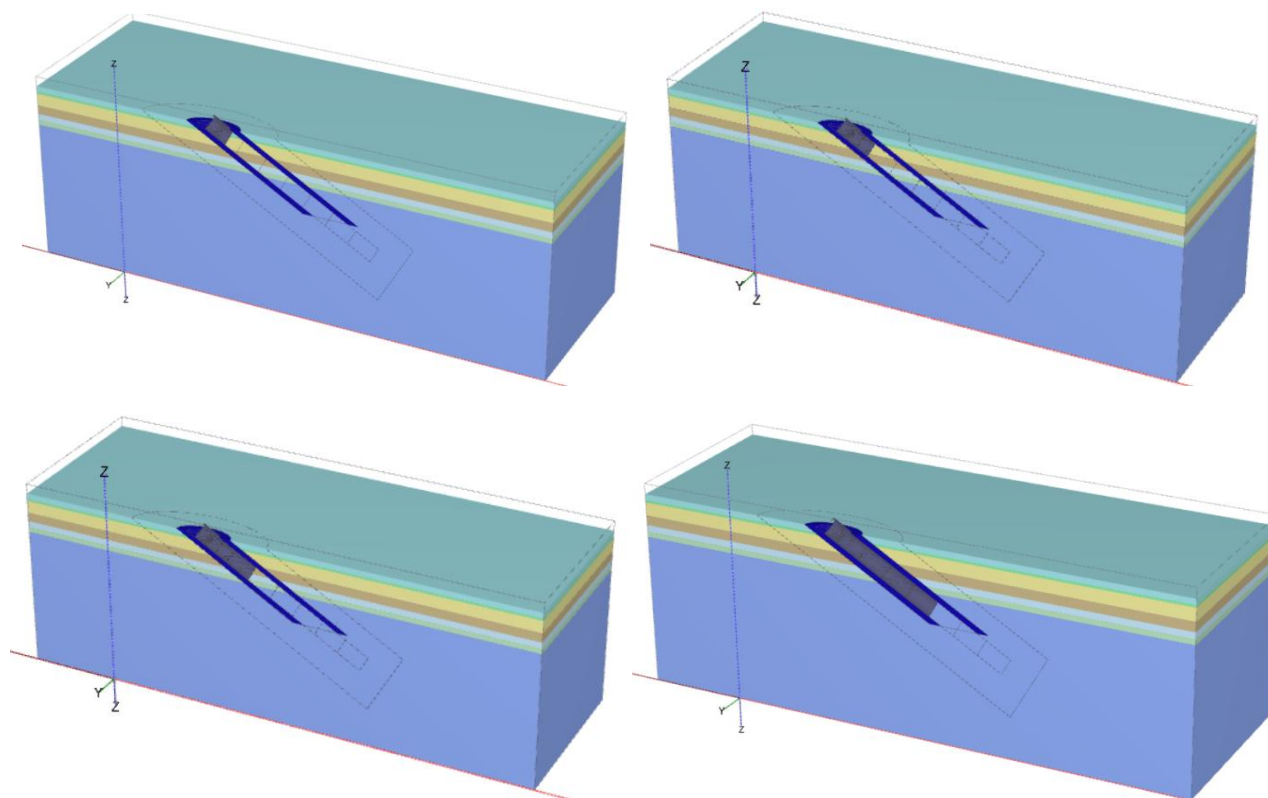


Рисунок 3.13 – Моделирование поэтапной выемки породы и монтажа обделки эскалаторного тоннеля

По данной упрощенной методике было произведено моделирование для всех эскалаторных тоннелей, рассмотренных в данном исследовании («Сенная», «Садовая», «Международная» и «Прспект Славы II») и произведен анализ развития сдвижений и деформаций в период нарастания ледопородного ограждения.

### 3.4 Распределение сдвижений и деформаций в массиве в период активной и пассивной стадии замораживания

Моделирование на стадиях замораживания показало интенсивное развитие деформаций и сдвижений пород в четвертичной толще от лотковой части тоннеля и до земной поверхности по всей налегающей толще. Максимальные вертикальные сдвижения — пучения (желтая зона на Рисунке 3.14) приурочены к водонасыщенным слоям с наиболее низкими деформационными характеристиками, что объясняется не столько этими свойствами, сколько задаваемыми в модели деформациями (т.к. толщина ледопородного ограждения здесь наибольшая).

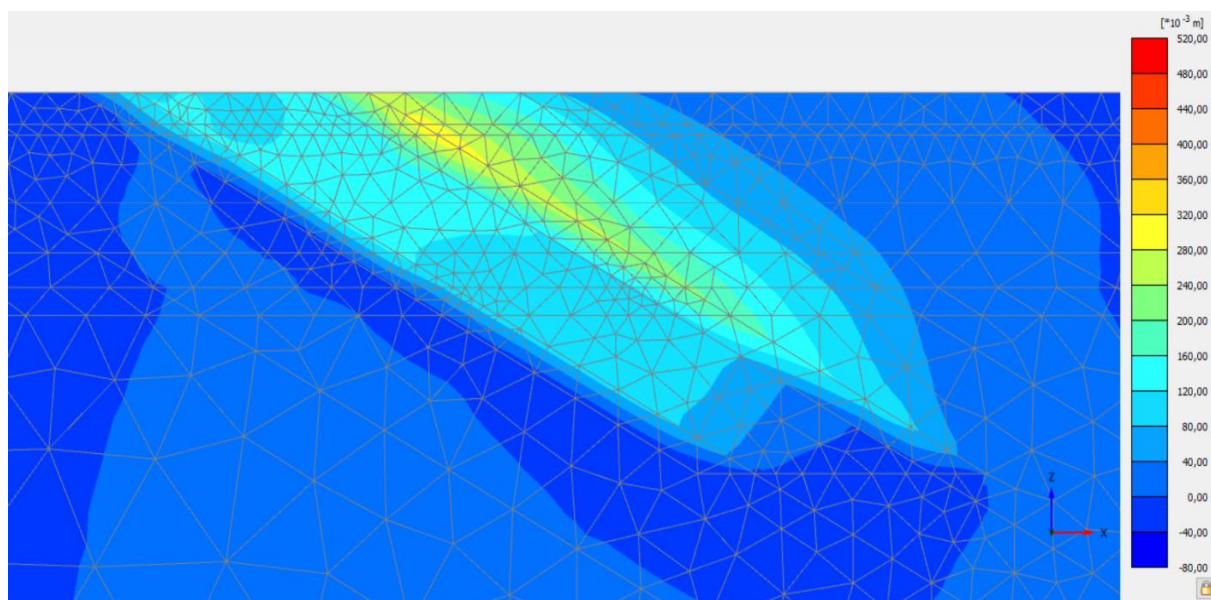


Рисунок 3.14 –Распределение вертикальных сдвижений в период активной стадии замораживания ст. метро «Казаковская»

Для второй стадии строительства моделируется проходка тоннеля (разработка породы и установка крепления). Поддержание отрицательной

температуры осуществляется до достижения забоя более устойчивых пород. Период пассивной стадии замораживания служит для поддержания массива вокруг выработки в замороженном состоянии, однако, за счет миграции влаги к фронту промерзания ледопородное ограждение продолжает нарастать, но с меньшей скоростью по сравнению с активной стадией замораживания, пучения на земной поверхности и в массиве продолжают развиваться вплоть до отключения холодильных установок. Суммарные деформации, накопленные в период активной и пассивной стадии замораживания, могут оказать существенное влияние на подрабатываемые здания и сооружения, поэтому необходимо более детально рассмотреть процессы, происходящие в массиве (Рисунок 3.15).

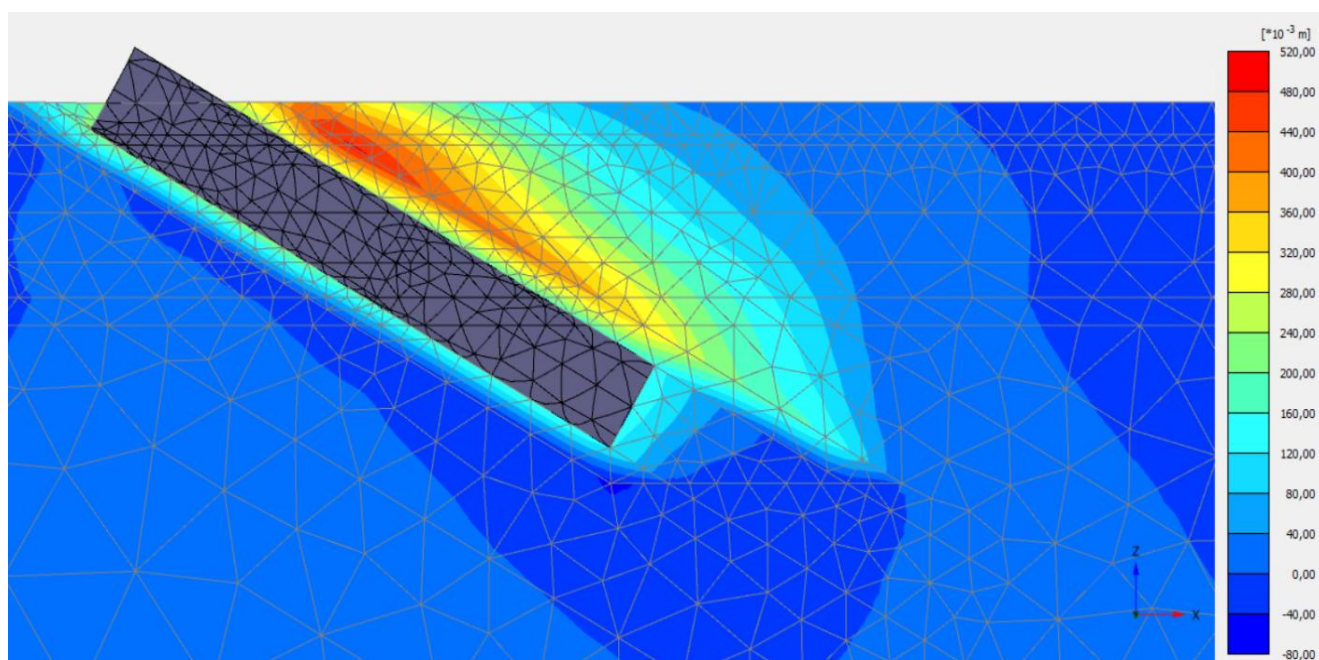


Рисунок 3.15 – Распределение вертикальных сдвижений в период пассивной стадии замораживания ст. метро «Казаковская»

Исследования закономерностей распределения пучений показали, что максимальные значения концентрируются над сводовой частью тоннеля, приводя к пучениям на земной поверхности.

Максимальные значения пучений сконцентрированы в слабом, обводненном слое и достигают порядка 200-300 мм в период активной и 450-500 мм в период пассивной стадии замораживания, имея затухающий характер при достижении земной поверхности (Рисунок 3.16).

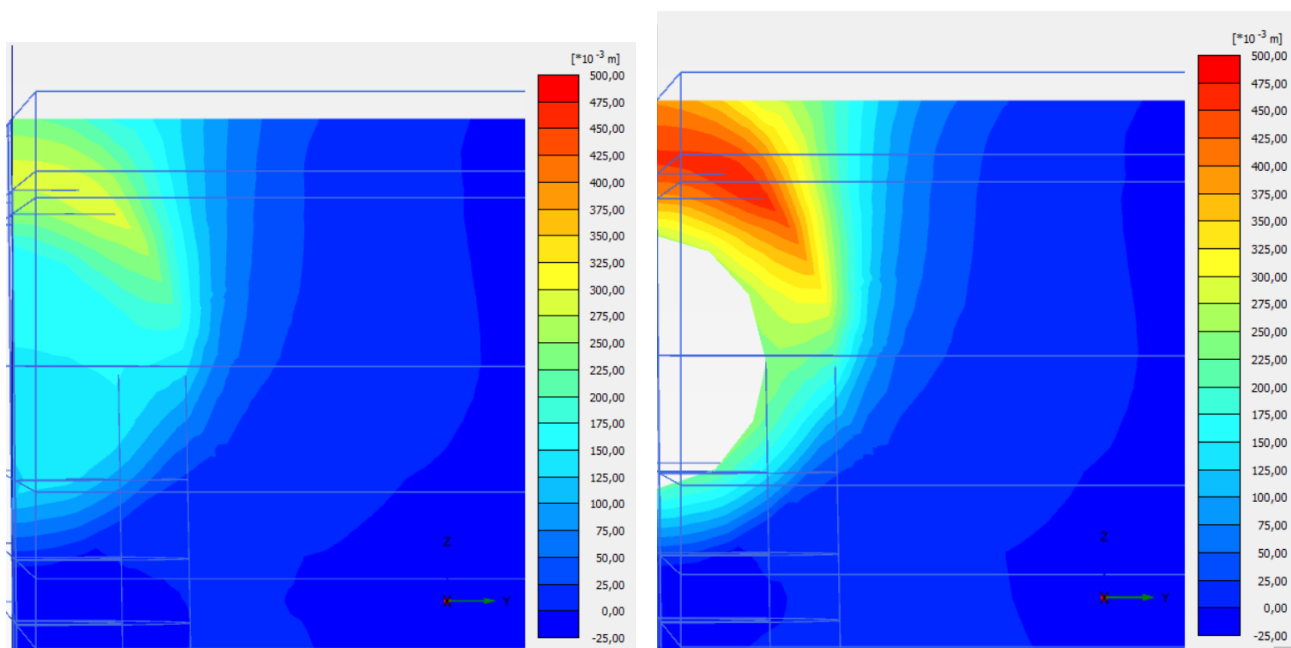


Рисунок 3.16 – Распределение полных сдвижений (поперечное сечение через точку максимального оседания) в период активной (слева) и пассивной (справа) стадии замораживания для эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская»

В каждом рассматриваемом геологическом разрезе наблюдался слой (супесь пылеватая с прослойками песка, суглинками и примесью органических веществ), в котором влажность составила в пределах 36-42%, значение рассчитанной толщины ледопородного ограждения составляло больше проектного на 30-35%, в таком слое над сводовой частью значения пучений достигали в период активной стадии замораживания порядка 200-300 мм, а в период пассивной стадии составили 450-600 мм.

Средняя влажность четвертичных отложений варьируется в пределах 20-25%, здесь рассчитанная толщина ледопородного ограждения не превышала 30% от проектного, в таких слоях показатель объемной деформации составлял 3,5-4,5% и пучения не превышали 350 мм. В протерозойских глинах, влажность составляет 14-17%, здесь толщина ледопородного ограждения оказалась практически равной проектной, заданный показатель объемной деформации в пределах 2-2,5%, значения пучений составляют в пределах 100-150 мм, не достигая земной поверхности.

При переключении с активной стадии замораживания в пассивную сразу же осуществляется проходка эскалаторных тоннелей. Однако, при строительстве эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская», по техническим причинам, проходка и установка первых временных колец осуществилась примерно через шесть месяцев после переключения холодильных установок в пассивный режим и строительство эскалаторного тоннеля до достижения более устойчивых пород длилось пять месяцев, поэтому за такой долгий период поддержания массива в замороженном состоянии значения пучений в этот период, по нашим оценкам, могли вырасти еще на 40-50% (в зависимости от рассматриваемого сечения).

Всестороннее расширение обеспечивает распространение фронта деформаций в массив. В нижней и боковой части деформации быстро затухают ввиду удерживающего воздействия в массиве, над тоннелем эти деформации развиваются иначе: затухание выдержано не столь явно распространение сдвижений более выражено в вертикальной плоскости ввиду отсутствия сдерживающего воздействия со стороны поверхности (Рисунок 3.17 и 3.18).

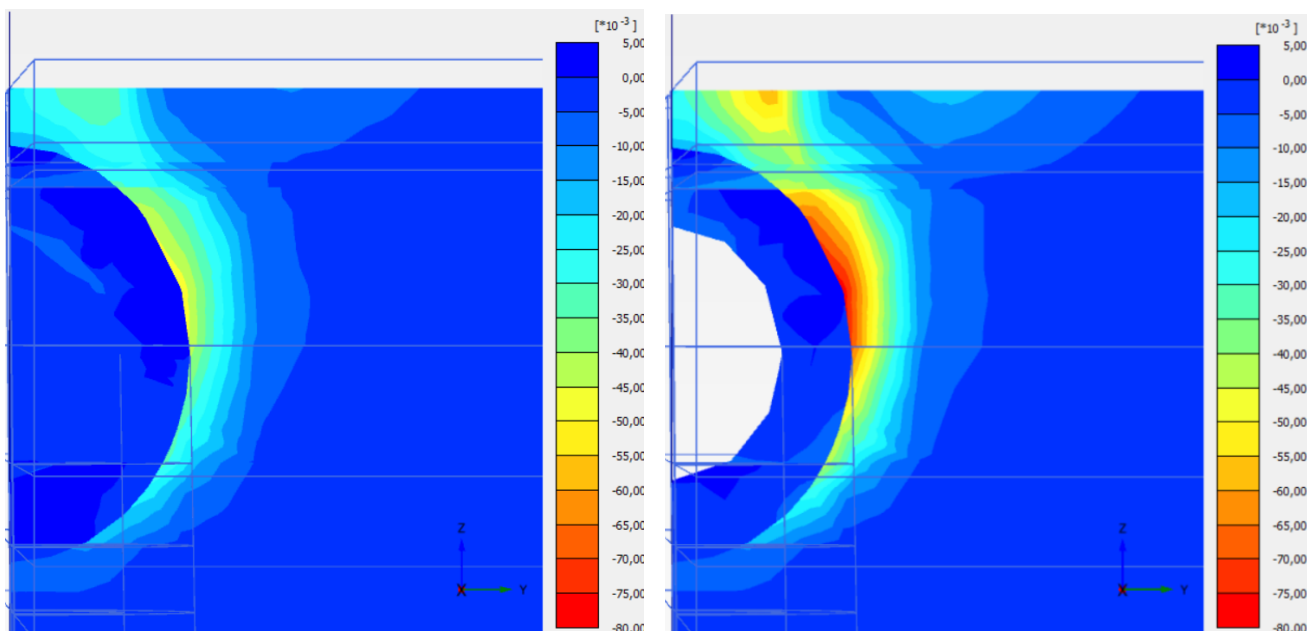


Рисунок 3.17 – Распределение максимальных деформаций (поперечное сечение через точку максимального оседания) в период активной (слева) и пассивной (справа) стадии замораживания

Локальные концентрации максимальных деформаций в основном прослеживаются на контактах литологических разностей в районе чуть выше горизонтального диаметра. Эта зона непосредственно прилегает к зоне заданных деформаций. В реальности толщина ледопородного ограждения больше, чем построено в моделях, а расширение меньше, поэтому распределение деформаций более плавное, отсутствует сгусток деформаций, полученный на моделях. Однако, интегральный эффект в отдалении соответствует действительности, который может быть проверен натурными данными.

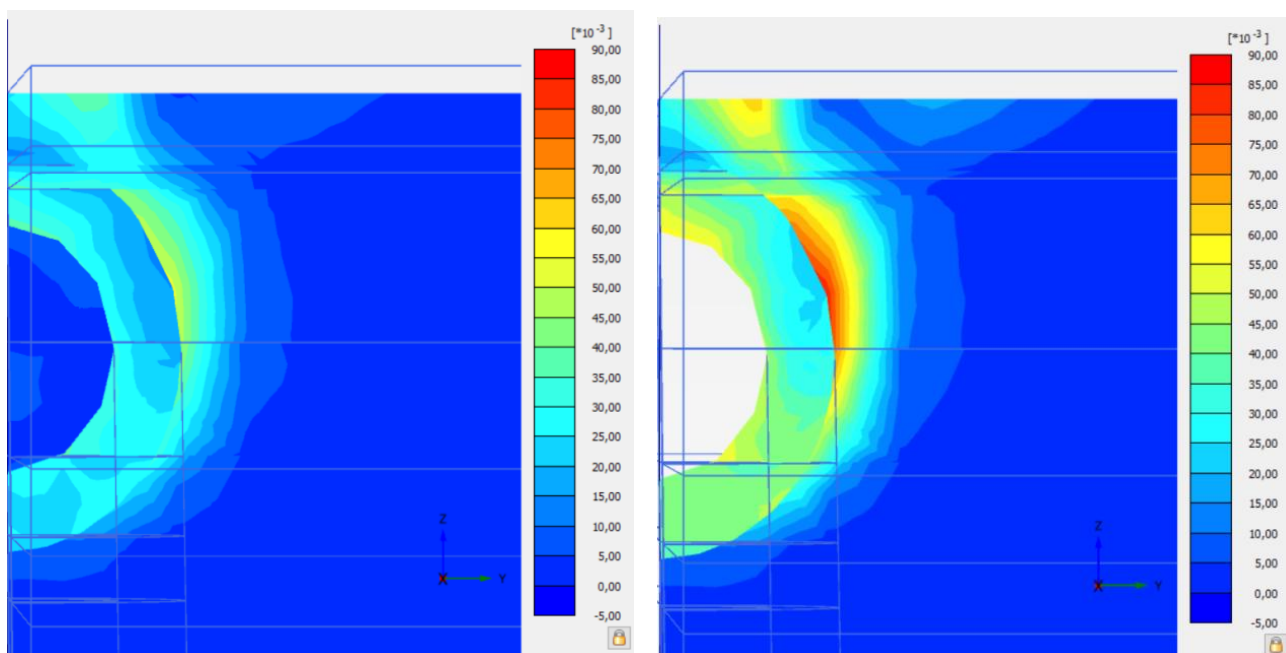


Рисунок 3.18 – Распределение деформаций сдвига (поперечное сечение через точку максимального оседания) в период активной (слева) и пассивной (справа) стадии замораживания

Неравномерное распределение сдвижений в массиве определяется концентрациями деформаций в ледопородном ограждении (зоны объемного и линейного расширения), так и в зонах непосредственно к ним прилегающих. Из этих зон наибольший интерес представляет зона треугольника над тоннелем. Она характеризуется протяженной зоной максимальных сдвижений над сводом выработки (локализована примерно в 2-3 метрах над тоннелем в верхней четверти по его длине), здесь сдвижения могут достигать 400-500 мм в период пассивной стадии замораживания. С удалением от этой зоны они имеют затухающий

характер, к поверхности сдвижения значительно (в 1,5-2 раза) снижаются, и не превышают 200-250 мм. Зоны заморозки и прилегающие к ней зоны с глубиной, ближе к концу замораживающих скважин (т.е. достижении протерозойских глин, характеризующихся высокими значениями деформационных параметров) они уже не превышают 100-150 мм и быстро затухают по налегающей толще к поверхности. Такие распределения сдвижений (с максимумами внутри массива над тоннелем) объясняется развитием больших значений остаточных (пластических) деформаций сжатия в наиболее слабых породах четвертичной толщи от действия мощного давления пучения замораживаемых пород.

Распределение остаточных пластических деформаций сжатия напрямую связаны с традиционно рассматриваемой в механике грунтов процессами консолидации. При рассмотрении продольного сечения практически на всех моделях помимо остаточного сжатия непосредственно вокруг ледопородного ограждения проявляются и зоны сжатия в подработанной толще (треугольной в профиле над тоннелем) на удалении от выработки и концентрируются на пересечении литологических разностей (Рисунок 3.19).

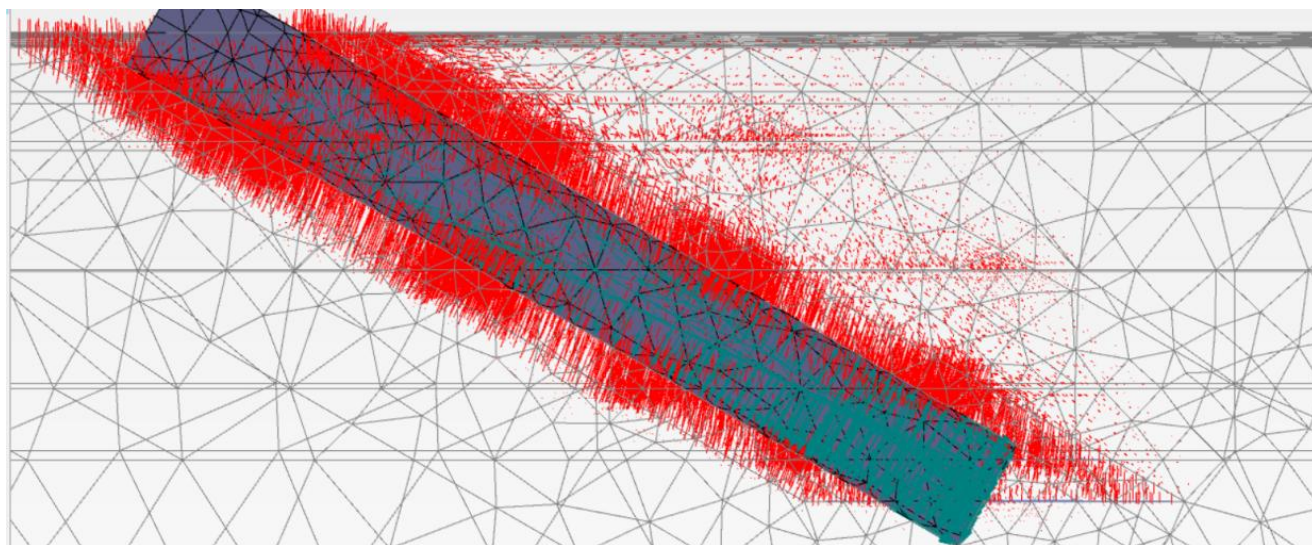


Рисунок 3.19 – Распределение уплотнений вокруг ледопородного ограждения и на контактах литологических разностей

Проявление такого эффекта далее в исследовании будет рассматриваться как дополнительный источник проявления оседаний в период естественного оттаивания.

### 3.5 Влияние пассивной стадии замораживания на деформации обделки эскалаторного тоннеля

Замораживаемые породы, в период пассивной стадии замораживания и сооружения эскалаторного тоннеля оказывают влияние на смонтированную обделку вплоть до отключения холодильных установок. В зонах пересечения забоя выработки и геологического слоя четвертичных отложений по результатам моделирования, свод может подниматься до 140 мм (Рисунок 3.20).

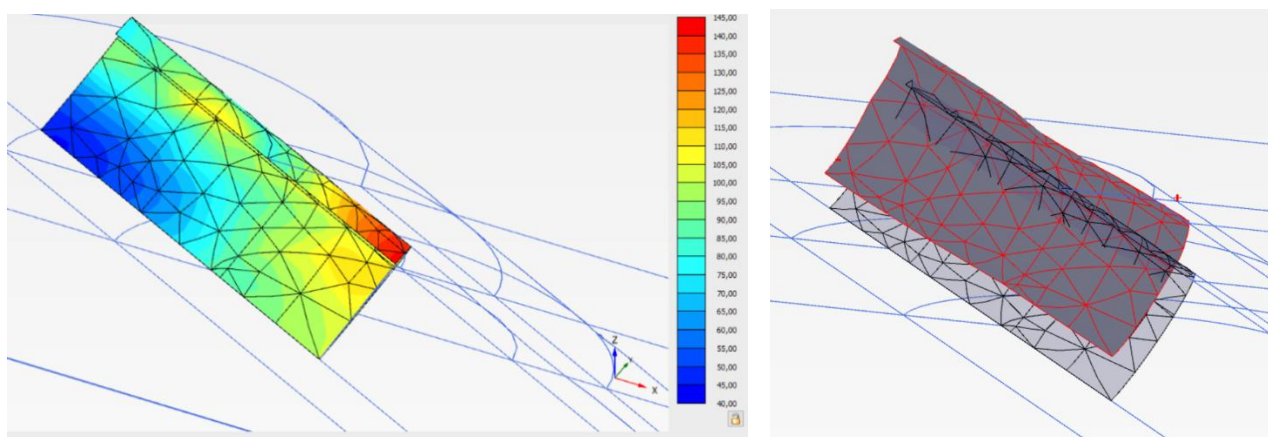


Рисунок 3.20 – Вертикальные сдвигения временной обделки (всего 18 колец) и первых 10-ти колец постоянной обделки эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская»

Интенсификация вертикальных сдвижений — пучений определяется не только нарастанием ледопородного ограждения, но и эффектом всплытия сооружаемой конструкции (вес породы в 5-6 раз превышает вес чугунных тубинговых колец — основной весовой нагрузки). При моделировании эскалаторных тоннелей в период пассивной стадии замораживания без эффекта нарастания ледопородного ограждения, поднятие свода составило порядка 70-80мм (Рисунок 3.21).



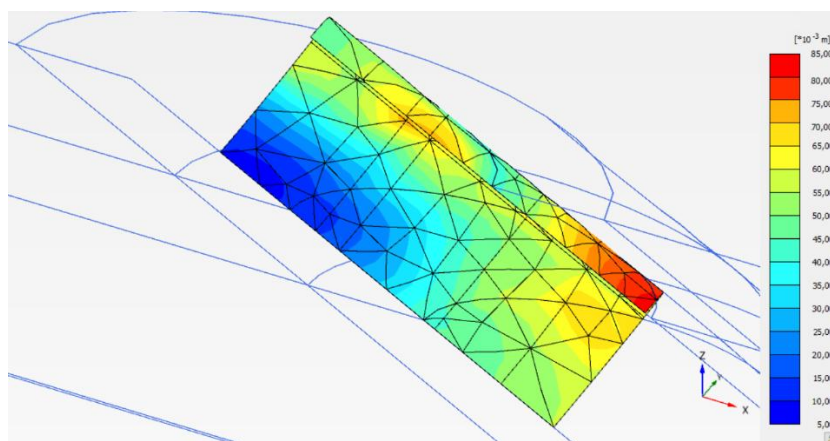


Рисунок 3.21 – Вертикальные сдвигения временной обделки Вертикальные сдвигения временной обделки (всего 18 колец) и первых 10-ти колец постоянной обделки эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская» без эффектов замораживания

С углублением по выработке поднятие сводовой части эскалаторного тоннеля уменьшаются и составляют всего лишь порядка 30-40 мм, так как давление с увеличением глубины выработки выше и породы вокруг эскалаторного тоннеля более плотные (Рисунок 3.22).

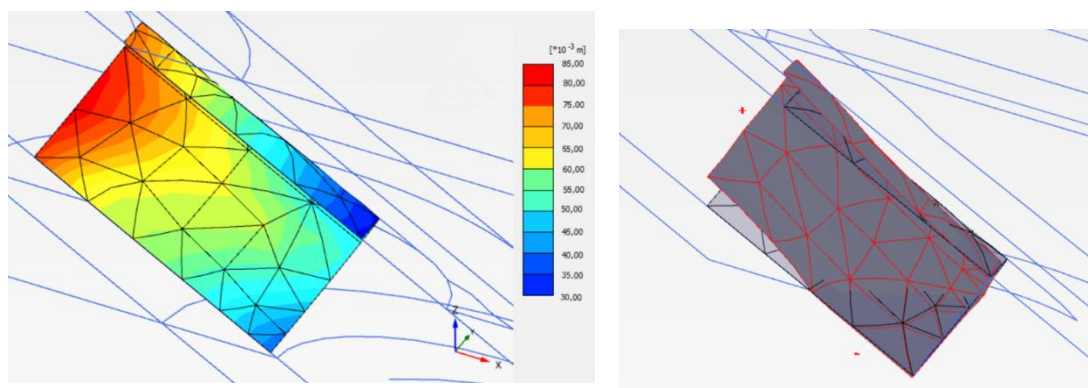


Рисунок 3.22 – Вертикальные сдвигения обделки эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская» при достижении более устойчивых пород (кольца №71-90)

При достижении забоя выработки протерозойских глин, смонтированная обделка практически сохраняет свое первоначальное положение (Рисунок 3.23). Кольца, пройденные в протерозойских глинах, практически полностью сохраняют свое положение, что подтверждается данными натуральных маркшейдерских наблюдений (Глава 2).

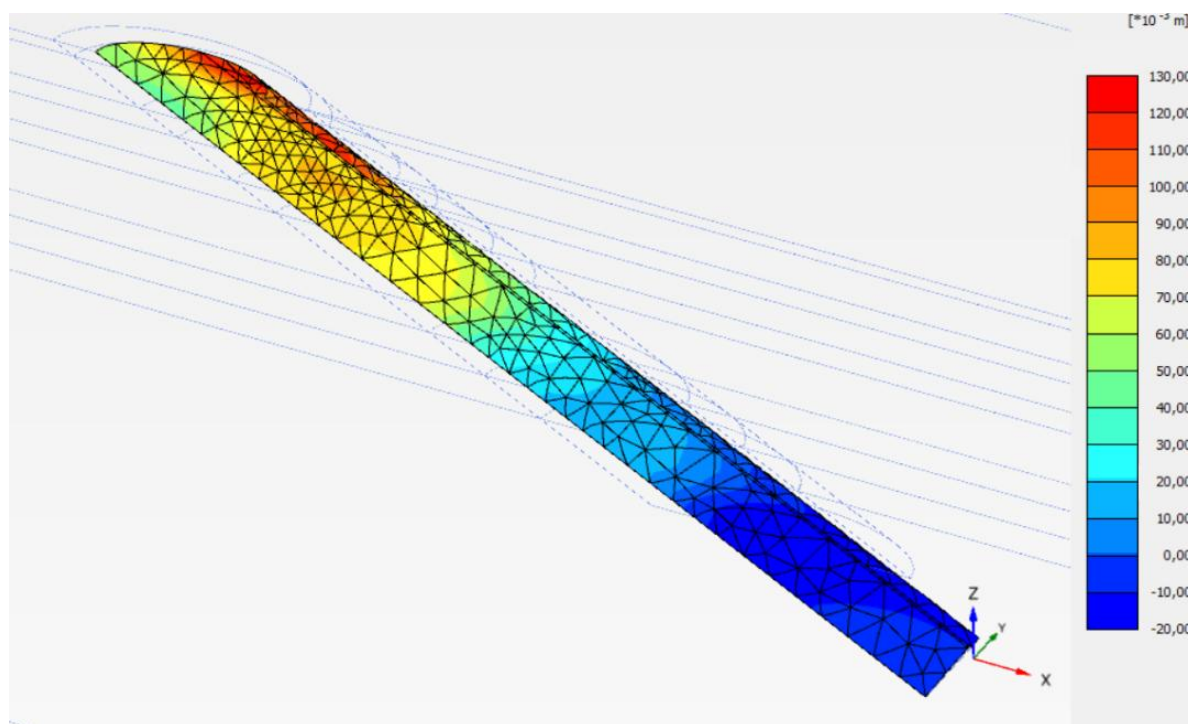


Рисунок 3.23 – Распределение вертикальных сдвижений обделки эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная»

Сдвиги и деформации вокруг выработки оказывают существенное влияние на обделку строящейся выработки, приводя к деформациям кривизны обделки эскалаторного тоннеля (Рисунок 3.24). По результатам моделирования кривизна на разных моделях не превышала значений  $1,6-2,5 \cdot 10^{-4}$  1/м. Кривизна, развивающаяся в период пассивной стадии замораживания может повлиять на раскрытие швов уже смонтированных элементов, например, если в период монтажа крепление элементов между собой осуществлялось недолжным образом или первичное нагнетание сводовой части производилось с отставанием более чем на 2-3 кольца, поэтому пренебрегать деформацией обделки нельзя и необходимо производить контроль за монтажом элементов кольца и производить деформационные наблюдения за сводовой частью на протяжении всего периода строительства и при необходимости производить повторную чеканку швов для сохранения целостности эскалаторного тоннеля и предотвращения проникновения тающей воды внутрь выработки в период естественного оттаивания горных пород.

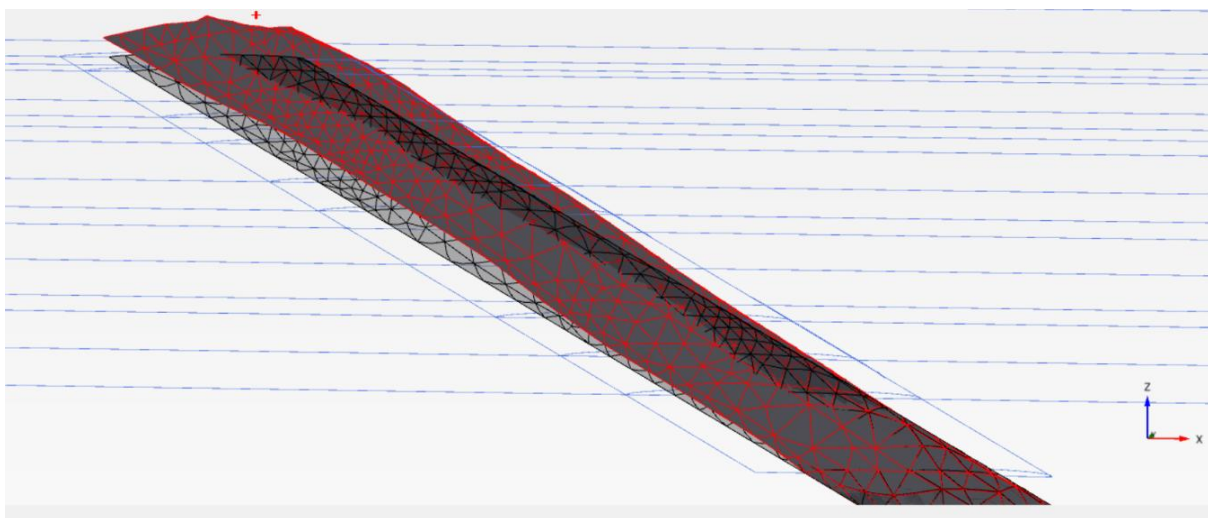


Рисунок 3.24 – Изменение положения контура выработки, относительно проектного положения (масштабный коэффициент равен 50)

Вокруг контура обделки эскалаторного тоннеля образуются вертикальные и горизонтальные сдвигения пород в массиве, определяя распределение полных сдвижений вокруг эскалаторного тоннеля (Рисунок 3.25).

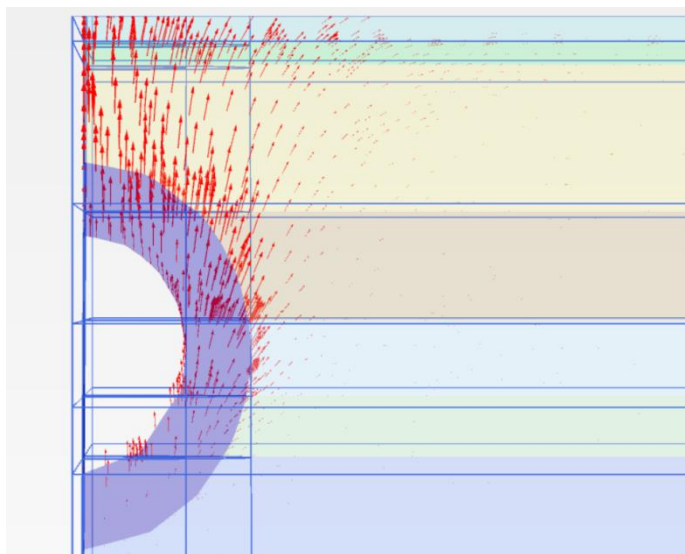


Рисунок 3.25 – Распределение полных сдвижений вблизи контура выработки

Над сводовой и лотковой частью тоннеля полные сдвигения расположены практически вертикально, примерно начиная с верхнего до нижнего «косых» элементов обделки (расположенные под углом  $45^\circ$ ), вектора полных сдвижений распределяются примерно под углом  $25-30^\circ$  от вертикального диаметра, образуя таким образом зону влияния пучений на земной поверхности.

Как показывают данные натуральных маркшейдерских наблюдений и результаты математического моделирования, пассивная стадия замораживания оказывает влияние не только на массив, но и на обделку эскалаторного тоннеля, о подработанная толща в свою очередь приводит к деформациям на земной поверхности, что доказывает необходимость производить деформационные наблюдения на земной поверхности и за обделкой эскалаторного тоннеля не только в период естественного оттаивания, но и в период активной и пассивной стадии замораживания.

### **3.6 Анализ данных моделирования в период активной и пассивной стадии замораживания. Распределение сдвижений и деформаций на земной поверхности**

Сдвигения и деформации на земной поверхности требуют отдельного рассмотрения (Рисунок 3.26 и 3.27).

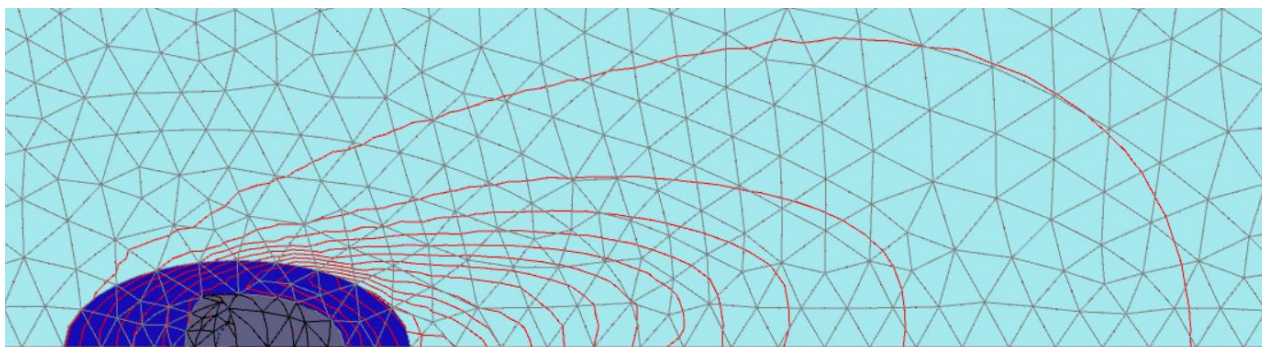


Рисунок 3.26 – Распределение вертикальных сдвижений в период пассивной стадии замораживания станции метро «Казаковская» (вид в плане)



Рисунок 3.27 – Распределение вертикальных сдвижений в период пассивной стадии замораживания станции метро «Проспект Славы II» (вид в плане)

Зона распределений сдвижений и деформаций в период нарастания ледопородного ограждения на земной поверхности распределяется неравномерно (Рисунок 3.28 и 3.29), по мере углубления замораживающих скважин, мутьда поднятий характеризуется увеличением ширины зоны влияния. Следовательно, чем больше мощность слабых неустойчивых пород, тем больше зона влияния на земной поверхности от эффектов искусственного замораживания.

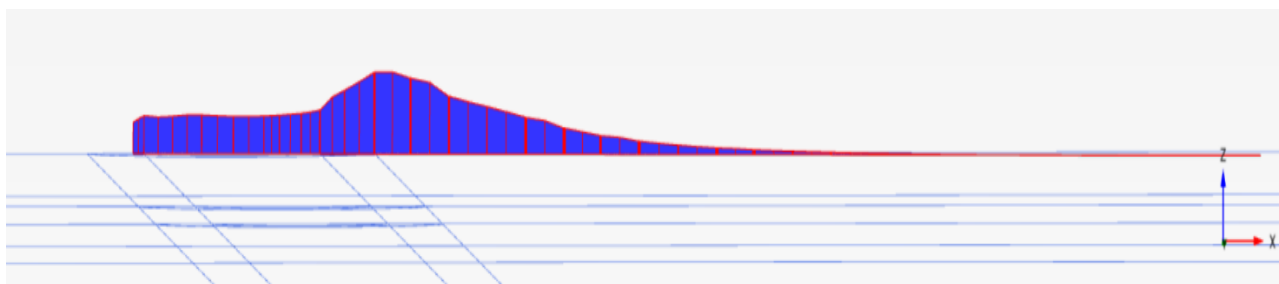


Рисунок 3.28 – Распределение пучений на момент переключения активной стадии замораживания в пассивную в главном продольном сечении

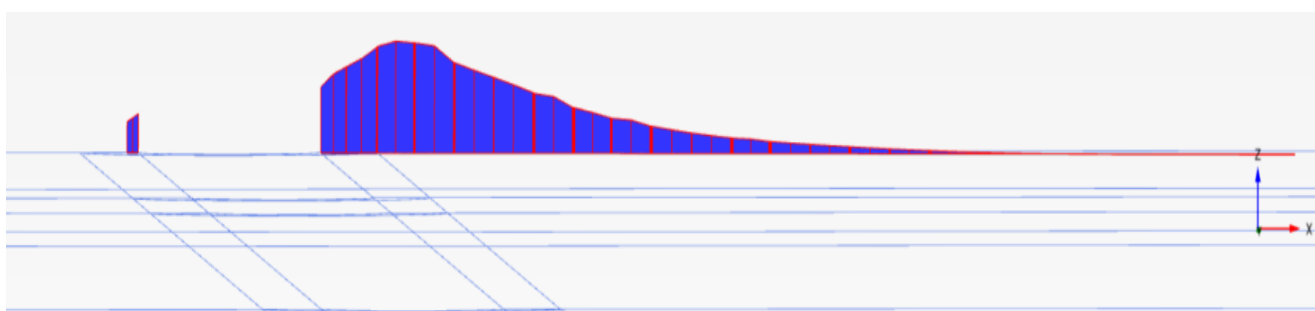


Рисунок 3.29 – Распределение пучений на момент отключения холодильной установки в главном продольном сечении

Для обеспечения достоверности полученных данных моделирования, были совмещены графики натуральных данных в период активной и пассивной стадии замораживания для эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская» с результатами численного моделирования.

По результатам моделирования значения пучений в точке ожидаемого максимального оседания на момент переключения активной стадии замораживания на пассивную составили 103 мм, по натурным данным 98мм (Рисунок 3.30).

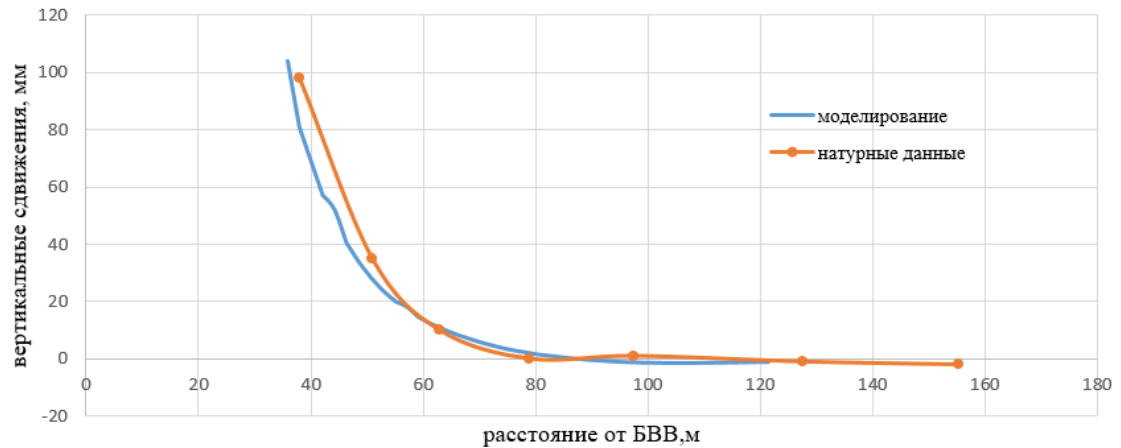


Рисунок 3.30 – Сравнение полумульды натуральных данных и данных моделирования на момент переключения активной стадии замораживания на пассивную в главном продольном сечении

По результатам моделирования значения пучений в точке ожидаемого максимального оседания на момент отключения холодильной установки составили 264 мм, по натурным данным 245 мм (Рисунок 3.31).

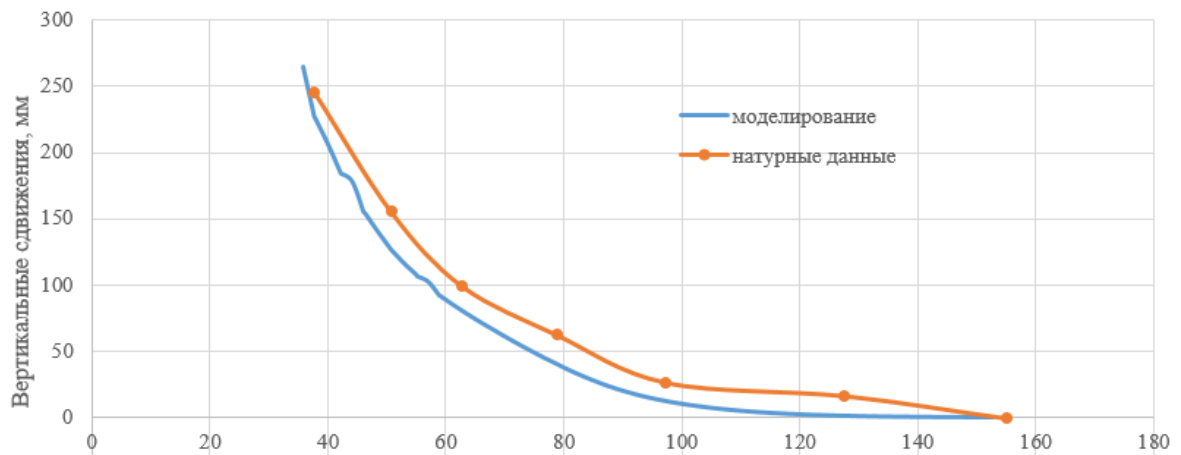


Рисунок 3.31 – Сравнение полумульды натуральных данных и данных моделирования на момент отключения холодильной установки в главном продольном сечении

Из натуральных данных видно, что уровень пучений на поверхности достигает существенных значений что приводит к большим значениям кривизны и горизонтальных деформаций. Этот уровень в 4-5 раз превышает уровень предельных. Такие деформации весьма опасны и разрушительны для наземных

объектов, их не учет при проектировании, даже при временном характере их проявления, недопустим.

Предложенный поэтапный модельный расчет деформаций и схема оценки уровня заданных деформаций расширения от заморозки способен удовлетворительно описать даже нарастающую динамику сдвижений в слоистом массиве с различными физико-механическими и теплофизическими свойствами пород. Но, главное, что модели показали схожую динамику нарастания пучений по стадиям (эту сходимость можно оценить по графикам рисунков 3.29 и 3.30).

Достоверность результатов моделирования обуславливается высокой сходимостью с данными натурных маркшейдерских наблюдений. Совпадение объемов мульд, рассчитанных по натурным данным и по результатам моделирования, обеспечиваются с погрешностью 6-10%, а разность по пучениям не превышает 20-30мм.

### **3.7 Выводы по третьей главе**

– Задача оценки деформационного состояния породного массива и поверхности при использовании искусственного замораживания при строительстве эскалаторных тоннелей относится к наиболее сложным геомеханическим задачам: одновременно развивающиеся во времени процессы разной физической природы определяются шестью группами факторов, одновременный учет все факторов невозможен, поэтому требует более глубокого анализа через моделирование;

– При моделировании геомеханических процессов в период активной и пассивной стадии замораживания применялся метод конечных элементов, который был реализован в программном комплексе Plaxis 3D. При моделировании эскалаторных тоннелей, основными элементами выступали горные породы с заданными физико-механическими характеристиками, полученные из инженерно-геологических изысканий, область ледопородного ограждения и обделка эскалаторного тоннеля;

– Для решения задачи прогнозной оценки сдвижений и деформаций с учетом основных выделенных ранее групп факторов предложен упрощенный подход, основанный на использовании численного моделирования методом конечных элементов с послойной оценкой параметров ледопородного ограждения по уровню влажности пород;

– Результаты конечно-элементного моделирования деформаций для эскалаторных тоннелей в стадиях активной и пассивной фазы замораживания, сооружаемых в горно-геологических условиях города Санкт-Петербург, показали высокую сходимость с данными натурных наблюдений, отклонения были менее 10%, что дало основания рекомендовать такой упрощенный подход в прогнозной оценке опасных для земной поверхности и обделки тоннеля деформаций пучения, как на стадиях проектирования, так и на стадиях строительства с учетом фактических данных по параметрам замораживания;

– По предложенной упрощенной методике, для эскалаторных тоннелей Санкт-петербургского метрополитена «Сенная», «Садовая», «Международная» и «Проспект Славы II» были рассчитаны показатели объемной деформации, пучения на земной поверхности по результатам математического моделирования достигали до 250 мм на земной поверхности. Полученные модели в дальнейшем использовались для моделирования геомеханических процессов в период естественного оттаивания. В общей сложности, для моделирования эскалаторных тоннелей в период активной и пассивной стадии замораживания было построено около 100 моделей;

– В результате моделирования выявлены следующие важные геомеханические элементы: возникновение зон концентрации деформаций сжатия и растяжения, формы развития сдвижений (пучений) и деформации обделки.



## **ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ В ПЕРИОД ЕСТЕСТВЕННОГО ОТТАИВАНИЯ ПОРОД**

Период естественного оттаивания горных пород напрямую зависит от процессов, происходящих в период нарастания ледопородного ограждения (период активной и пассивной стадии замораживания). Как было сказано ранее, данный процесс еще более сложный, здесь присутствует переход замороженной ледопородной толщи в жидкую фазу, сопровождающуюся изменением физико-механических свойств оттаивающего ледопородного ограждения вокруг уже построенной выработки. Как было отмечено в 3 главе, ледопородное ограждение в неоднородном массиве в конечном итоге принимает разную толщину, согласно геологическим слоям, то необходимо учитывать накопленные деформации на первых этапах работ по строительству эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов.

При строительстве эскалаторных тоннелей способом ТПМК, максимальные оседания на земной поверхности не превышают 60-70 мм [59], при строительстве способом замораживания, согласно натурным данным, оседания могут достигать порядка 400-450 мм, поэтому в данной глава посвящена именно влиянию процессов естественного оттаивания.

### **4.1 Моделирование в период естественного оттаивания пород. Факторы, влияющие на развитие сдвижений и деформаций**

Для эскалаторных тоннелей «Проспект Славы II», «Сенная», «Садовая» и «Международная» по предложенной упрощенной методике для каждого геологического слоя был рассчитан показатель объемной деформации (Глава 3) и задан в программном комплексе Plaxis 3D. По результатам полученных расчетов были определены значения пучений в период активной (до 150 мм на земной поверхности) и пассивной (до 300мм на земной поверхности) стадии замораживания. Для оценки сдвижений и деформаций на стадиях размораживания

за основу брались результаты, смоделированного замораживания и проходки эскалаторных тоннелей на всю проектную длину (Рисунок 4.1).

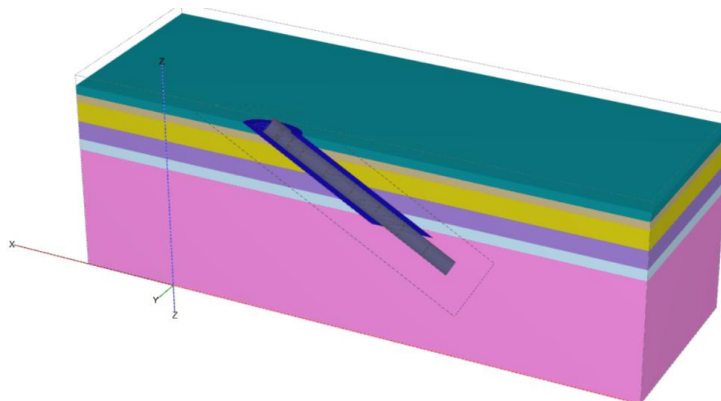


Рисунок 4.1 – Моделирование грунтового массива эскалаторного тоннеля

Для получения значений оседаний, при оттаивании, также использовался режим заданных деформаций - полученный показатель объемной деформации задавался поэтапно в обратном порядке с отрицательным знаком до нулевых значений (Рисунок 4.2), параметры механических свойств пород восстанавливались к первоначальным уровням (в виду отсутствия достоверных данных по изменению свойств пород после размораживания).

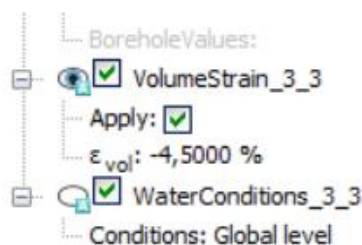


Рисунок 4.2 – Задание показателя объемной деформации с отрицательным знаком для i-го слоя в программном комплексе PLAXIS 3D

По данным такого моделирования, полученные значения оседаний не превышали 200-250 мм, форма кривой оседаний соответствовала традиционной форме мульды оседаний, точка максимального оседания, не совпадала с точкой максимального сдвижения в мульде поднятия на предыдущих стадиях.

Однако, полученные сдвигения не соответствовали данным натурных маркшейдерских наблюдений. Этот эффект косвенно подтверждает сильное влияние на оседания поверхности сложных и малоизученных процессов вторичного тепло-влажноперевода при оттаивании массива. С позиции оценки

деформационного состояния и анализа причин такого асимметричного процесса (при котором возвращение заданных деформаций в зоне ледопородного ограждения не обнуляет сдвигения на поверхности) можно объяснить возможным образованием зоны сжатия (зоны объемных пластических деформаций) в приповерхностной части массива над тоннелем на этапе замораживания и её сохранение в массиве на следующих этапах. Иными словами, при отклике на знакопеременные заданные деформации в зоне ледопородного ограждения (зоне замораживания-разморозки) массив может накапливать деформации сжатия в подработанной толще от разных стадий. А, отсутствие восстановления объема после изменения НДС в зонах сжатия может свидетельствовать о пластическом характере таких объемных деформаций.

В качестве эксперимента, для достижения значений оседаний на земной поверхности близких к реальным, замеренным в натуре, показатель объемной деформации был уменьшен еще на 1,5-2%. Это обосновывалось тем, что в процессе естественного оттаивания происходит постепенное отжатие воды и частичное вымывание частиц скелета грунта под нагрузкой в нижележащие слои. Значения такого обратного деформирования (в режим заданных объемных деформаций) выбирались однородными по всем слоям модели породного массива. Как показывают исследования, проводимые в данной области, массив вокруг выработки в части свойств становится относительно однородным, меняются фильтрационные свойства пород, например после размораживания у глинистого грунта коэффициент фильтрации существенно увеличивается (на 2-3 порядка), таким образом достигают уровней песков [48,89], поэтому после приведения в нулевое положение постепенно (по стадиям) задавалось единое значение дополнительного объемного сжатия для всех слоев для достижения сходимости с данными натурных маркшейдерских наблюдений.

#### **4.2 Распределение сдвижений и деформаций в массиве**

Как было отмечено ранее, процесс естественного оттаивания может длиться до 4-5 лет, программный комплекс Plaxis 3D не позволяет произвести

моделирование с использованием реологических моделей и учета фактора времени. Поэтому в работе оценивалось развитие оседаний в массиве путем поэтапно заданных деформаций (Рисунок 4.3) с определенным шагом ( $\varepsilon_{\text{vol}} = -0,5 - -1\%$ ).

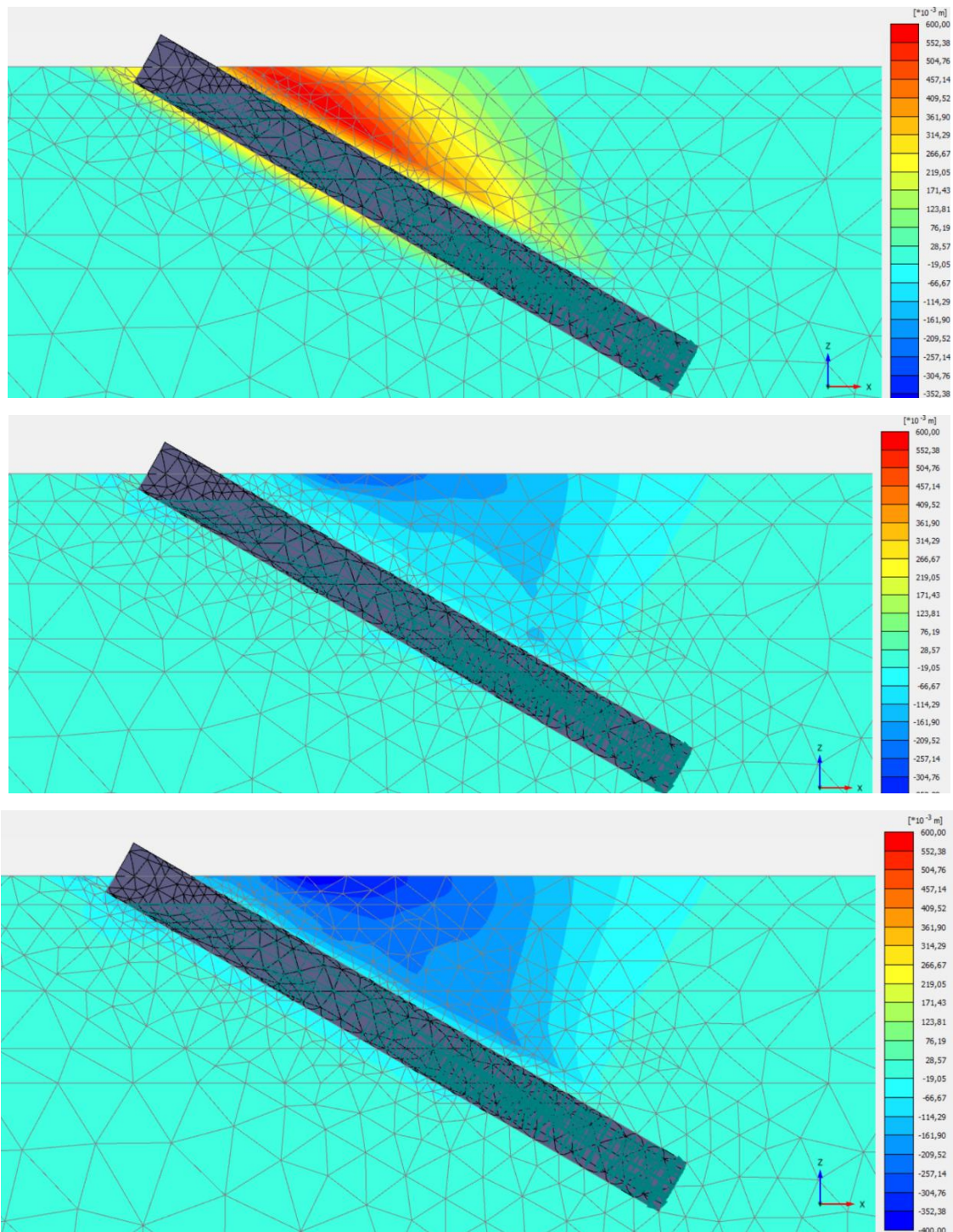


Рисунок 4.3 – Распределение вертикальных сдвижений для эскалаторного тоннеля станции метро «Проспект Славы II» на разных фазах расчета от момента отключения холодильных установок

Данный подход обеспечил моделирование постепенного развития оттаивания пород над осью эскалаторного тоннеля в треугольной зоне над эскалаторным тоннелем (в продольном сечении). Максимальные значения оседаний, как правило, локализовались на земной поверхности примерно над первой третью длины тоннеля (синяя зона на Рисунке 4.3), что в принципе соответствует результатам натуральных измерений.

При рассмотрении поперечных сечений на разных этапах расчета модели можно проследить как развивался этот деформационный процесс (имитирующий оттаивание ледопородного ограждения) в треугольной зоне над тоннелем, где сдвиги (пучения) в массиве достигали 400-500 мм (красная зона на Рисунке 4.4). Оседания на момент завершения процесса составляли 200-300мм (синяя зона на Рисунке 4.4).

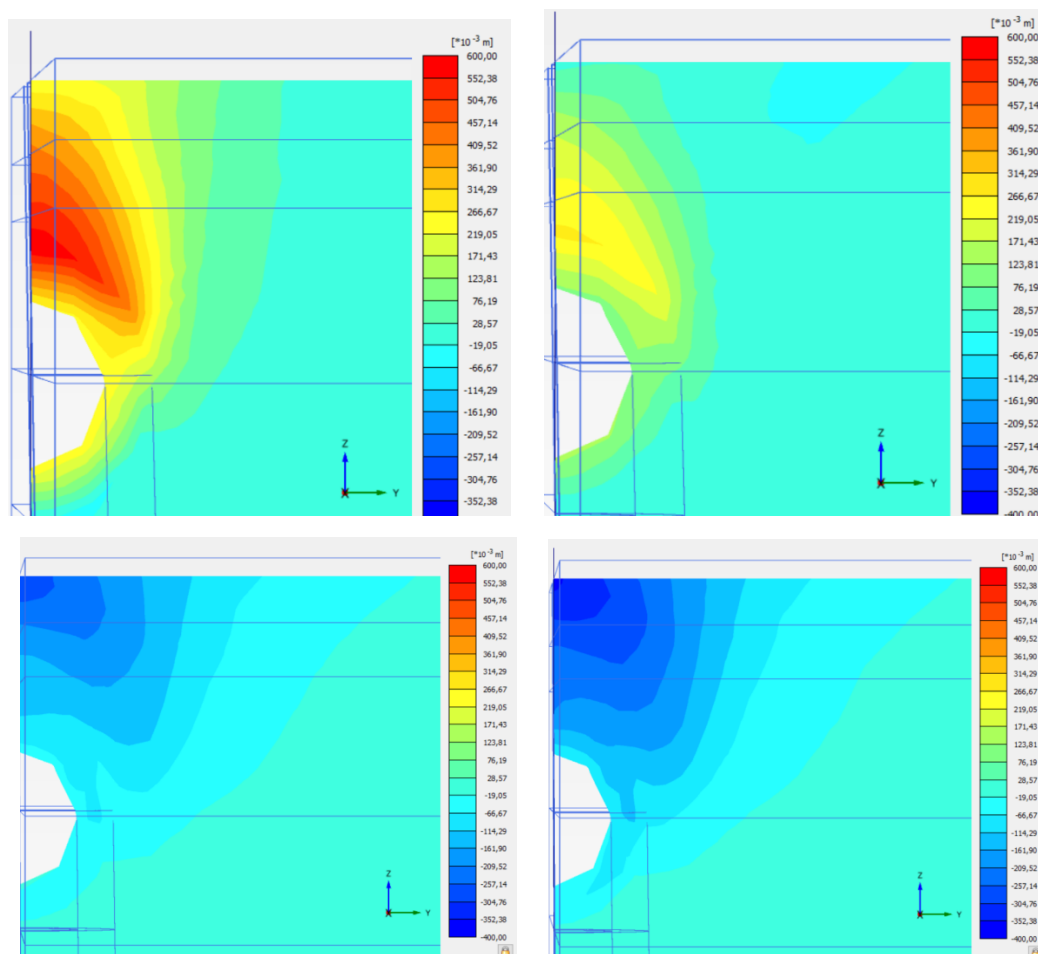


Рисунок 4.4 – Постепенное развитие оседаний в поперечном сечении для эскалаторного тоннеля «Проект Славы II» (сечение через точку максимального оседания)

На всех построенных моделях суммарное сдвижение в массиве в зоне проявления максимальных сдвижений пород на конечную стадию моделирования (после отключения холодильных установок) составляло порядка 600-700 мм. Такой эффект можно связать с процессами отжатия грунтовых вод, что должно приводить к развитию деформаций объемного сжатия ранее замороженной ледопородной толщи. Оседания пород непосредственно над эскалаторным тоннелем распределялись практически равномерно.

Равномерное распределение сдвижений вокруг эскалаторного тоннеля определяется развитием деформаций, накопленных в период нарастания ледопородного ограждения, внутри ледопородного ограждения и за его пределами. Зона треугольника над тоннелем характеризуется протяженной зоной сдвижений, где максимальные оседания локализуются на земной поверхности, вокруг эскалаторного тоннеля вертикальные сдвижения не превышают 100-150 мм. С увеличением глубины выработки оседания имеют затухающий характер и все меньше суммарные сдвижения достигают земной поверхности.

В режиме заданных деформаций, в период активной и пассивной стадии замораживания над тоннелем образовался ступок деформаций сжатия который имеет затухающий характер на распределение сдвижений к земной поверхности. А в период естественного оттаивания сжатия увеличиваются, приводя к оседаниям на земной поверхности (Рисунок 4.5).

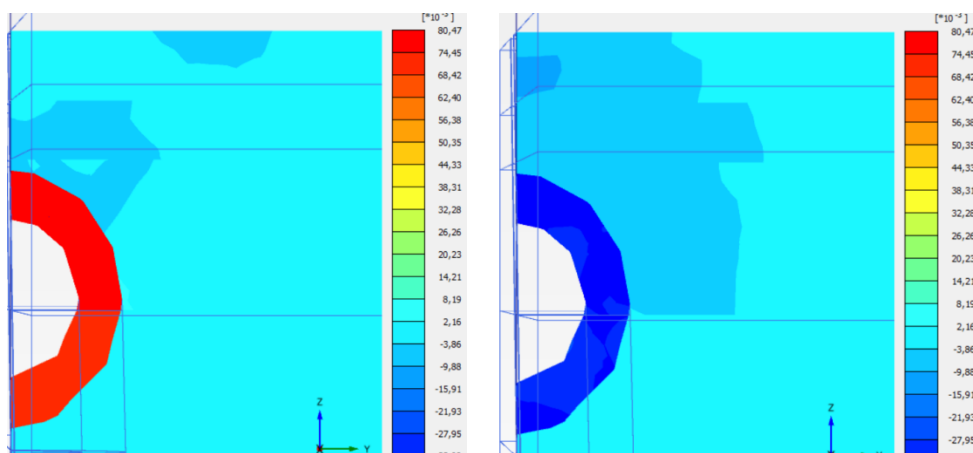


Рисунок 4.5 – Объемные деформаций на период отключения холодильных установок (слева) и оттаивании пород (справа) для станции эскалаторного тоннеля «Прспект Славы II»

Из рисунков видно, что накопленные деформации сжатия за пределами ледопородного ограждения в период активной и пассивной стадии, приводящие к первичному уплотнению прилегающих к зоне замораживания пород, в период естественного оттаивания должны компенсироваться деформациями растяжения.

Однако массив не возвращается в первоначальное положение, в над тоннелем остаются зоны уплотненных пород, а внутри зоны ледопородного ограждения постепенно развиваются деформации сжатия (Рисунок 4.6 и 4.7).

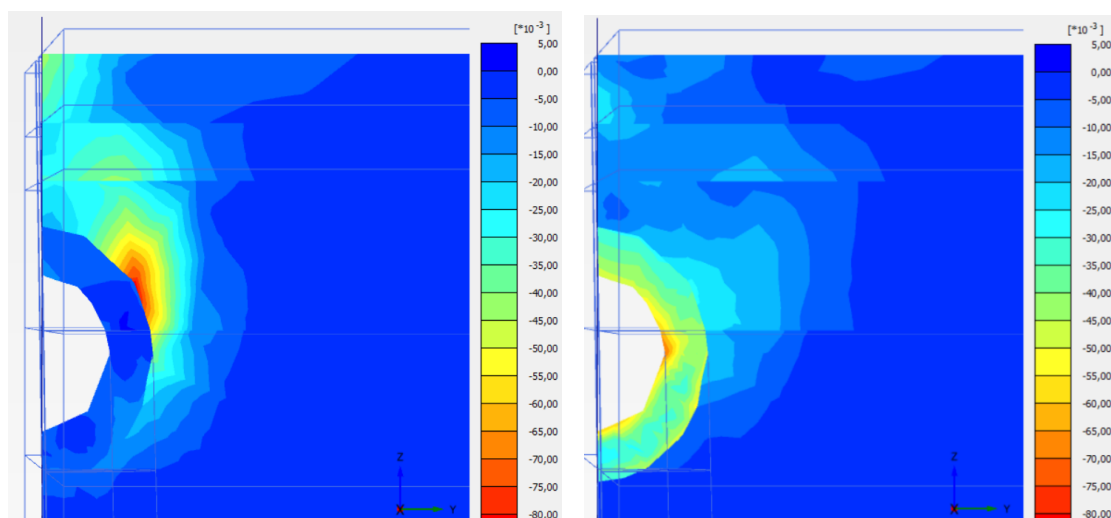


Рисунок 4.6 – Распределения максимальных деформаций на период отключения холодильных установок (слева) и оттаивании пород (справа) для станции эскалаторного тоннеля «Прспект Славы II»

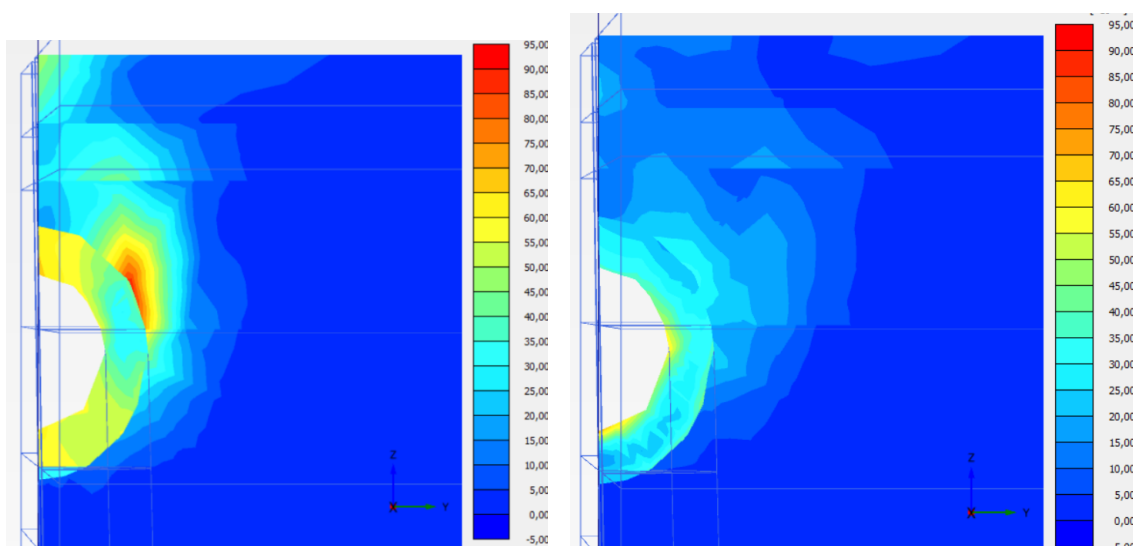


Рисунок 4.7 – Распределение деформаций сдвига на период отключения холодильных установок (слева) и оттаивании пород (справа) для станции эскалаторного тоннеля «Прспект Славы II»

Оба эффекта приводят к развитию оседаний на земной поверхности. Подобные закономерности проявлялись практически на всех моделях эскалаторных тоннелей. Эти закономерности подтверждают обозначенную в п.4.1 версию накопления в подрабатываемом массиве объемных пластических деформаций.

Отдельно необходимо отметить, проявляющиеся на всех моделях, зоны сжатия в подработанной толще, образованные в период активной и пассивной стадии замораживания, локализованные на некотором удалении от выработки и приуроченные к контактам литологических разностей, сохраняются и в период естественного оттаивания, приводя к развитию дополнительных оседаний в массиве и на земной поверхности (Рисунок 4.8).

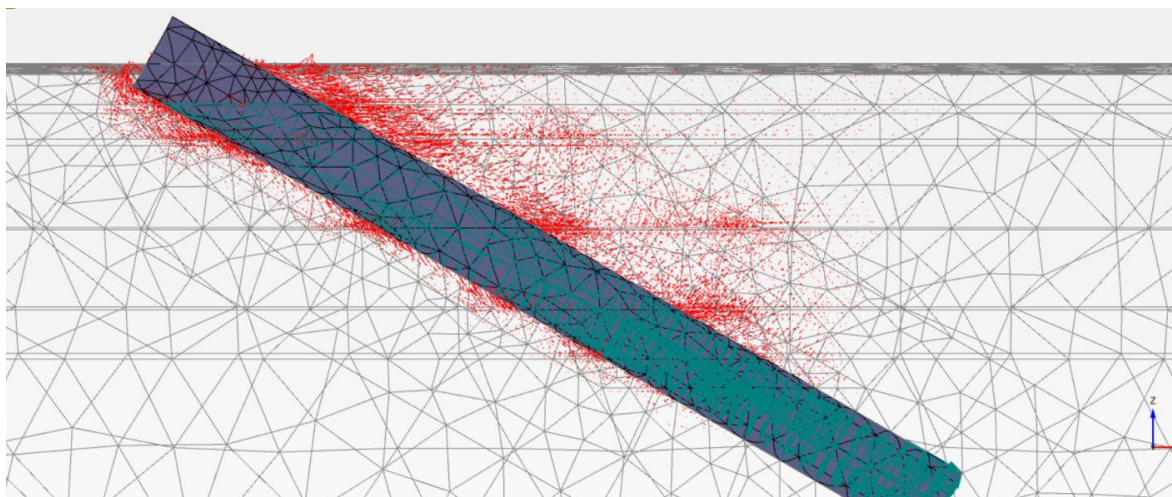


Рисунок 4.8 – Распределение уплотнений вокруг ледопородного ограждения и на контактах литологических разностей

### 4.3 Влияние естественного оттаивания на обделку эскалаторного тоннеля

Анализируя деформационное состояние обделки тоннеля в условиях проявления изменений НДС от заданных объемных деформаций можно отметить ряд основных эффектов.

Лотковая часть тоннеля оседает преимущественно в зоне четвертичных отложений, в протерозойских глинах обделка, практически полностью, сохраняет свое первоначальное положение не только в зоне свободной от влияния



ледопородного ограждения, но и в зоне заданных объемных деформаций. На протяжении всей длины эскалаторного тоннеля прослеживается неравномерность оседаний лотковой и сводовой части тоннеля, этот эффект проявляется за счет расположения выработки в инженерно-геологических слоях с разными деформационными характеристиками. Пониженные значения оседаний на Рисунке 4.9 приурочены к мощному слою глинистых пород лужской морены.

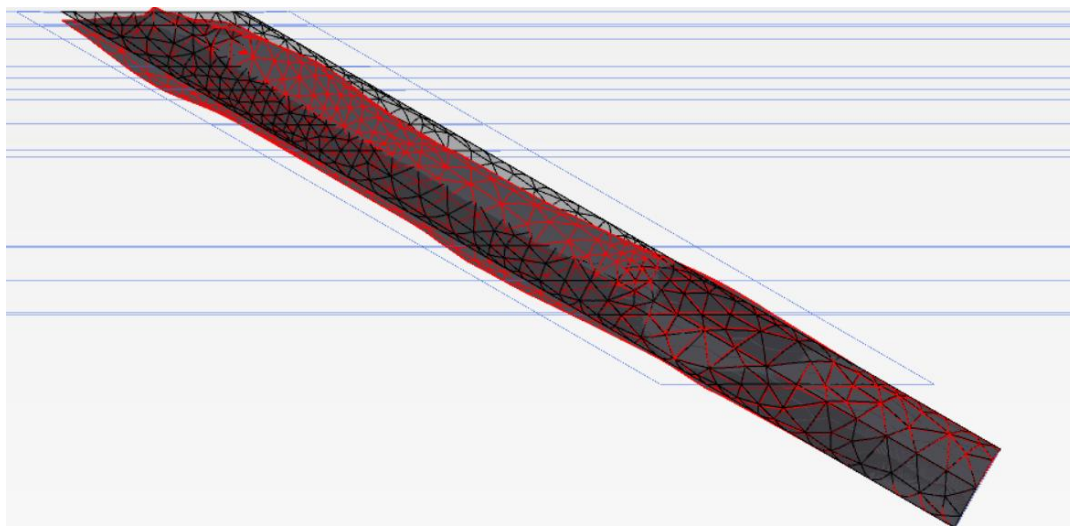


Рисунок 4.9 – Изменение положения контура выработки, относительно проектного положения (масштабный коэффициент равен 50)

Свод претерпевает наибольшие деформации, в сравнении с лотковой частью. В зоне треугольника над тоннелем, преимущественно находятся слабые обводненные породы, которые оказывают влияние на деформации свода, более плотный слой лужской морены не сдерживает тоннель, и обделка по инерции оседает (т.к. это единая конструкция) и при достижении протерозойских глин оседания уменьшаются (Рисунок 4.10).

Оседания сводовой и лотковой части напрямую связаны с взаимным расположением эскалаторного тоннеля и литологических разностей. В слоях, где прослеживаются низкие деформационные характеристики и высокая обводненность, оседания сводовой части могут достигать 170-180 мм, в четвертичных слоях где деформационные характеристики выше, оседания достигают порядка 100-140 мм, а в районе наиболее устойчивых пород, оседания не превышают 20 мм (Рисунок 4.10).

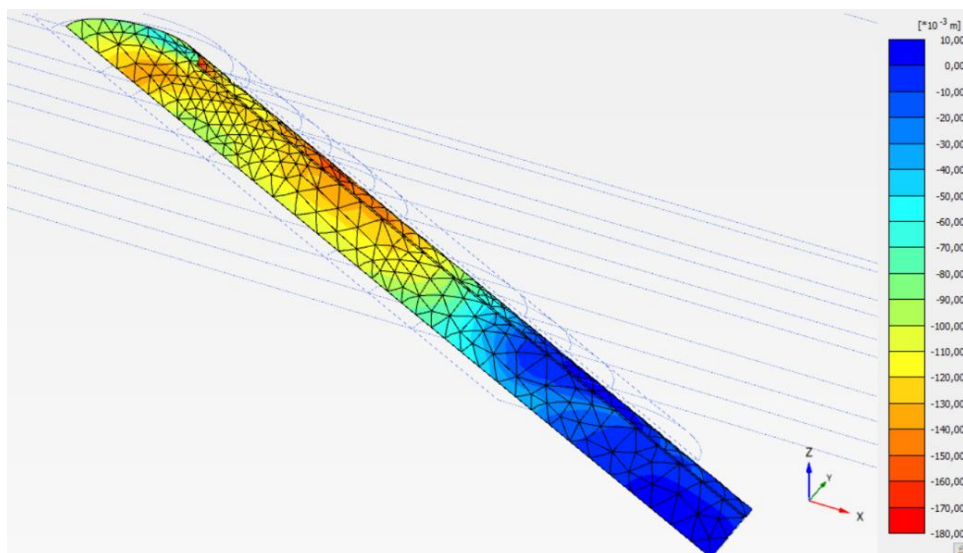


Рисунок 4.10 – Распределение вертикальных сдвижений обделки эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная»

Полученный результат численного моделирования, при рассмотрении влияния естественного оттаивания на обделку эскалаторного тоннеля лишний раз доказывает необходимость производить деформационные наблюдения за обделкой эскалаторного тоннеля не только в период строительства эскалаторного тоннеля, но и после введения станции метро в эксплуатацию. Необходимо в период строительства соблюдать все нормы по первичному нагнетанию, в сложных обводненных породах производить нагнетание сразу после монтажа кольца и следить за сблчиванием элементов кольца между собой, так как слабое болтовое соединение чугунной обделки может привести к нарушению целостности обделки эскалаторного тоннеля, а длительные процессы оттаивания могут повлечь за собой проникновение воды через образовавшиеся щели внутрь выработки.

#### **4.4 Анализ данных моделирования в период естественного оттаивания.**

##### **Распределение сдвижений и деформаций на земной поверхности**

Отдельного рассмотрения требует распределение сдвижений на земной поверхности. Результаты проведенных расчетов показывают, что вертикальные сдвижения на поверхности относительно оси симметрии – горизонтальной

проекции оси тоннеля распределены неравномерно, так же, как и в период нарастания ледопородного ограждения (Рисунок 4.11 и 4.12).

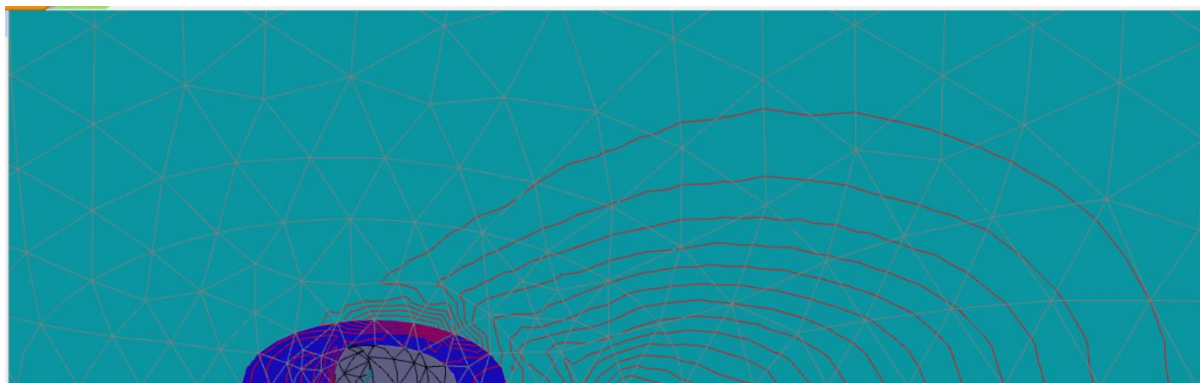


Рисунок 4.11 – Распределение оседаний на земной поверхности при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Прспект славы II»

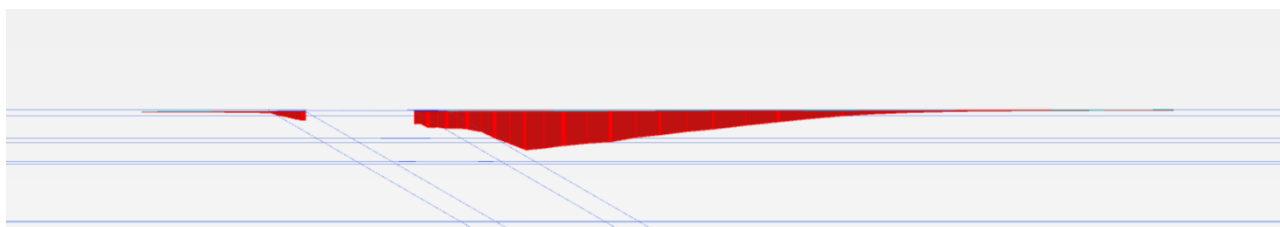


Рисунок 4.12 – Мульда главного продольного сечения эскалаторного тоннеля «Прспект Славы II», полученная по результатам математического моделирования

Такая форма мульды при моделировании эскалаторных тоннелей, пройденных тоннелепроходческими механизированными комплексами, также была получена при исследованиях, проведенных С.Ю. Новожиным [59].

Форма мульды, полученная при моделировании проходки нескольких эскалаторных тоннелей, получившая яйцеобразную форму как в период активной и пассивной стадии замораживания, так и в период естественного оттаивания пород, доказывает необходимость заложения дополнительных профильных линий, при проектировании наблюдательных станций за сдвигами и деформациями на земной поверхности, так как зона распределений сдвижений и деформаций на земной поверхности может оказать существенное влияние на

подрабатываемые здания и сооружения, особенно в условиях плотной городской застройки.

Так как форма мульды принимает яйцеобразную форму, то для анализа данных моделирования были выделены характерные сечения:

- главное продольное сечение (сечение, проходящее по оси тоннеля);
- главное поперечное сечение (сечение, проходящее через точку максимального оседания, перпендикулярное оси тоннеля);
- сечение, где ширина мульды достигла максимальных значений.

Распределение оседаний в каждом сечении были описаны с помощью метода типовых кривых. Как и для описания мульд, полученных по результатам данных натуральных маркшейдерских наблюдений, была выбрана функция, предложенная Н.С. Баком (Глава 2, формула 2.8).

Моделирование разных эскалаторных тоннелей показали, что мульда в сечении с максимальной шириной, так же, как и мульда в главном поперечном сечении может быть описана с помощью типовой кривой. Описание мульды в продольном сечении, ввиду разного характера распределения сдвижений не может быть применена подобная типовая кривая [59].

По результатам моделирования, формула (2.8), см. Глава 2 п.2.5 для поперечного сечения имеет следующий вид:

- для эскалаторного тоннеля «Сенная» (Формула 4.1):

$$S(z) = (1 + 8,550z^2)e^{-9,000z^2} \quad (4.1)$$

- для эскалаторного тоннеля «Садовая» (Формула 4.2):

$$S(z) = (1 + 8,706z^2)e^{-8,864z^2} \quad (4.2)$$

- для эскалаторного тоннеля «Международная» (Формула 4.3):

$$S(z) = (1 + 8,003z^2)e^{-9,104z^2} \quad (4.3)$$

- для эскалаторного тоннеля «Проспект Славы II» (Формула 4.4):

$$S(z) = (1 + 8,111z^2)e^{-9,026z^2} \quad (4.4)$$

На Рисунке 4.13 представлен график усредненной функции типовой кривой, полученной по результатам моделирования эскалаторных тоннелей «Сенная», «Садовая», «Проспект Славы II» и «Международная».

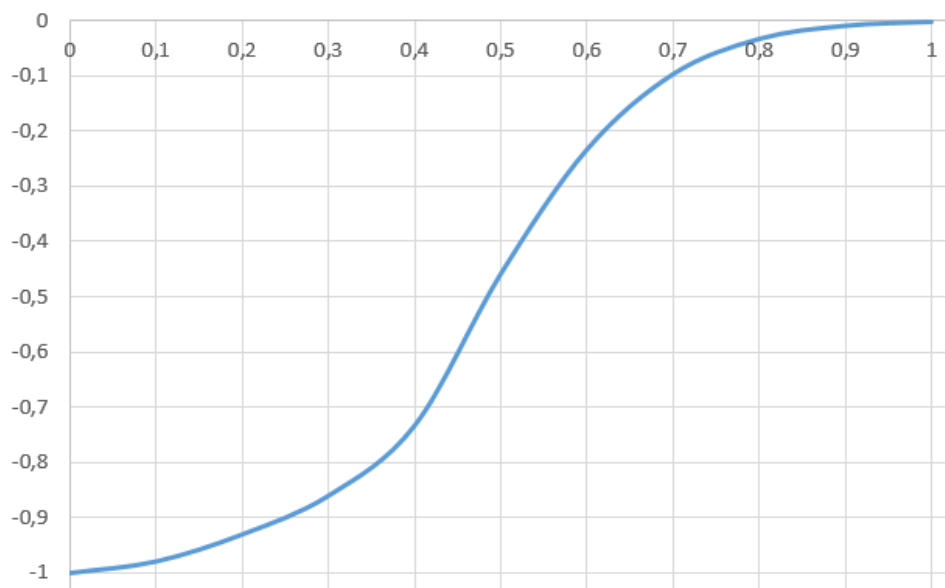


Рисунок 4.13 – Типовая кривая, построенная по данным результатов моделирования

Для обеспечения достоверности полученных данных моделирования, были совмещены графики натуральных данных с результатами численного моделирования.

На Рисунке 4.14 приведен пример совмещенной мульды данных натурных маркшейдерских наблюдений с результатами численного моделирования, значения точки максимального оседания составили 418 мм, по натурным данным 395 мм.

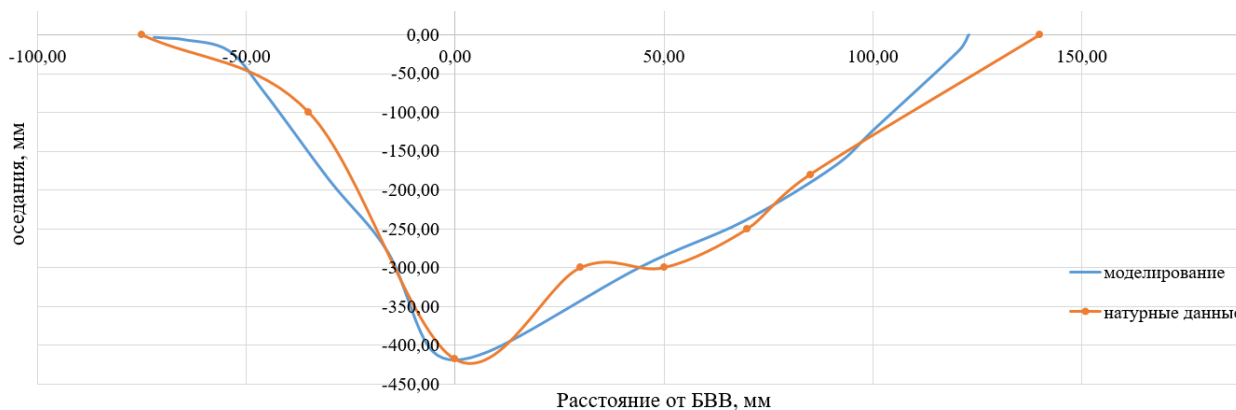


Рисунок 4.14 – Сравнение полумульды натуральных данных и данных моделирования для эскалаторного тоннеля «Сенная»

Достоверность результатов моделирования обуславливается высокой сходимостью с данными натуральных маркшейдерских наблюдений. Совпадение объемов мульд, рассчитанных по натурным данным и по результатам моделирования, обеспечиваются с погрешностью до 15%, а разность по пучениям не превышает 50 мм.

#### **4.5 Выводы по четвертой главе**

– На основе данных численного моделирования методом конечных элементов по рассматриваемым эскалаторным тоннелям, выявлены закономерности возникновения и развития сдвижений и деформаций в период активной и пассивной стадии замораживания, в период естественного оттаивания массива. Показано, что деформации в массиве и на поверхности определяются, главным образом, за счёт воздействия замораживания и оттаивания пород, а влияние ведения горных работ по проходке несущественно. Замораживание, определяющие развитие объемных деформаций расширения вокруг тоннеля, обеспечивает образование в подработанной толще зон пластических объемных деформаций, которые, после компенсации задаваемого объемного расширения в зоне ледопородного ограждения, остаются в массиве и создают условия для развития дополнительных оседаний на поверхности. Кроме того, выявлено несоответствие получаемых на поверхности мульд оседаний при моделировании полного размораживания пород с мульдами оседаний из натуральных данных, что подтверждает развитие вторичных процессов в обводненном массиве после разморозки, связанных изменением структуры породного скелета, миграции влаги, вымыванием твердых фракций и других процессов, инициирующих дополнительные оседания в массиве.

– Для исследования закономерностей процессов сдвижений и деформаций в период естественного оттаивания, при строительстве эскалаторных тоннелей, было создано дополнительно еще около 50 моделей. Верификация итоговых моделей, результаты которых приведены в данном исследовании с натурными

маркшейдерскими наблюдениями показывает достоверность полученных результатов;

– Для обеспечения удовлетворительной сходимости полученных результатов математического моделирования как для периода нарастания ледопородного ограждения, так и для периода естественного оттаивания горных пород необходимо использовать данные натурных маркшейдерских наблюдений, осуществление такого комплексного подхода позволяет повысить достоверность инженерной прогнозной методики.

## **ГЛАВА 5 МЕТОДЫ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ УСЛОВИЯ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

Прогнозирование сдвижений и деформаций является одной из составляющих проектирования подземных сооружений в условиях плотной городской застройки. Такая оценка должна содержать в себе простые поэтапные инженерные расчеты, основанные на упрощенных закономерностях, учитывая горно-геологические условия строительства.

В данном исследовании поставлена цель повышения достоверности прогнозной методики сдвижений и деформаций на земной поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов, основанная на комплексном использовании данных натуральных маркшейдерских наблюдений и численного моделирования. Такой комплексный подход позволяет исключить погрешность в моделировании проходки эскалаторных тоннелей на всех этапах строительства. По результатам исследований, описанных в Главе 3 и Главе 4, предлагается инженерная методика прогнозной оценки, а также приведены рекомендации по проведению данных натуральных маркшейдерских наблюдений.

В предлагаемом подходе для разработки методики прогнозной оценки сдвижений должны быть решены следующие задачи:

- Обеспечения оценки границ мульд (зон влияния);
- Расчета максимального оседания в мульде и положения точки максимального оседания (с привязкой к БВВ);
- Задания формы кривой оседаний;
- Обеспечения оценки вертикальных деформаций.

### **5.1 Определение зоны влияния и оценка границ мульд сдвижений**

Применение натуральных данных не позволяет оценить границы мульд сдвижений, определить зону влияния на земной поверхности можно при помощи граничного критерия.



Из исследований С.Ю. Новоженина опыт съемок деформационных измерений с помощью нивелирования III класса известно, что абсолютная погрешность составляет порядка 3-4 мм, при средней длине хода до 150 м, поэтому погрешность измерений между деформационными точками составит  $\sqrt{2} \cdot 3,5 \cong 5$  мм. Тогда наклон можно будет зафиксировать на уровне  $5/25000=0,0002$ . В реальности, в условиях плотной городской застройки, расстояния между деформационными точками обычно меньше 25 м, тогда абсолютная погрешность в большинстве случаев будет не меньше 3 мм, следовательно, данная оценка может быть рассмотрена как предельная. Так как по применяемой в настоящее время методике определить наклон точнее, чем 0,0002 нельзя, то данный критерий был принят за граничный для фиксации границы мульды сдвижений [59].

По результатам математического моделирования для эскалаторных тоннелей станции метро «Сенная», «Садовая», «Международная» и «Проспект Славы II» было выявлено что на размер зоны влияния от строительства эскалаторных тоннелей, главным образом, определяется глубиной заложения замораживающих скважин или мощностью замороженной толщи.

Мощность замороженной толщи напрямую зависит от мощности четвертичных отложений. Оценка зоны влияния на земной поверхности традиционно осуществляется через граничные углы (углы влияния). Граничные углы представляют собой внешние, относительно выработанного пространства углы, образованные по главным сечениям мульд сдвижений, проходящих через точку максимального оседания, соединяющими границу выработки с границей зоны влияния на земной поверхности [59]. Схематично, определение граничных углов (углов влияния) от мощности замороженной толщи показано на Рисунке 5.1 и 5.2.

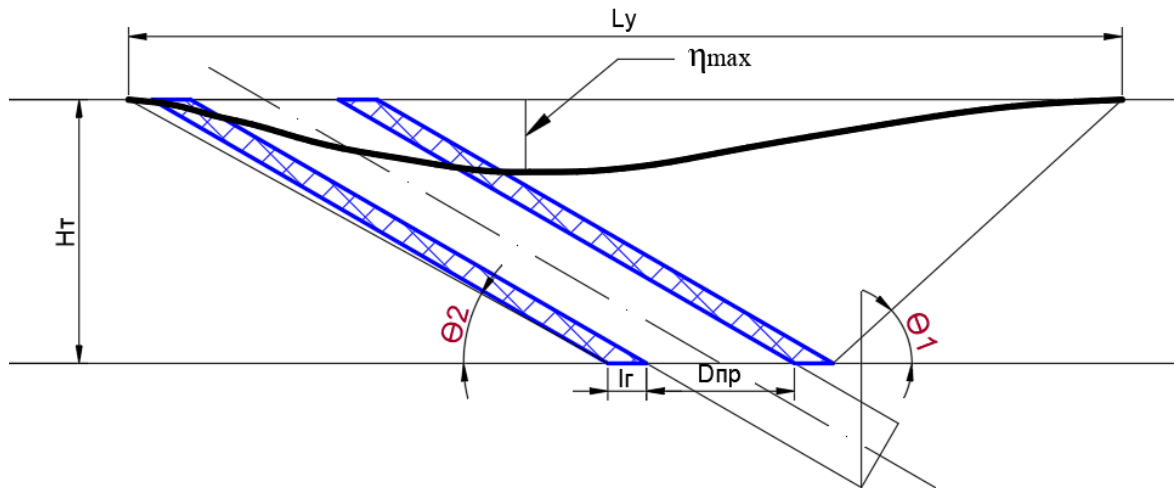


Рисунок 5.1 – Граничные углы в главном продольном сечении

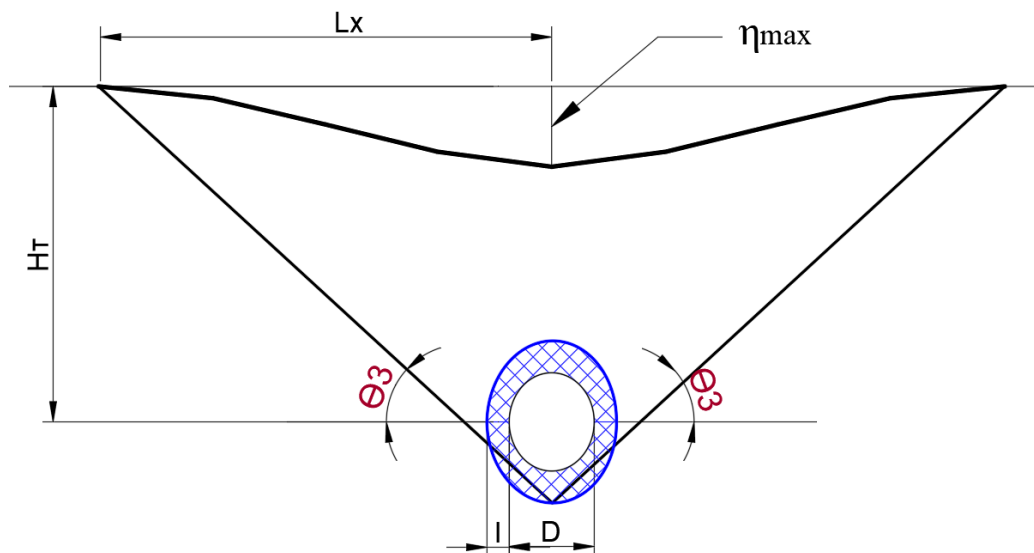


Рисунок 5.2 – Граничные углы в главном поперечном сечении

Для модельной оценки стабильности значений граничных углов, применялся метод вариации исходного параметра. Так, для всех базовых моделей эскалаторных тоннелей изменялось проектное положение замороженной толщи. Вариация нижней отметки ледогрунтового ограждения принята в интервале 10 м (было опущено и поднято на 5 м относительно исходного), таким образом, чтобы глубина замораживающих колонок оставалась в районе более устойчивых пород (протерозойских глин). Пример модели эскалаторного тоннеля «Прспект Славы II» с вариацией нижней отметки замороженной толщи представлен на Рисунке 5.3.

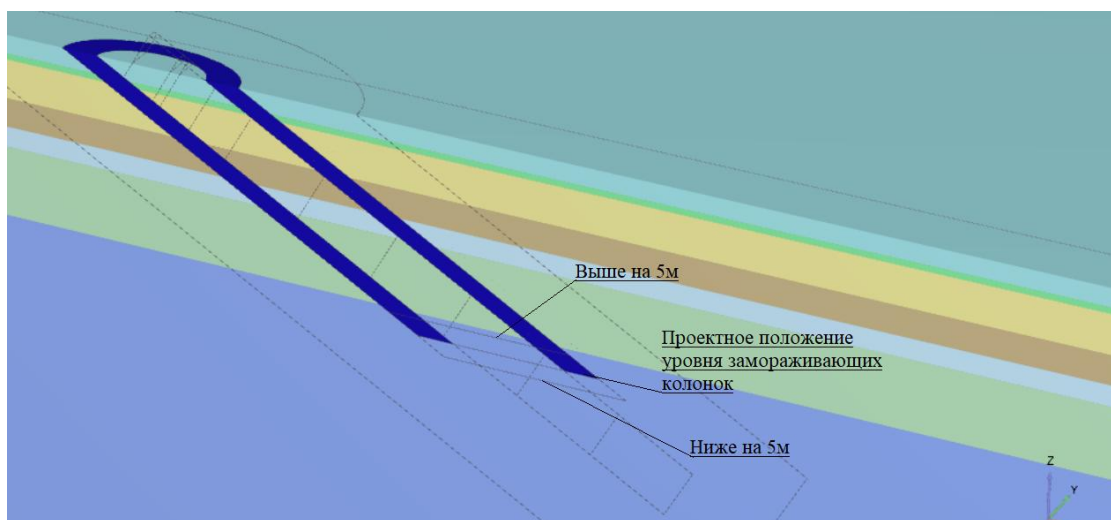


Рисунок 5.3 – Положение мощности заморозенной толщи на разных уровнях для эскалаторного тоннеля «Прспект Славы II»

Для каждого варианта нижней отметки ледогрунтового ограждения были определены граничные углы. Данные моделирования показали, что с увеличением мощности заморозенной толщи, размер зоны сдвижений на земной поверхности – увеличивается, с уменьшением мощности размер зоны, соответственно уменьшается, однако значения граничных углов остаются неизменными, что показывает справедливость использования выбранного подхода.

В приложении Б приведен пример распределения оседаний на земной поверхности и в породном массиве при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Прспект Славы II».

Полученные данные граничных углов для всех эскалаторных тоннелей сведены в Таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Значения граничных углов (углов влияния) для эскалаторных тоннелей

Эскалаторный тоннель	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
Сенная	38,2	28,1	44,1
Садовая	40,0	27,6	46,2
Лиговский проспект	41,4	28,0	45,9
Прспект Славы II	38,3	26,4	45,2

По результатам численного моделирования проходки эскалаторных тоннелей было выявлено, что границы зоны влияния от эффектов замораживания-

оттаивания зависят от мощности замороженной толщи и может быть установлена при помощи граничных углов (углов влияния), отложенных от контура замораживающих скважин. Полученные значения углов стабильны и варьируются в небольших пределах (не более  $2,5^\circ$ ), позволяя зафиксировать размеры мульд сдвижений в главном продольном и поперечных сечениях мульды.

Мульду сдвижений в главном продольном сечении (Рисунок 5.1) можно рассчитать по формуле (5.1):

$$L_y = H_T(\operatorname{ctg}\theta_1 + \operatorname{ctg}\theta_2) + 2l_r + D_r \quad (5.1)$$

где  $H_T$  – мощность замороженной толщи, м;

$\theta_1, \theta_2$  – граничные углы (углы влияния), градус;

$l_r$  – проектная толщина ледопородного ограждения в горизонтальном сечении

$D_{np}$  – проекция диаметра эскалаторного тоннеля, для эскалаторных тоннелей диаметром 10,5 м,  $D_{np} = 21$  м.

Полумульду сдвижений в поперечном сечении (Рисунок 5.2) можно рассчитать по формуле (5.2):

$$L_x = H_T \operatorname{ctg}\theta_3 \quad (5.2)$$

где  $H_T$  – мощность замороженной толщи, м;

$\theta_3$  – граничный угол (угол влияния), градус.

## 5.2 Методика оценки положения точки максимального оседания

Обычные наблюдательные станции из-за сложности в оптимальном размещении реперов, в организации и обеспечении их сохранности на весь период наблюдений за вертикальными сдвигами от строительства эскалаторных тоннелей не позволяют достаточно точно определить положение точки максимального оседания в мульде.

По полученным результатам численного моделирования было замечено, что положение точки максимального оседания зависит от инженерно-геологических условий, в которых осуществляется проходка эскалаторных тоннелей. На каждом геологическом разрезе был выявлен слой, который характеризуется низкими

деформационными характеристиками и влажность пород в пределах 36-42% (супесь лужской морены). Указанный слой распространен практически по всей территории города Санкт-Петербург.

Для численного анализа влияния залегания «Водонасыщенного» слоя, были дополнительно взяты геологические разрезы, где расположение геологического слоя находилось на разных глубинах: 18, 23 и 25 м. Дополнительные модели подтвердили факт влияния положения «Водонасыщенного» слоя на положение точки максимального оседания. Форма мульд с разными вариантами расположения «Водонасыщенного» слоя приведены на Рисунке 5.4. и 5.5.

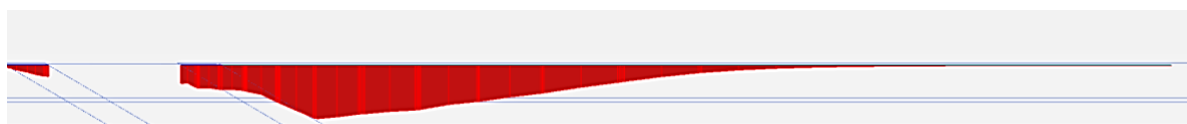


Рисунок 5.4 – Мульда сдвижений в главном продольном сечении при залегании «Водонасыщенного» слоя 18 м.

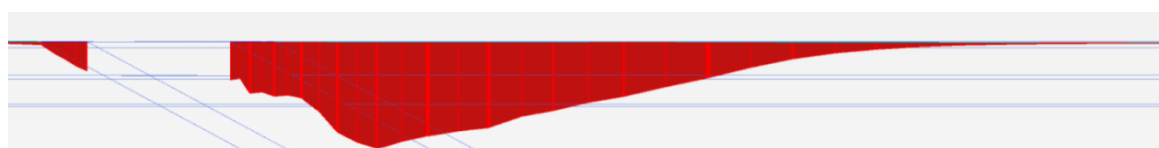


Рисунок 5.5 – Мульда сдвижений в главном продольном сечении при залегании «обводненного» слоя 23 м.

Схематичное определение точки максимального оседания приведено на Рисунке 5.6.

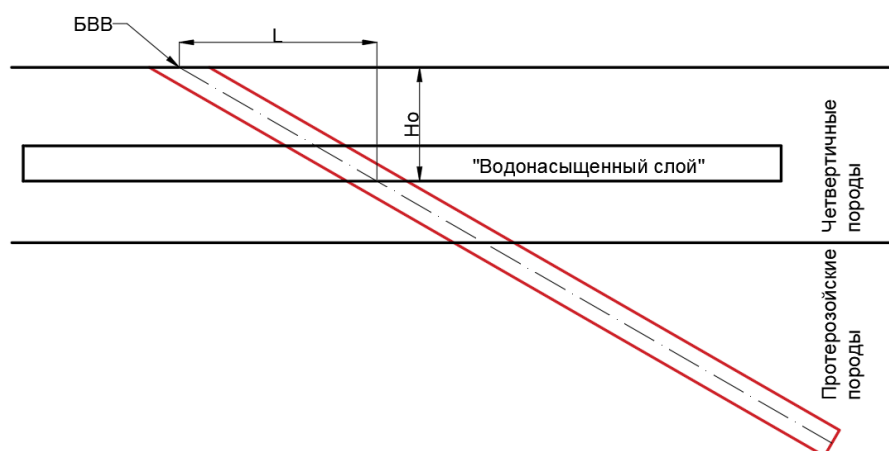


Рисунок 5.6 – Схема к определению положения точки максимального оседания

Формула (5.3) для определения положения точки максимального оседания:

$$L = ctg30^\circ \cdot H_o, \quad (5.3)$$

Где  $L$  – Расстояние от БВВ до точки максимального оседания;

$H_o$  – мощность четвертичных отложений от нижней границы «Водонасыщенного» слоя;

Вариация определения положения точки максимального оседания находится в пределах 3 - 5 м для разных условий проходки тоннелей.

На положение точки максимального оседания влияет положение нижней границы «Водонасыщенного» слоя. Этот эффект определяется спецификой модельных расчетов и наиболее вероятным механизмом деформационных процессов, связанных с постепенным уменьшением объемов ледопородного ограждения в режиме заданных деформаций при котором сектор ледопородного ограждения сжимаясь перемещается к своему основанию гравитационной составляющей.

### 5.3 Определение значения точки максимального оседания

Для оценки значения точки максимального оседания воспользуемся формулой (5.4), предложенной Сильвестровым С.Н. [74]:

$$\eta_0 = \frac{[\xi^2 + \xi(0,64D_B + 0,36D_G)] l_{cp.вз} \sqrt{m_0} H_T}{0,23K_p L_y}, \quad (5.4)$$

где  $\xi$  – толщина ледогрунтового ограждения, м;  $D_B$  – вертикальный диаметр, м;  $D_G$  – горизонтальный диаметр, м;  $l_{cp.вз.}$  – средневзвешенное значение относительного уплотнения замороженной толщи;  $H_T$  – мощность замороженной толщи, м;  $L_y$  – длина мульды сдвижения в главном сечении, м;  $m_0$  – параметр, определяющий крутизну склонов;  $K_p$  – коэффициент разрыхления.

Для каждого эскалаторного тоннеля была взята проектная и толщина ледопородного ограждения и рассчитана средневзвешенная величина расчетных толщин ледопородного ограждения (по формуле, предложенной Д.А. Потемкиным).

Пример расчета значения максимального оседания для эскалаторного тоннеля  
«Сенная»

Длина мульды сдвижения в главном продольном сечении (Выражение 5.5):

$$L_y = 55(\operatorname{ctg}40 + \operatorname{ctg}28) + 2 \cdot 5,5 + 21,5 = 201\text{м} \quad (5.5)$$

Значение оседания от проектной толщины ледопородного ограждения (Выражение 5.6):

$$\eta_0 = \frac{[2,75^2 + 2,75(0,64 \cdot 12,12 + 0,36 \cdot 10,5)]0,15\sqrt{0,287 \cdot 10^{-2} 55}}{0,23 \cdot 1 \cdot 201} = 0,350, \quad (5.6)$$

Значение оседания от рассчитанной средневзвешенной толщины ледопородного ограждения (Выражение 5.7):

$$\eta_0 = \frac{[3,2^2 + 3,2(0,64 \cdot 12,12 + 0,36 \cdot 10,5)]0,15\sqrt{0,287 \cdot 10^{-2} 55}}{0,23 \cdot 1 \cdot 201} = 0,406, \quad (5.7)$$

Полученные значения на всех эскалаторных тоннелях для наглядности сведены в Таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Значения величины точки максимального оседания по разным методикам

Эскалаторный тоннель	Натурные данные	Результаты моделирования	С учетом проектной толщины ледопородного ограждения	С учетом рассчитанной толщины ледопородного ограждения
Сенная	418	395	350	436
Садовая	462	448	373	485
Международная	364	342	307	349
Проспект Славы II	380	353	307	405

Ввиду сходимости с данными натуральных маркшейдерских наблюдений, в инженерной методике использовалось средневзвешенное значение.

#### 5.4 Оценка формы кривой оседаний

Анализ данных результатов натуральных наблюдений и математического моделирования (Глава 2 п.2.5 и Глава 3 п.3.7) показал, что для условий четвертичных отложений города Санкт-Петербург, в качестве типовой кривой

пучений и оседаний в главном продольном сечении может быть использована показательно-степенная функция, предложенная Н.С.Баком [16].

По результатам регрессионного анализа в программном комплексе MathCad, полученных по данным натуральных маркшейдерских наблюдений и результатов численного моделирования, определены коэффициенты типовой кривой пучений:  $a=0,003$ ,  $b=10,806$  и типовой кривой оседаний:  $a=12,307$ ,  $b=8,743$ . График полученных типовых кривых представлен на Рисунке 5.7.

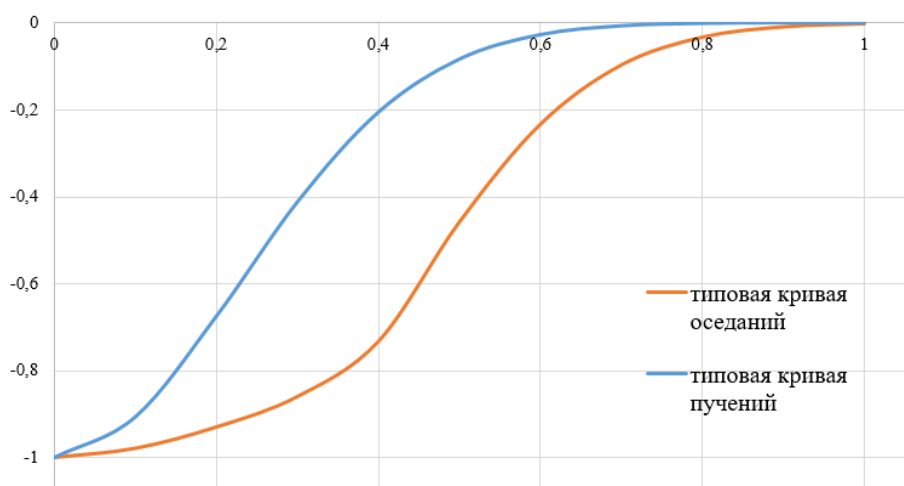


Рисунок 5.7 – График типовой кривой, по усредненным значениям

Наклоны и кривизна рассчитываются как первая и вторая производные от оседаний соответственно [24].

### 5.5 Инженерная методика прогнозной оценки и исходные параметры для условий города Санкт-Петербург

1. Определение положения точки максимального оседания по формуле (5.8):

$$L = \operatorname{ctg} 30^\circ \cdot H_o, \quad (5.8)$$

Определение размера мульды в главном продольном сечении по формуле (5.9):

$$Ly = H_T (\operatorname{ctg} \theta_1 + \operatorname{ctg} \theta_2) + 2l_T + D_T \quad (5.9)$$

Определение полумульды в главном поперечном сечении по формуле (5.10):

$$Lx = H_o \operatorname{ctg} \theta_3 \quad (5.10)$$

Определение полумульды максимальной ширины по формуле (5.11):



$$Lx = H_T \operatorname{ctg} \theta_3 \quad (5.11)$$

где  $H_0$  – мощность от нижней границы «Водонасыщенного» слоя, м;

$H_T$  – мощность замороженной толщи, м;

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – граничные углы, исходя из высокой сходимости полученных граничных углов, для условий города Санкт-Петербург можно принять значения:  $\theta_1 = 40^\circ$ ,  $\theta_2 = 28^\circ$ ,  $\theta_3 = 40^\circ$ ;

$l_r$  – толщина ледопородного ограждения в горизонтальном сечении, м;

$D_r$  – горизонтальный диаметр, м.

2. Расчет толщины ледопородного ограждения по формуле (5.12):

$$\xi(t) = \frac{A}{\xi(t)} + B$$

$$\xi^2 - B\xi - A = 0 \Rightarrow \xi_{1,2} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4A}}{2} \Rightarrow \quad (5.12)$$

$$A = -\frac{\lambda(T_c - T_{xl})}{\gamma(E_B W_0 + c(T_c - T_3))} t; B = \frac{7,67 \sqrt{\frac{c\lambda}{\gamma}} (T_3 - T_c)}{E_B W_0 + c(T_c - T_3)} \sqrt{t}$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, кДж/м ч<sup>0</sup>С;  $W_0$  – влажность, %;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/кг<sup>0</sup>С;  $\gamma$  – объемный вес, т/м<sup>3</sup>;  $T_{xl}$  – температура стенки замораживающей колонки, <sup>0</sup>С;  $T_c$  – температура сублимации, <sup>0</sup>С;  $T_3$  – температура замерзания, <sup>0</sup>С;  $E_B$  – скрытая теплота льдообразования, кДж/кг.

Все параметры, которые используются в формуле (5.12) берутся из инженерно-геологических изысканий.

3. Определение значения точки максимального оседания по формуле (5.13):

$$\eta_0 = \frac{[\xi^2 + \xi(0,64D_B + 0,36D_r)]_{\text{ср.вз}} \sqrt{m_0} H_T}{0,23K_p L_y}, \quad (5.13)$$

где  $\xi$  – толщина ледогрунтового ограждения, как средневзвешенная толщина ледопородного ограждения (толщина ледопородного ограждения рассчитывается для каждого геологического слоя по формуле (5.12)), м;

$D_B$  – вертикальный диаметр, м;

$D_T$  – горизонтальный диаметр, м;

Для эскалаторных тоннелей диаметром равным 10,5 м  $D_B=12,12$ м,  $D_T= 10,5$ м.

$l_{cp.вз.}$  – средневзвешенное значение, принимается равным 0,15 [87,88];

$H_T$  – мощность замороженной толщи, м;

$L_y$  – длина мульды сдвижения в главном сечении, рассчитывается по формуле (5.6);

$m_0$  – параметр, определяющий крутизну склонов, для эскалаторных тоннелей равен  $0,287 \cdot 10^{-2} 1/м^2$ ;

$K_p$  – коэффициент разрыхления, принимается равным 1.

4. Распределение оседаний и деформаций по формулам (5.14) – (5.16):

$$S(z) = (1 + 12,307 z^2) e^{-8,743z^2} \quad (5.14)$$

$$i(z) = \frac{\eta_{max}}{L} S'(z) \quad (5.15)$$

$$k(z) = \frac{\eta_{max}}{L^2} S''(z) \quad (5.16)$$

где  $S(x)$  – единичная функция распределения оседаний земной поверхности в сечении мульды сдвижений;

$z=x/L$  ( $L$  – длина полумульды,  $x$  – абсцисса рассматриваемой точки, начало координат в точке максимального оседания);

$i(z)$  и  $k(z)$  – наклоны и кривизна соответственно.

## 5.6 Апробация предложенной методики прогноза для эскалаторных тоннелей города Санкт-Петербург

По предложенной инженерной методике, полученной по результатам проведенного исследования произведен расчет для эскалаторных тоннелей Санкт-петербургского метрополитена, пройденных при помощи замораживания грунтов. Прогнозные параметры процессов сдвижений по прогнозной методике и данные натуральных маркшейдерских наблюдений сведены в Таблицы 5.3-5.6

### 5.6.1 Для эскалаторного тоннеля «Сенная»

Эскалаторный тоннель станции метро «Сенная» был построен в 1962 году, введен в эксплуатацию 1 июля 1963 года. Длина эскалаторного тоннеля составила 110 м диаметром 10,5 м, мощность четвертичных отложений 52 м, мощность нижней границы «Водонасыщенного» слоя 32 м, мощность замороженной толщ составила 55 м.

Таблица 5.3 – Параметры мульд сдвижений, полученных по предложенной методике расчета, для эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная»

Параметры	Расчетные значения	Фактические значения
Длина полумульды в главном продольном сечении, $L_x$ (м)	201	215
Длина полумульды в главном поперечном сечении, $L_y$ (м)	38	42/45
Длина полумульды максимальной ширины, $L_{y1}$ (м)	65,5	-
Положение точки максимального оседания от БВВ, $L$ (м)	38,1	39,6
Значение точки максимального оседания, $\eta_{max}$ (мм)	436	418

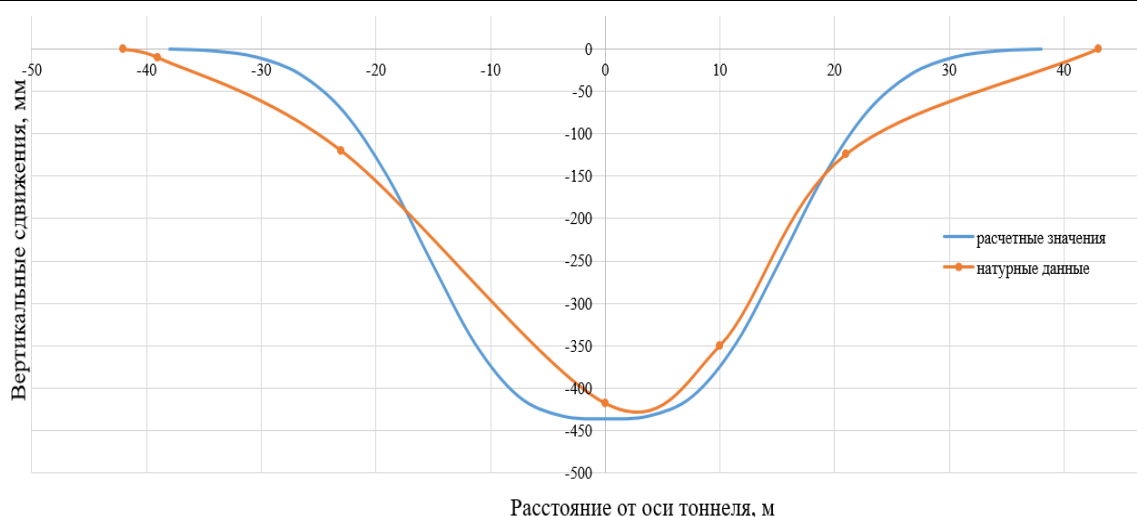


Рисунок 5.8 – Сравнение прогнозных мульд сдвижений и данных натурных маркшейдерских наблюдений для эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная» в главном продольном сечении

### 5.6.2 Для эскалаторного тоннеля «Садовая»

Эскалаторный тоннель станции метро «Садовая» был построен в конце 1980-х годов, введен в эксплуатацию 30 декабря 1991 года. Длина эскалаторного тоннеля составила 142 м диаметром 10,5 м, мощность четвертичных отложений 55 м, мощность нижней границы «Водонасыщенного» слоя 33,5 м, мощность замороженной толщи составила 58 м.

Таблица 5.4 – Параметры мульд сдвижений, полученных по предложенной методике расчета, для эскалаторного тоннеля станции метро «Садовая»

Параметры	Расчетные значения	Фактические значения
Длина полумульды в главном продольном сечении, $L_x$ (м)	210	202
Длина полумульды в главном поперечном сечении, $L_y$ (м)	39,9	43/41,4
Длина полумульды максимальной ширины, $L_{y_1}$ (м)	69,1	-
Положение точки максимального оседания от БВВ, $L$ (м)	39,8	39
Значение точки максимального оседания, $\eta_{max}$ (мм)	485	462

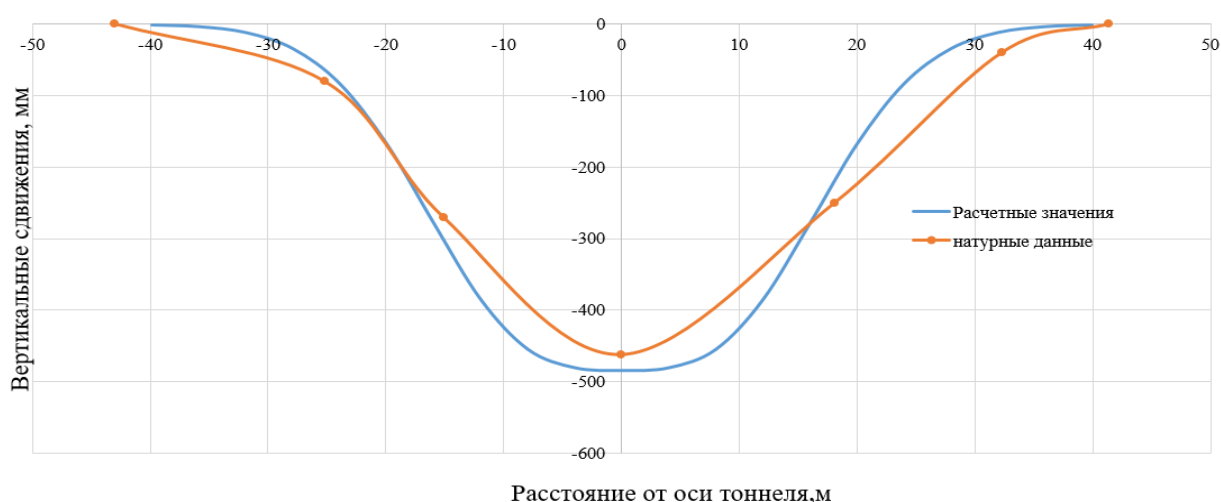


Рисунок 5.9 – Сравнение прогнозных мульд сдвижений и данных натурных маркшейдерских наблюдений для эскалаторного тоннеля станции метро «Садовая»

### 5.6.3 Для эскалаторного тоннеля «Проспект славы II»

Эскалаторный тоннель станции метро «Проспект Славы II» был построен в 2015 году, введен в эксплуатацию 3 октября 2019 года. Длина эскалаторного тоннеля составила 108 м диаметром 10,5 м, мощность четвертичных отложений 30 м, мощность нижней границы «Водонасыщенного» слоя 25,1 м, мощность замороженной толщи составила 33 м.

Таблица 5.5 – Параметры мульд сдвижений, полученных по предложенной методике расчета, для эскалаторного тоннеля станции метро «Проспект Славы II»

Параметры	Расчетные значения	Фактические значения
Длина полумульды в главном продольном сечении, $L_x$ (м)	133,4	137
Длина полумульды в главном поперечном сечении, $L_y$ (м)	29,9	31/32,2
Длина полумульды максимальной ширины, $L_{y1}$ (м)	39,3	-
Положение точки максимального оседания от БВВ, $L$ (м)	29,8	28,3
Значение точки максимального оседания, $\eta_{max}$ (мм)	405	380

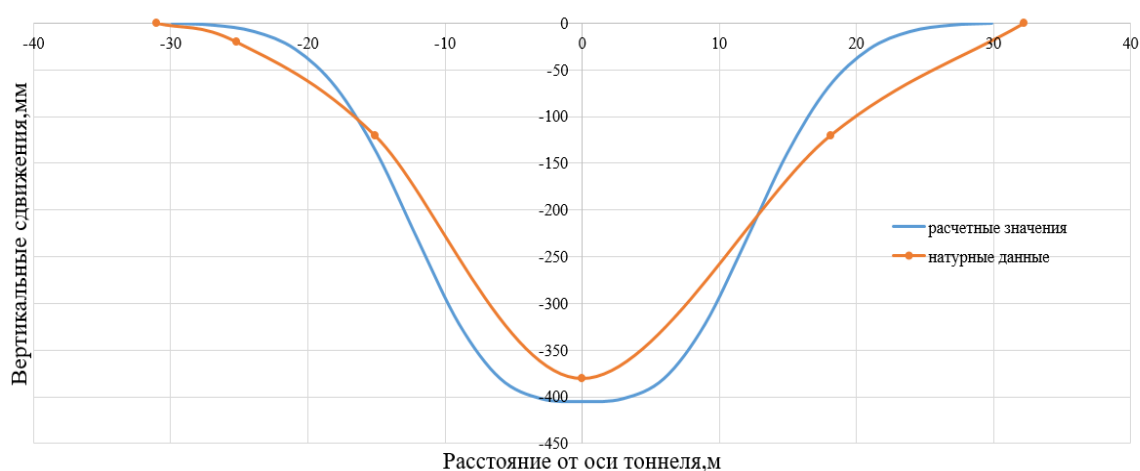


Рисунок 5.10 – Сравнение прогнозных мульд сдвижений и данных натурных маркшейдерских наблюдений для эскалаторного тоннеля станции метро «Проспект Славы II»

### 5.6.4 Для эскалаторного тоннеля «Международная»

Эскалаторный тоннель станции метро «Садовая» был построен в 2010 году, введен в эксплуатацию 28 декабря 2012 года. Длина эскалаторного тоннеля составила 142 м диаметром 10,5 м, мощность четвертичных отложений 28 м, мощность нижней границы «Водонасыщенного» слоя 22 м, мощность замороженной толщи составила 33 м.

Таблица 5.6 – Параметры мульд сдвижений, полученных по предложенной методике расчета, для эскалаторного тоннеля станции метро «Международная»

Параметры	Расчетные значения	Фактические значения
Длина полумульды в главном продольном сечении, $L_x$ (м)	133,4	130
Длина полумульды в главном поперечном сечении, $L_y$ (м)	26,2	28/27,3
Длина полумульды максимальной ширины, $L_{y_1}$ (м)	39,3	-
Положение точки максимального оседания от БВВ, $L$ (м)	26,2	24
Значение точки максимального оседания, $\eta_{max}$ (мм)	349	364

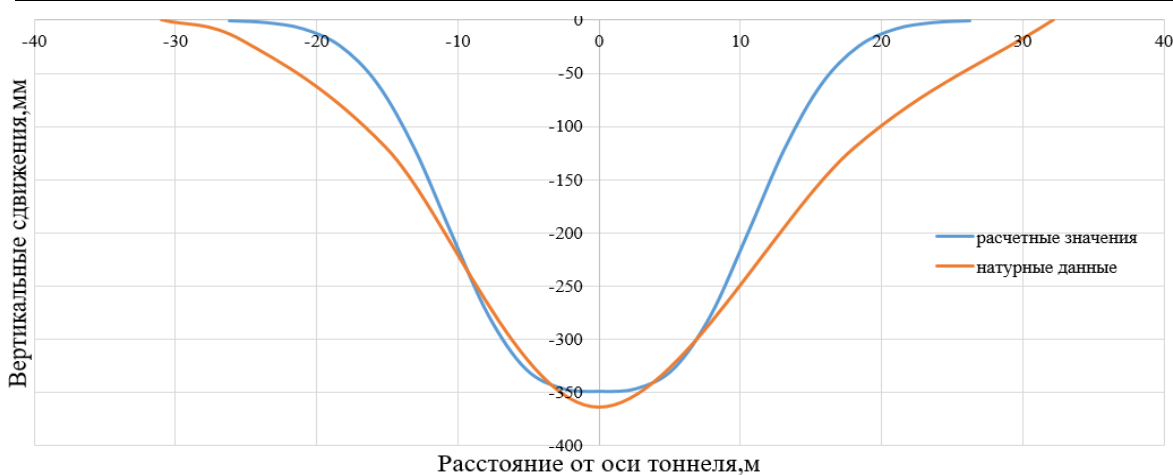


Рисунок 5.11 – Сравнение прогнозных мульд сдвижений и данных натурных маркшейдерских наблюдений для эскалаторного тоннеля станции метро «Сенная»

Максимальные значения отклонений расчетных значений от данных натуральных маркшейдерских наблюдений оседаний и границ мульд сдвижений в главных сечениях при проходке эскалаторных тоннелей в горно-геологических условиях города Санкт-Петербург не превышали 10%, полученная типовая кривая хорошо согласуется с данными натуральных маркшейдерских наблюдений.

### 5.7 Рекомендации по проведению натуральных маркшейдерских наблюдений

Форма мульд сдвижений на земной поверхности в первую очередь определяет необходимость закладывать профильные линии через точку максимального оседания. Для определения положения точки максимального оседания необходимо воспользоваться формулой (5.5) и рассчитать значения мульд сдвижений в главном продольном и главном поперечном сечении по формулам (5.6) и (5.7) и заложить профильные линии.

При проектировании наблюдательной станции для эскалаторных тоннелей способом замораживания необходимо закладывать дополнительные профильные линии (получен патент, Приложение В). На основе полученного патента и результатов численного моделирования, сформулированы рекомендации по закладке наблюдательной станции.

Так как форма мульды на земной поверхности принимает сложную форму (Глава 4), то в таком случае появляется необходимость закладки дополнительной профильной линии, перпендикулярной оси тоннеля, проходящей через точку максимальной ширины, мульда рассчитывается по формуле (5.11).

Положение точки максимальной ширины (Рисунок 5.12) можно рассчитать по формуле (5.17):

$$L_1 = \cdot ctg 30^\circ H_T, \quad (5.17)$$

где  $L_1$  – расстояние от БВВ;

$H_T$  – мощность замороженной толщи, м;

На Рисунке 5.13 показано положение точки максимального оседания и точки максимальной ширины в главном поперечном сечении.

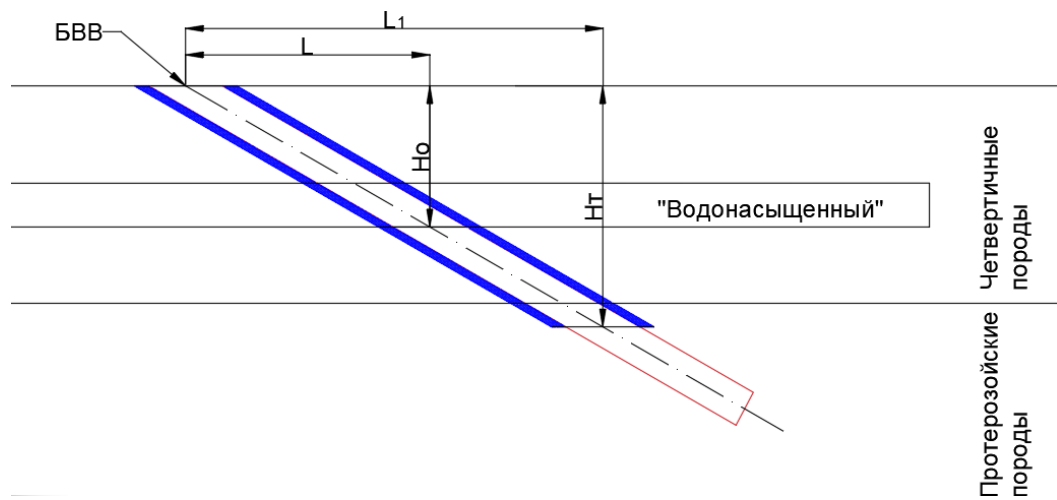


Рисунок 5.12 – Положение точки максимального оседания и точки максимальной ширины

На полученных профильных линиях, откладываются точки наблюдательной станции таким образом, чтобы сохранялась видимость между соседними реперами (расстояние между реперами рекомендуется принимать равным не более 10-15м).

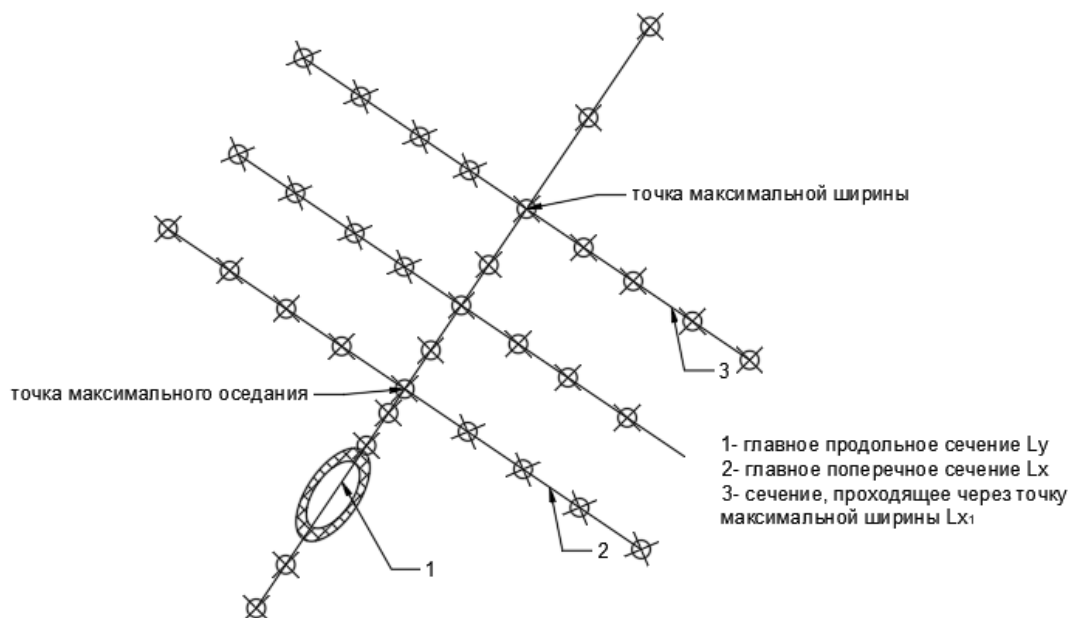


Рисунок 5.13 – Наблюдательная станция при сооружении эскалаторного тоннеля, пройденного с замораживанием грунтов



Для достоверной оценки границ мульд сдвижений рекомендуется на профильных линиях заложить дополнительно 1-2 репера, расположенных вне рассчитанной зоны деформаций.

Первичные наблюдения необходимо производить до включения холодильных установок (т.е. до начала активной стадии замораживания) путем нивелирования с точностью II класса в прямом и обратном направлении (за исходные высоты принимаются средние значения). Регулярное наблюдение за высотным положением точек наблюдательной станции (путем нивелирования III класса в одном направлении) и обеспечение их сохранности в период активной и пассивной стадии замораживания, а также в период естественного оттаивания, не только после сдачи объекта в эксплуатацию, позволит достоверно оценить границы мулды сдвижений и значения максимального оседания.

В условиях высоких скоростей проходки и наложения оседаний от эскалаторного тоннеля и строительства других подземных выработок, например, средне-станционного тоннеля, также осуществление мониторинга можно производить при помощи роботизированных тахеометров, которые позволяют в любой момент времени рассчитать оседания на земной поверхности [70].

## **5.8 Выводы по пятой главе**

– Для поиска закономерностей развития деформационных процессов и целей количественной оценки сдвижений с учетом основных выявленных факторов рассматриваемых в работе геомеханических процессов был применён комплексный подход подразумевающий одновременную обработку данных натурных маркшейдерских наблюдений и результатов численного моделирования с верификацией моделей, многовариантные расчёты на моделях с вариацией входных параметров и теоретическую оценку развития фронта замерзания и параметров деформации пучения. Вариация параметров моделей — структуры массивов, свойств пород, заданных деформаций и других параметров, определялась имеющимися данными инженерно-геологических изысканий, параметров технологии замораживания, данных деформационных наблюдений;

– Данный подход позволил оценить значения граничных углов, для построения зон влияния деформационных процессов, определить положение точки максимального оседания на земной поверхности и связав его с особенностями стратиграфии, оценить само значение максимального оседания;

– По результатам исследования предложена инженерная прогнозная методика оценки сдвижений и деформаций на земной поверхности для горно-геологических условий строительства эскалаторных тоннелей способом замораживания в г. Санкт-Петербург. Она учитывает строение массива горных работ, физико-механические свойства пород, технологию проходки и замораживания, показатели замораживания конкретных пород (грунтов) и особенности развития деформационных процессов в массиве. Методика позволяет оценить границы зон влияния на земной поверхности для этапа замораживания и для этапа оттаивания массива, определить величину и локализацию максимальных оседаний над тоннелем на момент стабилизации геомеханических процессов, рассчитать сдвижения и деформации в мульде. При этом достигается существенное повышение достоверности оценки деформаций: при апробации методики на четырех станциях метрополитена Санкт-Петербурга отклонение прогнозируемого максимального оседания от фактического не превышало 10%, отклонение в объёмах прогнозируемой и фактической мульды не превышало 15%.

– По результатам математического моделирования и выявленных ранее недостатков наблюдательных станций разработаны рекомендации по организации мониторинга деформаций за сдвижениями и деформациями на земной поверхности, которые позволят обеспечить оценку текущих уровней риска для подрабатываемых зданий и сооружений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное диссертационное исследование представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи разработки методики прогноза сдвижений и деформаций горных пород от эффектов искусственного замораживания при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена.

По результатам выполненных в диссертационной работе исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Строительство метрополитенов вынужденная мера для мегаполиса. При глубоком заложении линий метрополитена самой сложной с точки зрения возникновения деформаций является эскалаторный тоннель, сооружаемый по технологии замораживания.

2. Технология искусственного замораживания неустойчивых и обводненных грунтов в период нарастания ледопородного ограждения характеризуется проявлением больших и опасных деформаций пучения (до 250 мм на земной поверхности), а в период естественного оттаивания оседания на поверхности достигают 450 мм.

3. Выявлена группа факторов, оказывающих влияние на развитие деформационных процессов в массиве и на земной поверхности.

4. Произведена обработка данных натуральных маркшейдерских наблюдений, полученных при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов для эскалаторных тоннелей петербургского метрополитена. Выявлены недостатки применяемых в настоящее время методов натуральных маркшейдерских наблюдений. Сформулированы рекомендации по проектированию наблюдательных станций (получен патент).

5. Для решения задачи прогнозной оценки сдвижений и деформаций с учетом основных выделенных факторов предложен упрощенный подход, основанный на использовании численного моделирования методом конечных элементов с послойной оценкой параметров ледопородного ограждения по

уровню природной влажности пород и её вводом в модель в режиме заданных деформаций.

6. На основе данных математического моделирования выявлены закономерности развития сдвижений и деформаций в период активной и пассивной стадии замораживания и в период естественного оттаивания.

7. Комплексный подход обработки данных натурных маркшейдерских наблюдений и результатов математического моделирования позволил определить значения граничных углов, влияющих на образование зоны влияния деформационных процессов и определить положение точки максимального оседания на земной поверхности.

8. Предложена прогнозная методика оценки сдвижений и деформаций на земной поверхности для инженерно-геологических условий города Санкт-Петербург, позволяющая оценить границы влияния на земной поверхности от строительства эскалаторных тоннелей способом замораживания.

9. Предложенные методы расчёта позволяют осуществлять прогнозную оценку эффектов в мульде поднятий и мульде оседаний для разных входных параметров пород и показателей системы замораживания. Такой прогноз ориентирован на обеспечение защиты подрабатываемых зданий и сооружений при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов на всех его стадиях и комплексного решения вопросов охраны объектов наземной инфраструктуры.

10. Проведенные исследования показали сложность физических процессов в развитии формирования ледопородного ограждения и его последующего оттаивания, что открывает перспективы для выявления закономерностей и количественного описания процессов замораживания-оттаивания с учетом временного фактора для оценки сдвижений и деформаций.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авершин, С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами / С. Г. Авершин. – М. : Углетехиздат, 1954. – 324 с.
2. Авершин, С. Г. Расчет деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок / С.Г. Авершин. – Л.: ВНИМИ, 1960. – 87 с.
3. Акимов, А. Г. Определение размеров краевой части мульды сдвижения / А. Г. Акимов // Л.: ВНИМИ. – 1975 г. - № 96. - С. 28-32.
4. Акимов, А. Г. Современные методы расчета сдвижений и деформаций земной поверхности и способы охраны зданий и сооружений / А. Г. Акимов, М. В. Коротков // Л.: ВНИМИ. – 1970 г. – № 76. – С. 296–307.
5. Акимов, А. Г. Экспериментально-аналитический способ расчета деформаций в краевой части мульды сдвижения / А. Г. Акимов, А. Н. Давыдович // . – Л.: ВНИМИ. – 1972. - № 86. - С. 17-25.
6. Алексеев, С.И. Механика мерзлых грунтов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.buildcalc.ru/Learning/SoilMechanics/Open.aspx?id=Chapter5&part=2> (дата обращения 10.03.2021)
7. Ашихмин, С.Г. Научные основы методов прогноза напряженно-деформированного состояния горных пород при разработке метророждений нефти и газа: автореф.дисс. ... докт.техн.наук: 25.00.20 / Ашихмин Сергей Геннадьевич. – Пермь., 2008 – 42 с.
8. Безродный К. П. Особенности деформирования протерозойских глин / К. П. Безродный, С. Н. Сильвестров, Ю. М. Карташов // М.: Метрострой, 1982. – № 6. – С. 16-17.
9. Безходарнов, В.В. Применение геофизических методов для исследования свойств грунтов Среднего Приобья: автореф.дисс. ... канд.геол.-минерал.наук: 04.00.12 / Безходарнов Владимир Владимирович. – Томск., 1995 – 20 с.
10. Беляков, Н.А. Разработка метода прогноза напряженно-деформированного состояния обделок транспортных тоннелей в нарушенном массиве: автореф.дисс. ... канд.техн.наук: 25.00.20 / Беляков Никита Андреевич. – Спб., 2012 – 20 с.

11. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография / Г.Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008 – 696 с.
12. Волохов, Е. М. К вопросу оценки влияния объемных сил в расчетах напряженно-деформированного состояния массива при проходке в нем горных выработок / Е.М. Волохов // Маркшейдерский вестник. – 2003 г.– №3. – ISSN 2073-0098.
13. Волохов, Е. М. Прогноз сдвижений и деформаций массива горных пород и земной поверхности при сооружении городских тоннелей глубокого заложения: автореф.дисс. ... канд.техн.наук: 26.00.16 / Волохов Евгений Михайлович. – Спб., 2004 – 20 с.
14. Волохов, Е. М. Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений / Е.М. Волохов, С.Ю. Новоженин, Н.С. Бак // Записки Горного института. – 2012. – т.199. – С. 253–259. – ISSN 2411-3336.
15. Волохов, Е.М. Проблема оценки вредного влияния горных работ при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов / Е.М. Волохов, **Д.З. Мукминова** // Маркшейдерский вестник. – 2019г. – №2. – С. 47-55. – ISSN 2073-0098.
16. Волохов, Е.М. Расчет деформации земной поверхности в любом сечении мульды сдвижения на основе аналитического задания типовой кривой / Е.М. Волохов, Н.С. Бак, Е.С. Рожнов / Маркшейдерский вестник. – 2012г. – №3. – С. 44-49. – ISSN 2073-0098.
17. Гавриленко, Ю. Н. Комплекс программ метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования и анализа процессов деформирования массива горных пород и земной поверхности в условиях пластовых месторождений / Ю. Н. Гавриленко // Доклады III научно–технической конференции вузов Украины «Маркшейдерское обеспечение горных работ». – Донецк. – 1995. – С.31-35.
18. ГОСТ 12248–2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: введ. 01.01.2012. – М.: Стандартинформ, 2012. – 96 с.

- 19.ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости: введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 50 с.
- 20.ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний: введ. 01.07.2013 – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
- 21.ГОСТ 24846–81 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений: введ. 01.01.82. – М.: Изд–во стандартов, 1986. – 26 с.
- 22.Гусев, В. Н. Оценка последствий ведения горных работ и строительства подземных объектов метро на высоковольтные ЛЭП / В.Н. Гусев [и др.] // Маркшейдерский вестник. – 2012. – №5. – С. 45–50. – ISSN 2073-0098.
- 23.Гусев, В. Н. Расчет ожидаемых сдвижений и деформаций от строительства тоннелей метро в четвертичных отложениях г. Хошимина / В. Н. Гусев [и др.] // Маркшейдерский вестник. – 2012. – №5. – С. 51–53. – ISSN 2073-0098.
- 24.Гусев, В. Н. Сдвигение и деформации горных пород: Учеб. пособие / В. Н. Гусев, Е. М.Волохов // Санкт–Петербургский государственный горный институт (технический университет). – 2–е изд., исправленное. – СПб.: СПГИ, 2008. – 83 с.
- 25.Дать понятие о фильтрационной консолидации водонасыщенного грунта. Прогноз развития во времени осадок основания по теории фильтрационной консолидации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/6\\_107017\\_dat-ponyatie-o-filtratsionnoy-konsolidatsii-vodonasishchennogo-grunta-prognoz-razvitiya-vo-vremeni-osadok-osnovaniya-po-teorii-filtratsionnoy-konsolidatsii.html](https://studopedia.ru/6_107017_dat-ponyatie-o-filtratsionnoy-konsolidatsii-vodonasishchennogo-grunta-prognoz-razvitiya-vo-vremeni-osadok-osnovaniya-po-teorii-filtratsionnoy-konsolidatsii.html) (дата обращения 25.12.2020)
- 26.Дашко, Р.Э. Механика грунтов в инженерно-геологической практике: Учеб.для вузов / Р.Э. Дашко, А.А. Каган. – М.: Недра, 1977. – 237 с.
- 27.Долгих, М. В. Сдвигение земной поверхности при строительстве объектов метрополитена Санкт–Петербурга: дисс. ... канд.техн.наук: 05.15.01 /Долгих Михаил Владимирович. – Спб., 1999 – 168 с.

28. Дорман, А.Я. Из опыта применения искусственного замораживания грунтов на строительстве метрополитена / А.Я. Дорман // Мы строим метро. Сборник статей. – 1983 г.- С.99-105.
29. Достовалов, Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. – М.: Изд. МГУ, 1967. – 404 с.
30. Ершов, Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. – М.: Изд. МГУ, 1986. – 336с.
31. Замораживание горных пород при строительстве шахт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geologam.ru/industry/shaft/zamorazhivanie-gornyh-porod> (дата обращения 10.07.2020)
32. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов: ГКИНП(ГНТА)-03—10-03: утв. Приказом Федеральной службы геодезии и картографии России от 25.12.2003 г. № 181: введ. В действие 01.02.2004. – М. – 2004. – 244 с.
33. Инструкция по геодезическим и маркшейдерским работам при строительстве транспортных тоннелей [Текст] : ВСН 160–69 : введ. 01.04.70. – Минтрансстрой. – М. – 1970. – 60 с.
34. Инструкция по наблюдениям за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений: РД 07–166–97: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 17.09.97 № 29 : введ. в действие 17.09.97. – М. – 2002. – 42 с.
35. Иофис, М. А. Инженерная геомеханика при подземных разработках / М. А. Иофис, А. И. Шмелев. – М.: Недра, 1985. – 248 с.
36. Иофис, М. А. К вопросу о прогнозе и предотвращению последствий обрушения в тоннелях / М. А. Иофис // Тезисы докладов и сообщений круглого стола "Передовые технологии, оборудование и методы инженерно-геологических и геофизических изысканий и исследований при строительстве подземных сооружений", Москва, 14 мар. 2007 г. – С. 37–41.
37. Иофис, М. А. Повышение безопасности зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния горных работ [Электронный ресурс] / М. А. Иофис, А. В. Гришин // Предотвращение аварий зданий и сооружений, 2011. Режим



доступа: <http://pamag.ru/src/pb-zis-gorrab/pb-zis-gorrab.pdf>. (дата обращения 21.03.2019)

38. Иофис, М. А. Оценка, прогноз и контроль состояния грунтового массива при строительстве тоннелей / М. А. Иофис, П. А. Егоров // Труды Международной научно-практической конференции «Тоннельное строительство России и стран СНГ в начале века: Опыт и перспективы». – М. – 28–31 окт. 2002 г. – С. 499–502.
39. Кашко, А.В. Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния обделки эскалаторного тоннеля метрополитена в зоне строительства пешеходного перехода с использованием программного комплекса FLAC3D / А.В.Кашко, А.А.Кашко // Научные труды ОАО ЦНИИС. – М. – 2011. – №260. – С.93–104.
40. Кашников, Ю. А. Геомеханическая оценка состояния ответственных сооружений Тишинского рудника при отработке глубоких горизонтов / Ю. А. Кашников [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010 г. – № 2. – С. 43-53.
41. Кашников, Ю. А. Деформационные предвестники техногенных землетрясений при разработке месторождений углеводородов / Ю. А. Кашников [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011 г. – № 4. – С. 40-49.
42. Кашников, Ю. А. Разработка геолого-геомеханической модели турнейско-фаменского объекта Гагаринского месторождения / Ю. А. Кашников [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2013 г. – № 2.
43. Кашников, Ю. А. Управление процессом сдвижения горных пород при подработке борта карьера / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, Д. В. Шустов // Маркшейдерский вестник. – 2009 г. – №6. – С. 47-53. – ISSN 2073-0098.
44. Киреева, В.И. Оценка сдвижений и деформаций горных пород при сооружении перегонных тоннелей большого диаметра тоннелепроходческими механизированными комплексами в сложных горно-геологических условиях:

- дисс. ... канд.техн.наук: 25.00.16 / Киреева Вероника Игоревна. – Спб., 2016. – 198с.
45. Колбенков, С.П. Аналитическое выражение типовых кривых сдвижения поверхности / С. П. Колбенков // Труды ВНИМИ. – Л. – 1961. – №43
46. Котов, П.А. Компрессионное деформирование прибрежно-морских мерзлых грунтов при оттаивании (Европейский Север России, западная сибирь): дис. ... канд.геол.-минерал.наук: 25.00.08 / Котов Павел Игоревич. – М., 2014 – 149 с.
47. Кузнецов, Г. Н. Методические указания по измерению деформаций в моделях из эквивалентных материалов с помощью деформометров Д–2 и блочных тензометров ТБ–1 / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько. – Л. : ВНИМИ, 1961. – 30 с.
48. Курилко, А.С. Влияние циклов замораживания-оттаивания на массообменные свойства дисперсных горных пород: автореф.дисс. ... канд.техн.наук: 05.15.11 / Курилко Александр Сардокович. – Якутск., 2000 – 16 с.
49. Лиманов, Ю. А. Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах / Ю. А. Лиманов. – Л.: Изд.ЛИИЖТа, 1957. – 233 с.
50. Литвинский, Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: монография / ДонГТУ. –Донецк: Норд-Пресс, 2008 – 207 с.
51. Методы сооружения эскалаторных тоннелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metrostroy-spb.ru/technology/metro/614/> (дата обращения 15.12.2019).
52. Методы сооружения эскалаторных тоннелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metrostroy-spb.ru/technology/metro/614/> (дата обращения: 14.09.2018).
53. Механические модели грунтов hardening soil и soft soil – области применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geoinfo.ru/product/termartirosyan-armen-zavenovich/mekhanicheskie-modeli-gruntov-hardening-soil-i-soft-soil-oblasti-primeneniya-35132.shtml> (дата обращения 12.04.2021).
54. Мукминова, Д.З. Анализ влияния геомеханических процессов при использовании технологии искусственного замораживания грунтов на деформации обделки эскалаторных тоннелей / Д.З. Мукминова, Е.М. Волохов

// Маркшейдерия и недропользование. – 2021г. - №1. – С. 33-36. – ISSN 2073-3332.

55. **Мукминова, Д.З.** Анализ данных натуральных маркшейдерских наблюдений при сооружении эскалаторных тоннелей в Санкт-Петербурге // **Д.З. Мукминова, С.Ю. Новоженин** / Сборник статей VI международной научно-практической конференции. Пенза. – 2018. – С.268-272.
56. **Мукминова, Д.З.** Способ мониторинга развития пучений, вызванных строительством наклонных подземных горных выработок, пройденных с замораживанием грунтов / **Д.З. Мукминова** // Патент № 2738633, заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заяв. 08.06.2020: опубл. 15.12.2020, бюл. №35
57. Мустафин, М. Г. Геомеханическая модель системы «выработка – вмещающие породы» и ее использование при прогнозировании динамических проявлений горного давления / М. Г. Мустафин // Горная геомеханика и маркшейдерское дело / СПб. – ВНИМИ. –1999.
58. Новоженин, С. Ю. Анализ мульд сдвижения, полученных по результатам моделирования механизированной проходки эскалаторных тоннелей в Санкт-Петербурге / С.Ю. Новоженин // Маркшейдерско-геодезическое обеспечение рационального использования, охраны недр и строительства сооружений: межвуз. сб. науч. тр. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ).– 2013.– С. 24–30.
59. Новоженин, С.Ю. Прогноз сдвижений и деформаций горных пород при сооружении эскалаторных тоннелей метрополитена тоннелепроходческими механизированными комплексами: дисс. ... канд.техн.наук: 25.00.16 / Новоженин Сергей Юрьевич. – Спб., 2014. – 147 с.
60. Новоженин, С.Ю. Анализ натуральных данных при строительстве эскалаторных тоннелей в Санкт-Петербурге / С.Ю. Новоженин, **Д.З. Мукминова** // Маркшейдерский вестник. – 2015г. – №6. – С. 50-54. – ISSN 2073-0098.

- 61.ООО «Геотек» Компрессионные испытания грунта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 18.04.20063cf895b54673c99df6f6bfa2cd21d339.pdf (дата обращения 10.02.2021).
- 62.Организация строительства и основные средства механизации работ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.metro.ru/library/stroitelstvo\\_metropolitenov/478/](http://www.metro.ru/library/stroitelstvo_metropolitenov/478/) (дата обращения 05.11.2020)
- 63.Основания зданий и сооружений: СП 22.13330.2016: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ и введ. 17.06.2017. – М. – 2016г. – 228 с.
- 64.Панфилов, Д. В. Методика прогнозирования деформаций земной поверхности при сооружении транспортных тоннелей на основе пространственного моделирования: автореф.дисс. ... канд.техн.наук: 05.23.11 / Панфилов Денис Викторович. – М., 2005 – 20 с.
- 65.Подаков, В. Ф. О мерах предупреждения возможных деформаций городских зданий при строительстве метрополитена в Ленинграде / В.Ф. Подаков. – Л. : ВНИМИ, 1966.
- 66.Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена / В. Ф. Подаков, Ю. Ф. Соловьев, В. М. Капустин [и др.]. – Л., Стройиздат. – 1973. – 72 с.
- 67.Потемкин, Д.А. Обоснование толщины ледопородного ограждения в слоистом массиве с учетом теплофизических свойств пород и технологических параметров замораживания: дисс. ... канд.техн.наук: 05.15.04 / Потемкин Дмитрий Александрович. – СПб., 1999 – 102 с.
- 68.Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных выработок на угольных месторождениях: ПБ 07-269-98: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 16.03.98 №13. – СПб. – 1998. – 291 с.

- 69.Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге: ТСН 50-302-2004: введ. распоряжением Комитета по строительству Правительства Санкт-Петербурга от 05.08.04 № 11. – Спб. – 2004г. – 59 с.
- 70.Резник, Б. Е. Непрерывные геодезические измерения деформаций строительных конструкций эксплуатируемых сооружений / Б. Е. Резник // Геопрофи. – 2008. – №4. – с. 4–10.Современные способы замораживания грунтов с применением твердых криогенов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sposoby-zamorazhivaniya-gruntov-s-primeneniem-tverdyh-krioagentov/viewer> (дата обращения: 12.01.2021)
71. Современные способы замораживания грунтов с применением твердых криогенов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sposoby-zamorazhivaniya-gruntov-s-primeneniem-tverdyh-krioagentov/viewer> (дата обращения: 12.01.2019)
- 72.Сергеев, А.С. О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды [Электронный ресурс] / А.С. Сергеев, Б.С. Юшков // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 1, №1 (2014). – DOI: 10.15862/02TS114. – Режим доступа: <http://t-s.today/PDF/02TS114.pdf> (дата обращения 15.01.20210)
- 73.Сильвестров С.Н. Опыт исследования методом эквивалентных материалов осадок поверхности при сооружении тоннелей метрополитена с искусственным замораживанием пород [Текст] / С.Н. Сильвестров // Изд. ЛИИЖТа. – Л. – 1957. – С. 41-53.
- 74.Сильвестров, С.Н. Осадки поверхности земли при сооружении эскалаторных тоннелей метрополитена с применением искусственного замораживания пород: дисс. ... канд.техн.наук: 05.00.00 /Сильвестров Сергей Николаевич. – Ленинград., 1964 – 244 с.
- 75.Сильвестров, С.Н. Осадки поверхности при сооружении эскалаторных тоннелей с искусственным замораживанием пород и мероприятия по их уменьшению / С.Н. Сильвестров // Изд. ЛИИЖТа. – Л. – 1957. – С. 54-70.

76. Строительство Красносельско-Калининской линии метрополитена от ст. «Казаковская» до ст. «Обводный канал -2» с электродепо «Красносельское» для государственных нужд Санкт-Петербурга. Проектная документация / В.А. Макаров, М.Ю. Губин // Спб: ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2014. – 46 с.
77. Строкова, Л.А. Определение параметров численного моделирования грунтов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-dlya-chislennogo-modelirovaniya-povedeniya-gruntov/viewer> (дата обращения: 14.01.2021)
78. Трупак, Н.Г. Рождение метода искусственного замораживания грунтов / Н.Г. Трупак, П.А. Васюков // Мы строим метро. Сборник статей. – 1983 г. – С. 95-98.
79. Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1974, 280 с.
80. Трупак, Н.Г. Проведение горных выработок специальными способами / Н.Г. Трупак. – М.: Угдехиздат, 1956, 320 с.
81. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
82. Физика процесса пучения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sground.ru/fizika-processa-pucheniya/> (дата обращения 01.03.2021)
83. Хуцкий, В. П. Методика прогноза оседаний и деформаций земной поверхности при сооружении тоннелей метрополитена / Сб. науч. тр. ОАО "ВНИИ Галургии" : Т.1. – СПб. – 2001. – С. 65–79
84. Хуцкий, В. П. Сдвигание земной поверхности при строительстве пересадочных узлов метрополитена в условиях Санкт-Петербурга: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Хуцкий Виктор Павлович. – СПб., 2003 – 20 с.
85. Цытович, Н.А. Методические рекомендации по исследованию осадков оттаивающих грунтов / Н.А. Цытович, И.Н. Вотяков, В.Д. Пономарев. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 56 с.

- 86.Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973 – 450 с.
- 87.Цытович, Н.А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах / Н.А. Цытович. – М.: изд. АН СССР, 1958. -168 с.
- 88.Чевереv, В.Г. Физико-химическая теория формирования массообменных и тепловых свойств криогенных грунтов: автореф.дисс. ... докт.геол.-минерал.наук: 04.00.07 / Чевереv Виктор Григорьевич. – М., 1999 – 40 с.
- 89.Шашкин, А.Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А.Г. Шашкин – М.: Издательство «Академическая наука», 2014. – 352 с.
- 90.Шуплик, В.Н. Современные способы замораживания грунтов с применением твердых криоагентов [Электронный ресурс] / В.Н. Шуплик, В.Н. Борисенко // 2004. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sposoby-zamorazhivaniya-gruntov-s-primeneniem-tverdyh-krioagentov/viewer> (дата обращения 15.02.2019)
- 91.Improved analytical prediction of ground frost heave during tunnel construction using artificial ground freezing technique, Tunn. Undergr / H. Cai, Z. Liu, S. Li, T. Zheng // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019, – V.92 – DOI: 10.1016/j.tust.2019.103050
- 92.**Mukminova, D.** Analysis of escalator tunnels deformations, when exposed to soils freezing // **D.Mukminova**, E. Volohov / E3S Web of Conferences 135, 01046(2019) ITESE-2019. – 2019. – V.135. – P. DOI:10.1051/e3sconf/201913501046
- 93.**Mukminova, D.** Evaluation problem of harmful effects in mining works during constraction of subway escalator tunnels with the help of soils freezing method // **D.Mukminova**, E. Volohov / Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues / 1st Edition, 2019, P.82-90. DOI:10.1201/9781003017226-12
- 94.PLAXIS 3D. Научное пособие. 2019 / Plaxis bv / отпечатано ООО "НИП–Информатика"; под ред. R.B.J. Brinkgreve. – 2019. – 100 с.
- 95.PLAXIS 3D. Руководство пользователя. 2012 / Plaxis bv / отпечатано ООО "НИП–Информатика"; под ред. R.B.J. Brinkgreve. – 2012. – 670 с.

96. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. 2017 / Plaxis bv / отпечатано ООО "НИИП–Информатика"; под ред. R.V.J. Brinkgreve. – 2017. – 100 с.
97. PLAXIS CE V20. Пособие по моделям материалов. 2020 / Plaxis bv / отпечатано ООО "НИИП–Информатика"; под ред. R.V.J. Brinkgreve. – 2020. – 238 с.
98. Ranganathan, A. The Levenberg–Marquardt Algorithm [Электронный ресурс] / А. Ранганатан. 2004. – 6 с. – Режим доступа: <http://www.ananth.in/docs/lmtut.pdf> (дата обращения 26.11.2019)
99. Salimi A. R. Analysis of a TBM Tunneling Effect on surface subsidence : a case study from Tehran, Iran [Электронный ресурс] / A. R. Salimi, M. Esmaeili, B. Salehi // International Science Index Vol: 7, 2013. Режим доступа: <http://www.waset.org/publications/5046> (дата обращения 09.12.2020)
100. Volohov E. M. Methods of tunneling excavation modeling on the basis of the finite element method in estimating of the earth's surface displacements and strains above the tunnels / E. M. Volohov, S. U. Novozhenin, N. S. Bak // XI International ISM Congress. – vol.1. – 2013. – P.611–617
101. Walter H. Design of the shotcrete tunnel lining of a metro station – safety considerations [Электронный ресурс] / H. Walter // IGT – Geotechnik und Tunnelbau, Consulting Engineers, Salzburg. Режим доступа : <http://www.zthw.at/wb/media/Taborstrasse/waldstn.pdf>. (дата обращения 25.09.2018)

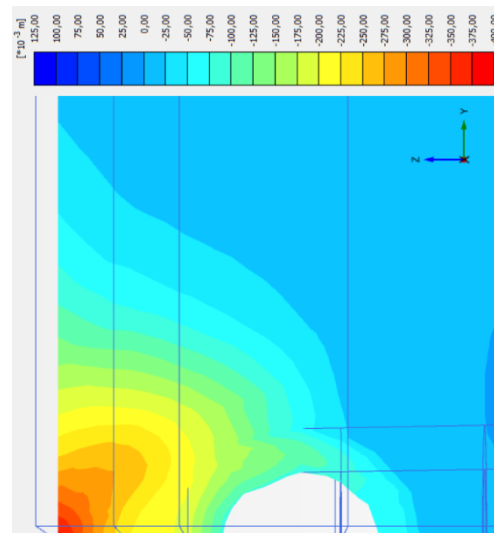
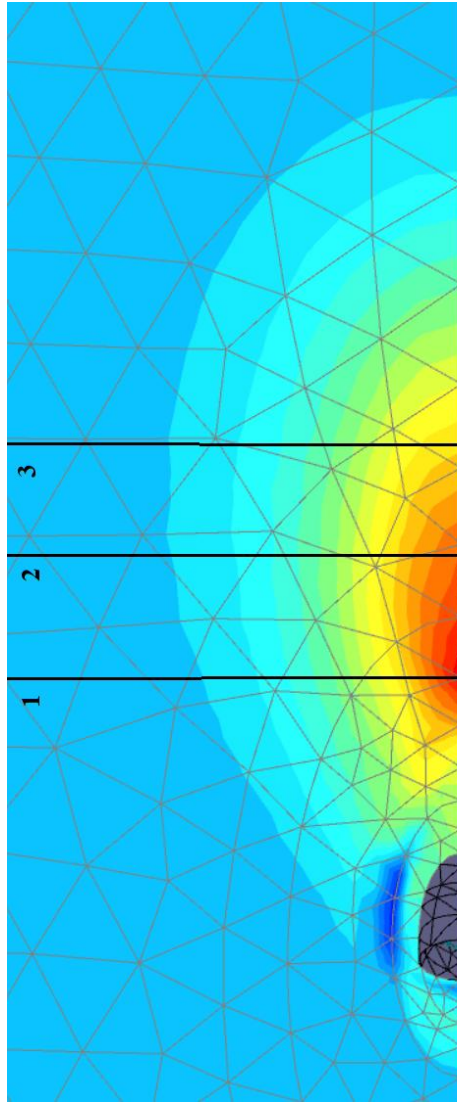


**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Параметры мульд сдвижений для эскалаторных тоннелей, пройденных с помощью искусственного замораживания грунтов в городе Санкт-Петербург**

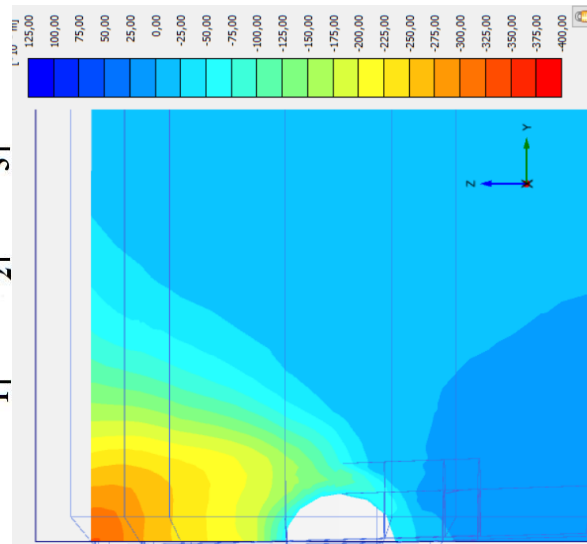
Параметры мульды	Эскалаторные тоннели						Международная
	Сенная	Садовая	Литовский проспект	Проспект Славы I	Проспект Славы II	364	
$\eta_{\max}$ на момент окончания	418	462	258	380	380	380	364
Деформации наклонов, б/р	0,0131	0,0148	0,0086	0,0053	0,0048	0,0039	0,0039
Деформации кривизны, 1/м	0,0006	0,00072	0,00044	0,0004	0,0005	0,0013	0,0013
Размеры мульды по оси тоннеля, м	215 м	202 м	>110 м	>90 м	137 м	130 м	130 м
Размеры полумульд перпендикулярно	42/45	43/41,4	50/-	-	31/32,2	28/27,3	28/27,3
Положение точки максимального оседания (расстояние от БВВ), м	39,6	39	26,4	28	28,3	24	24

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

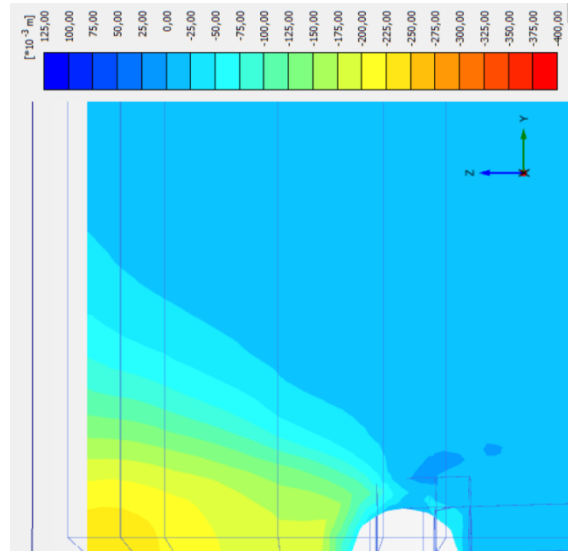
Распределение оседаний на земной поверхности и в породном массиве при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Проспект Славы Ш»



1-1



2-2



3-3

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Способ мониторинга развития пучений, вызванных строительством наклонных подземных выработок, пройденных с замораживанием грунтов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 738 633**<sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
E21C 39/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
E21C 39/00 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020118827, 08.06.2020

(24) Дата начала отчета срока действия патента:  
08.06.2020Дата регистрации:  
15.12.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.06.2020

(45) Опубликовано: 15.12.2020 Бюл. № 35

Адрес для переписки:  
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, В.О., 21  
линия, д. 2, Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Мукминова Диана Зинуровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2472930 C1, 20.01.2013. SU 1790645 A3, 23.01.1993. RU 2012853 C1, 15.05.1994. RU 2155866 C1, 10.09.2000. GB 2253707 A, 16.09.1992. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений, разработано ВНИМИ ВНИПИгорцветмет. - М.: Недра., 1988, 112 с.

(54) СПОСОБ МОНИТОРИНГА РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ СТРОИТЕЛЬСТВОМ НАКЛОННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК, ПРОЙДЕННЫХ С ЗАМОРАЖИВАНИЕМ ГРУНТОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к горной промышленности и может быть использовано для определения вертикальных сдвижений (пучений) и деформаций земной поверхности вследствие строительства подземных наклонных горных выработок, пройденных способом замораживания грунтов, имеющих непосредственный выход на земную поверхность. Изобретение относится к горной промышленности и может быть использовано для определения вертикальных пучений и деформаций земной поверхности вследствие строительства подземных наклонных горных выработок, пройденных способом замораживания грунтов, имеющих непосредственный выход на земную поверхность. Способ включает закладку основных профильных линий в главных сечениях мульды и дополнительных профильных линий, располагаемых в других направлениях в пределах

гранц мульды сдвижения, зафиксированных через равные интервалы рабочими и опорными реперами, располагаемыми на концах профильных линий вне зоны сдвижения, систематические определения высотного положения рабочих реперов относительно опорных до начала и в период сдвижений земной поверхности, получение сдвижений, вычисление наклонов и кривизны соответственно как первой и второй производной от сдвижений. При этом до начала горнопроходческих работ определяют точку ожидаемого максимального оседания на земной поверхности в главном сечении мульды сдвижения, от которой закладывают главную продольную линию и главную поперечную линию, и дополнительные профильные линии перпендикулярно оси наклонного хода, в конце каждой профильной линии устанавливают реперы, которые находятся вне зоны действия

RU 2 738 633 C 1

RU 2 738 633 C 1