

На правах рукописи

Мукминова Диана Зинуровна



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

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Волохов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты:

Ашихмин Сергей Геннадьевич

доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, профессор;

Богомолова Наталья Николаевна

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I», кафедра "Инженерная геодезия", доцент;

Ведущая организация – Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт "Ленметрогипротранс", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 21 сентября 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 натуральных 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 натуральных 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 натуральных 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 «Казакская» Санкт-Петербургского метрополитена и проведения деформационных измерений.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, приведены защищаемые научные положения, изложены научная новизна и практическое применение работы.

В первой главе рассмотрены проблемы оценки сдвижений и деформаций горных пород и вредного влияния горных работ при строительстве эскалаторных тоннелей способом искусственного замораживания грунтов. Описаны существующие методы и выявлены их недостатки.

Во второй главе приведены методы натурных маркшейдерских наблюдений за сдвигами земной поверхности. Описаны наблюдательные станции, выявлены их недостатки и приведены рекомендации при проектировании наблюдательных станций за сдвигами для эскалаторных тоннелей, пройденных с замораживанием грунтов. Произведен анализ натуральных данных в рамках метода типовых кривых для активной и пассивной стадии замораживания и периода естественного оттаивания горных пород.

В третьей главе обосновано применение математического моделирования методом конечных элементов, описаны особенности моделирования для эскалаторных тоннелей, пройденных с замораживанием грунтов. Предложен упрощенный подход для моделирования активной и пассивной стадии замораживания, приведены результаты моделирования и описаны закономерности развития сдвижений и деформаций в массиве в период активной и пассивной стадии замораживания.

Четвертая глава посвящена моделированию в период естественного оттаивания горных пород, приведены результаты моделирования и описаны закономерности развития сдвижений и

деформаций в массиве в период естественного оттаивания горных пород.

В пятой главе на основе комплексного использования методов математического моделирования и натуральных маркшейдерских наблюдений предложена прогнозная методика для расчета сдвижений и деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов.

Основные результаты отражены в защищаемых положениях.

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.

Одним из основных факторов, влияющих на развитие пучений на поверхности и в массиве является толщина ледогрунтового ограждения. Замораживающие скважины пересекают несколько геологических слоев с различными физико-механическими и теплофизическими характеристиками, которые влияют на скорость нарастания льда. Для более точного прогноза пучений на земной поверхности необходимо знать толщину ледогрунтового ограждения для каждого геологического слоя, который пересекает эскалаторный тоннель. Д.А. Потемкиным предложена зависимость (формула 1), позволяющая рассчитать толщину ледопородного ограждения:

$$\xi(t) = -\frac{\lambda(T_c + T_{xl})}{\gamma(E_B W_0 + c(T_c - T_3))} t + \frac{7,67 \sqrt{\frac{c\lambda}{\gamma}} (T_3 - T_c)}{E_B W_0 + c(T_c - T_3)} \sqrt{t} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, кДж/м ч⁰С; W_0 – влажность, %; c – удельная теплоемкость, кДж/кг⁰С; γ – объемный вес, т/м³; T_{xl} – температура стенки замораживающей колонки, ⁰С; T_c – температура сублимации, ⁰С; T_3 – температура замерзания, ⁰С; E_B – скрытая теплота льдообразования, кДж/кг.

Данная формула позволяет рассчитать толщину ледопородного ограждения в момент времени t , учитывая физико-механические и теплофизические свойства массива.

Определяющим силовым фактором в расчетной схеме являются нагрузки, связанные с объемным расширением замороженных участков грунта. Главными параметрами в таком расчете являются геометрические размеры зоны замороженных пород и первичное удельное содержание влаги в породах. Ледопородное ограждение для разных геологических слоев нарастает с разной скоростью (рисунок 1), поэтому в слоистом неоднородном массиве с различными физико-механическими и теплофизическими свойствами толщину нарастающего ограждения на заданный момент времени будем рассчитывать для каждого слоя отдельно по секторам сложной геометрической формы (рисунок 2).

Для расчета объема замороженной толщи мощностью h воспользуемся формулой (2):

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

Из практических наблюдений при строительстве эскалаторных тоннелей можно заключить, что ледопородное ограждение нарастает несимметрично относительно замораживающей колонки, в среднем, на внутреннюю часть приходится 60% от общей толщины и 40% на внешнюю часть (см. рисунок 3).

На основании учета асимметрии нарастания ледопородного ограждения и рассчитанной толщины ледопородного ограждения для каждого геологического слоя был рассчитан объем замороженного сектора мощностью h и учета природной влажности пород. Введем обозначение r – радиус, на котором расположены замораживающие колонки, таким образом, получим выражение для расчета коэффициентов a_1 и a_2 по формуле (3):

$$a_1 = r - 0,6\xi_{pac} \text{ и } a_2 = r + 0,4\xi_{pac} \quad (3)$$

Далее находим объем замороженной толщи с учетом рассчитанной толщины ледопородного ограждения по формуле (4):

$$V' = 2\pi h ((r + 0,4\xi_{pac})^2 - (r - 0,6\xi_{pac})^2) = 4\pi h \xi_{pac} (r - 0,1\xi_{pac}) \quad (4)$$

Зная, что влажность — это отношение массы воды к массе породы, путем простых математических преобразований получим относительное изменение рассматриваемого объема или заданный показатель объемной деформации (для модельных расчётов) будет определяться следующим выражением (5):

$$\varepsilon_{vol} = \frac{0,09V'_e}{V} = \frac{0,09V'\rho W}{\rho_e(W+1)V} \quad (5)$$

где V' - объем замороженной толщ с учетом рассчитанной толщины ледопородного ограждения по формуле (1); ρ - плотность породы; W - влажность породы; ρ_e - плотность воды; V - объем замороженной толщ с учетом проектной толщины ледопородного ограждения.

Ввиду сложности реализации в моделях реального увеличения толщины ледопородного ограждения при построении модели для расчета сдвижений и деформаций, толщина ледопородного ограждения принималась постоянной (соответствующей проектной). Для моделирования реальных деформаций по каждому геологическому элементу по формуле (1) рассчитывалась своя (реальная) толщина ледопородного ограждения. В соответствии с предложенной выше упрощенной методикой находился показатель объемной деформации по формуле (3), для реализации режима заданной деформации для каждого слоя встроенными средствами программного комплекса Plaxis 3D.

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. Главное, что модели показали схожую динамику нарастания пучений по стадиям. Эту сходимость можно оценить по графикам рисунка 3. В целом по результатам моделирования максимальные пучения в точке ожидаемого максимального оседания на момент отключения холодильной установки составили 264 мм, а по натурным данным 245 мм (рисунок 4).

Распределение сдвижений характеризуется протяженной зоной максимальных сдвижений над сводом выработки (зона локализована примерно в 2-3 метрах над тоннелем в верхней четверти по его длине), здесь сдвижения достигают 400-500 мм (рисунок 5). 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.

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.

После достижения выработкой более устойчивых пород, холодильные установки отключаются и начинается период естественного оттаивания. Для этого периода 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, миграции грунтовых вод и породных частиц с ней.

Данных натурных маркшейдерских наблюдений не всегда достаточно для того, чтобы определить зону влияния от эффектов замораживания вследствие большой разреженности точек наблюдательной станции. Комплексный подход к анализу данных маркшейдерских наблюдений и математического моделирования может быть использован для определения граничного критерия. Для построенных моделей эскалаторных тоннелей станций метро «Казаковская», «Сенная», «Садовая», «Проспект Славы II» и «Международная» петербургского метрополитена был использован граничный критерий $\varepsilon_{гр} = i_{гр} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ для определения граничных углов. Данный критерий показал высокую сходимость с натурными маркшейдерскими наблюдениями, что доказывает достоверность выбора такого критерия.

В результате проведенных серий расчетов для разных геологических слоев с изменением глубины замораживающих колонок было определено, что граничные углы в главном продольном сечении равны $\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=28^\circ$ (рисунок 6). В продольных сечениях граничный угол равен $\theta_3=40^\circ$ (рисунок 7).

Мульду сдвижений для главного продольного сечения можно определить по формуле (6):

$$L_y = H_T (\operatorname{ctg}\theta_1 + \operatorname{ctg}\theta_2) + 2l_T + D_T \quad (6)$$

где H_T – мощность замороженной толщи, м; θ_1 и θ_2 – граничные углы, градус; l_T – проектная толщина ледопородного ограждения в горизонтальном сечении, для эскалаторных тоннелей диаметром 10,5 м $l_T=5,5$ м; D_T – горизонтальный диаметр эскалаторного тоннеля, для эскалаторных тоннелей диаметром 10,5 м $D_T=21$ м.

Мульда сдвижений для поперечного сечения определяется по формуле (7):

$$L_x = H_T \operatorname{ctg}\theta_3 \quad (7)$$

где H_T – мощность замороженной толщи в рассматриваемом сечении, м; θ_3 – граничный угол, градус.

Полученная формула для расчета мульды сдвижений в поперечном сечении позволяет описать зону влияния от эффектов замораживания. Согласно результатам математического моделирования, мульда сдвижений в плане имеет сложную форму, характеризующуюся с увеличением глубины заложения замораживающих скважин (рисунок 8).

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.

Строительство эскалаторных тоннелей способом замораживания характеризуется возникновением и постепенным развитием пучений в период активной и пассивной стадии

замораживания (рисунок 9) и постепенным развитием оседаний в период естественного оттаивания (рисунок 10).

Обработка данных натурных маркшейдерских наблюдений позволила обосновать применение метода типовых кривых для описания мульды сдвижения. Метод типовых кривых традиционно используется в маркшейдерской практике для оценки сдвижений и деформаций горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых.

Традиционно для определения формы кривой в главном поперечном сечении применяется метод типовых кривых. Существует множество показательных-степенных функций, для аналитического описания типовых кривых, предложенных С.Г. Авершиным, С.П. Колбенковым, А.Н.Павловым, С.Н.Бак и др.

Анализ данных натурных маркшейдерских наблюдений и математическое моделирование методом типовых кривых показал, что применение метода типовых кривых также может быть применен для строительства эскалаторных тоннелей способом искусственного замораживания пород. Зона распределений на земной поверхности в период активной и пассивной стадии замораживания и в период естественного оттаивания имеет сложную «яйцеобразную» форму, то распределение сдвижений в данном исследовании было описано не только в главном поперечном сечении (проходящем через точку максимального оседания), но в зоне максимальной ширины.

Выполненный анализ результатов данных натурных маркшейдерских наблюдений и результаты математического моделирования методом конечных элементов показал, что для условий города Санкт-Петербург может быть использована типовая кривая (формула 8), предложенная Н.С.Бак:

$$S(z) = (1 + az^2)e^{-bz^2} \quad (8)$$

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.

По результатам регрессионного анализа в программном комплексе MathCad при помощи оператора genfit по данным натурных маркшейдерских наблюдений, определены коэффициенты типовой кривой поднятий: $a=0,003$, $b=10,806$ и коэффициенты типовой кривой для оседаний: $a=12,307$, $b=8,743$. График полученных типовых кривых представлен на рисунке 11.

По данным натурных маркшейдерских наблюдений, было выявлено, что точка максимального оседания располагается на разных расстояниях от оси БВВ и зависит от инженерно-геологических условий, в которых сооружался тоннель. На основании анализа математического моделирования, было выявлено, что положение точки максимального оседания зависит от водонасыщенного слоя в толще четвертичных пород. Данный слой характеризуется высоким содержанием воды $W=36-42\%$ (содержание воды в четвертичных породах в среднем составляет 20-25%) и распространяется по всей территории Санкт-Петербурга.

Для оценки влияния водонасыщенного слоя на положение точки максимального оседания была проведена серия модельных экспериментов в программном комплексе Plaxis 3D с использованием разных геологических слоев Санкт-Петербурга, где указанный слой находился на разной глубине заложения.

Был сделан вывод о том, что положение точки максимального оседания находится как проекция на земную поверхность точки пересечения оси тоннеля и нижней границы водонасыщенного слоя и определяется по формуле (9):

$$L = ctg 30 \cdot H_o, \quad (9)$$

где L – расстояние от БВВ до точки максимального оседания; H_o – мощность четвертичных отложений от нижней границы водонасыщенного слоя. Схема к определению положения точки максимального оседания представлена на рисунке 12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **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. – 2021. - №1. – С.33-37.

2. Новоженин, С.Ю. Анализ натуральных данных маркшейдерских наблюдений при сооружении эскалаторных тоннелей, пройденных с замораживанием грунтов в городе Санкт-Петербург // С.Ю. Новоженин, **Д.З. Мукминова** / Маркшейдерский вестник. – 2015. - №6. – С.50-54

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **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

4. **Mukminova, D.** Evaluation problem of harmful effects in mining works during construction of subway escalator tunnels with the help of soils freezing method // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues / 1st Edition, 2019, P.82-90. DOI:10.1201/9781003017226-12

Публикации в прочих изданиях:

5. Волохов, Е.М. Проблема оценки вредного влияния горных работ при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов // Е.М. Волохов, **Д.З. Мукминова** / Маркшейдерский вестник. – 2019. - №2. – С. 47-55.

6. **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.

Патент:

7. Патент № 2738633 Российская Федерация, МПК E21C 39/00 (2006.01) E02D 31/00, E21C 39/00, E21B 47/00, G01B 9/00. Способ мониторинга развития пучений, вызванных строительством наклонных подземных горных выработок, пройденных с замораживанием грунтов: № 2020118827/03(031949): заявл. 08.06.2020: опубл. 15.12.2020 / **Мукминова Д.З.**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 13 с. : 3 ил.

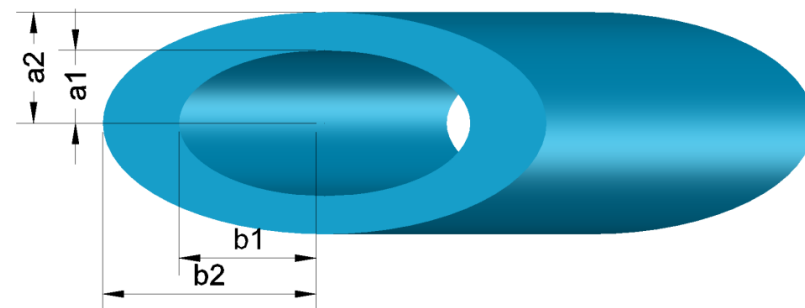
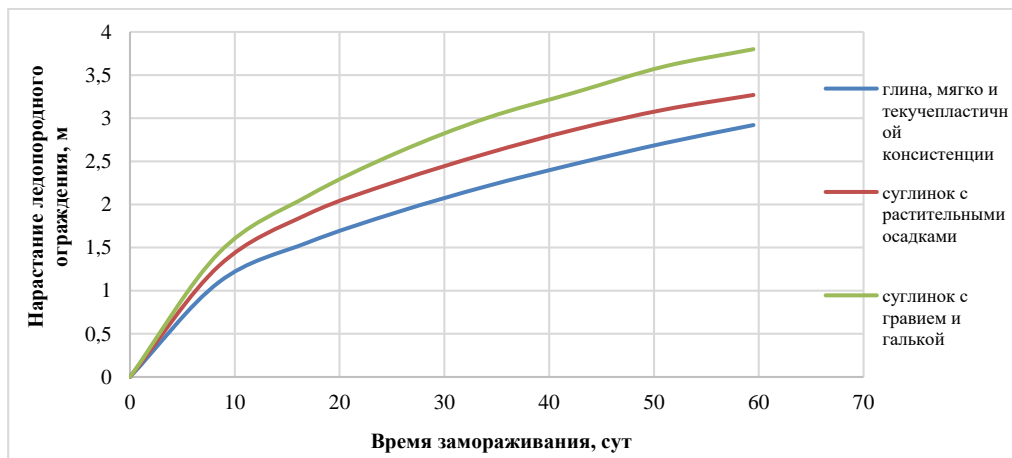


Рисунок 1 – Нарастание ледопородного ограждения от времени

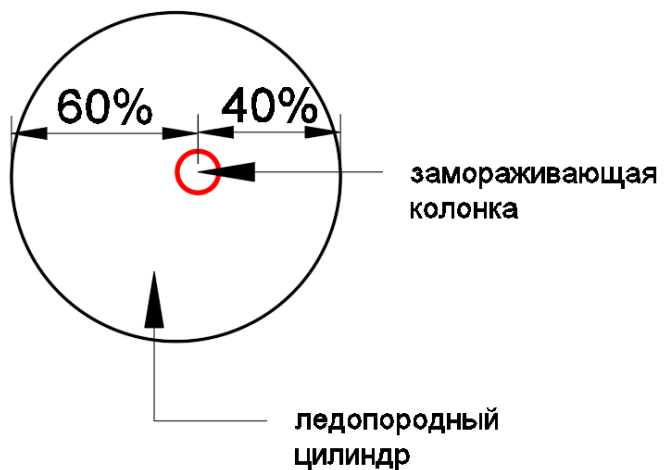


Рисунок 3 – Нарастание ледопородного ограждения вокруг замораживающей колонки

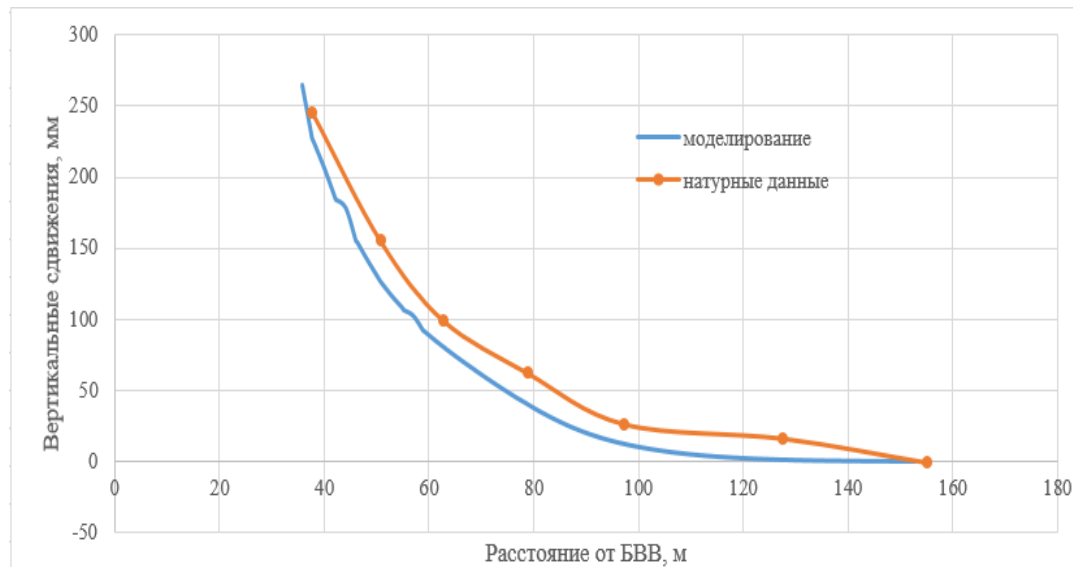


Рисунок 4 – Сравнение по натурным данным и данным моделирования на момент переключения холодильной установки

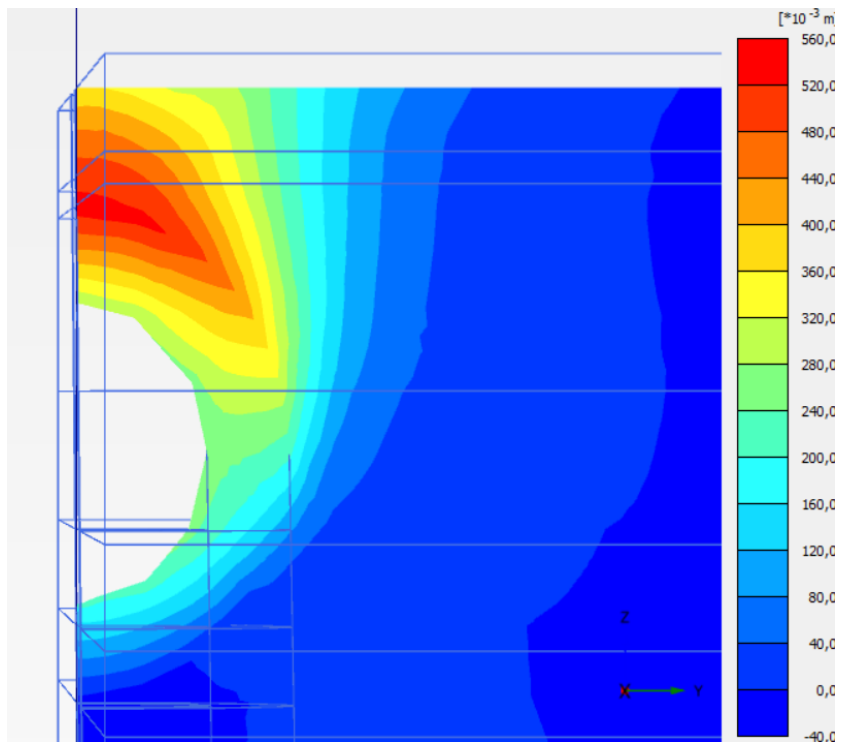


Рисунок 5 – Распределение вертикальных сдвижений в период пассивной стадии замораживая (для ст.метро «Казаковская», сечение через точку ожидаемого максимального оседания)

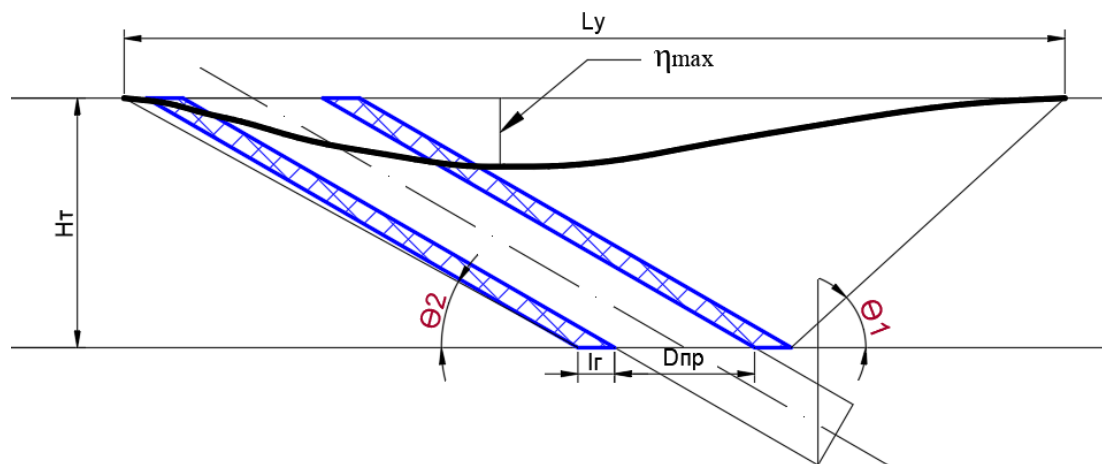


Рисунок 6 – Схематичное определение муьды сдвижений в главном продольном сечении

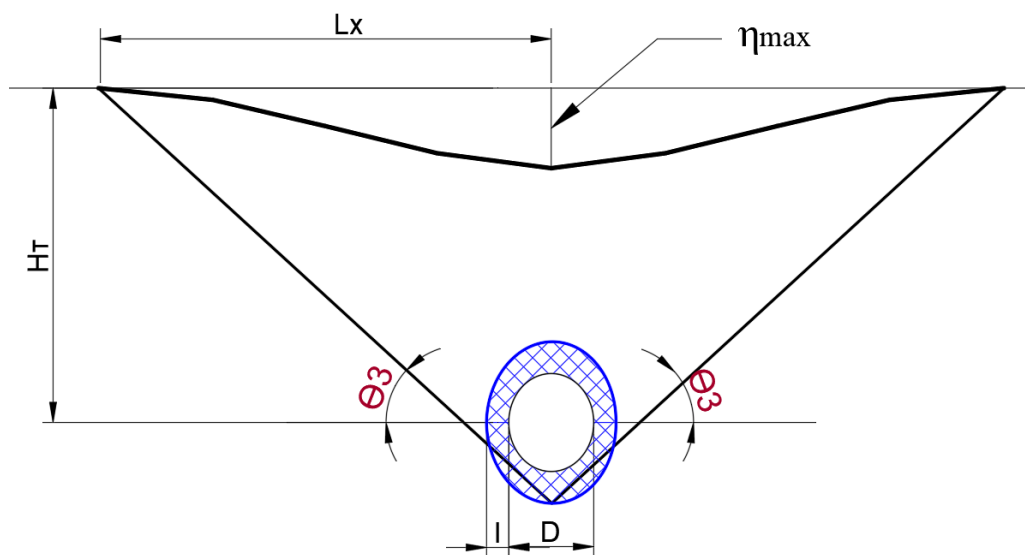
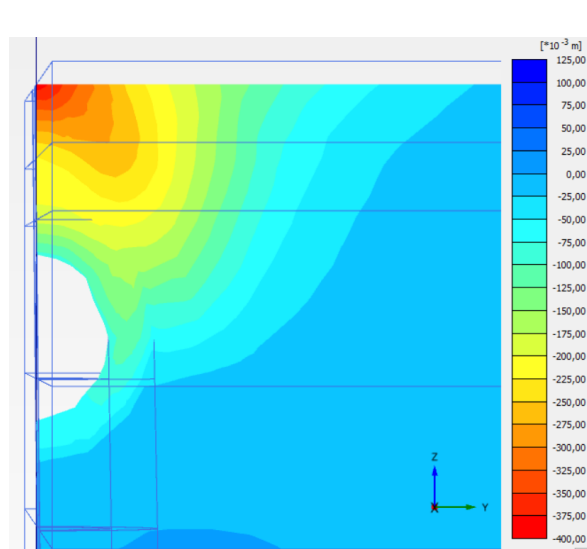
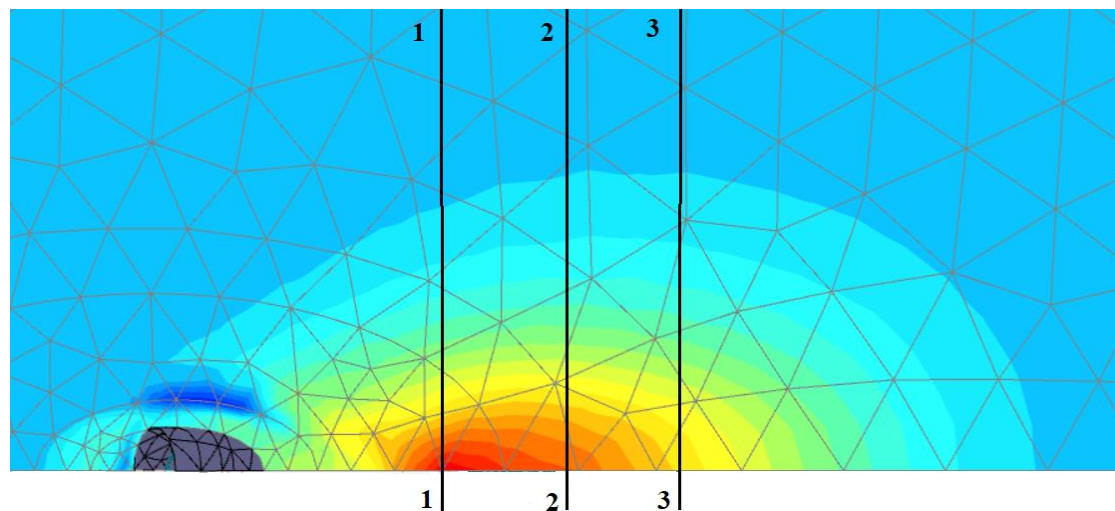
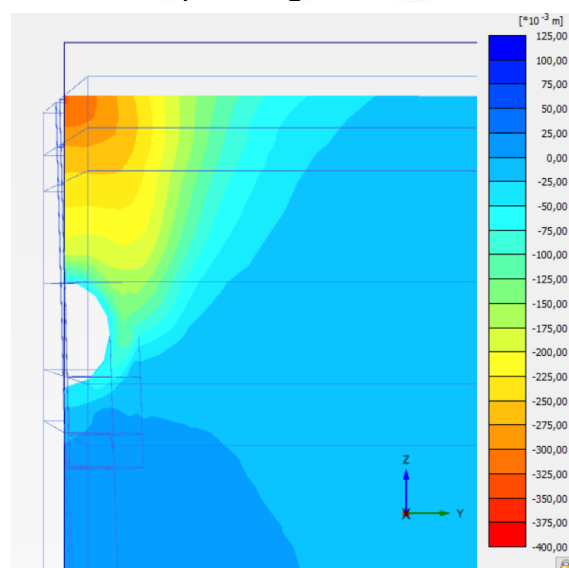


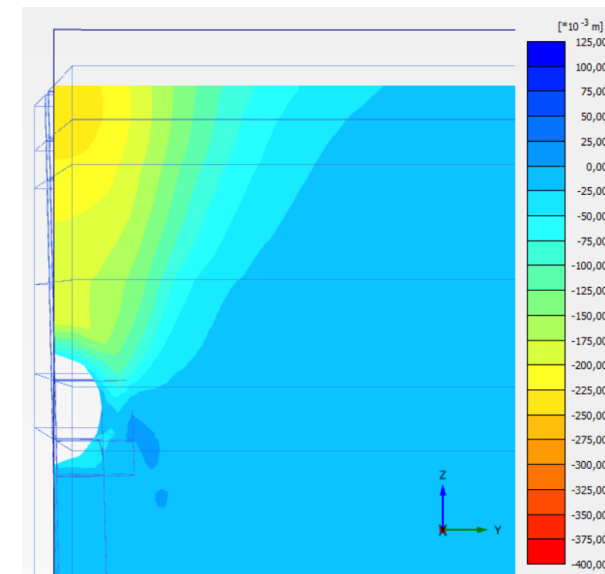
Рисунок 7 – Схематичное определение муьды сдвижений для поперечного сечения)



1-1



2-2



3-3

Рисунок 8 - Распределение оседаний на земной поверхности и в породном массиве при проходке эскалаторного тоннеля станции метро «Прспект Славы II»

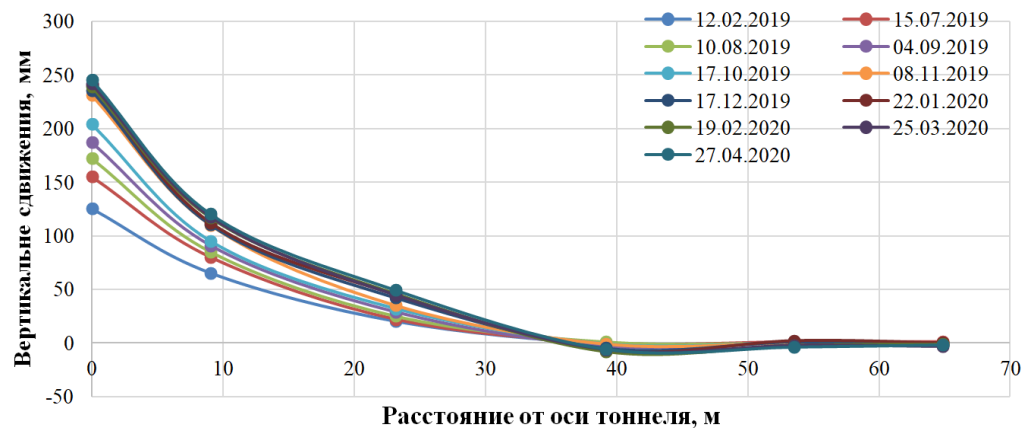


Рисунок 9 – Распределение пучений в главном поперечном сечении (для эскалаторного тоннеля станции метро «Казановская»)

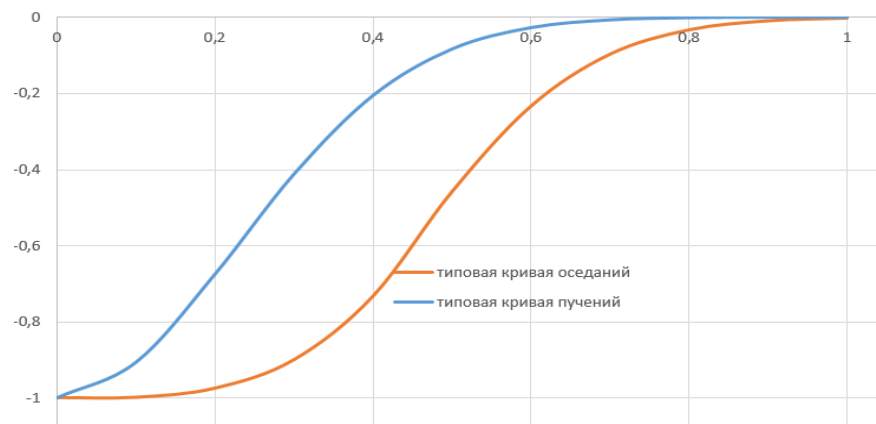


Рисунок 11 – Типовые кривые, построенные по данным натурных маркшейдерских наблюдений

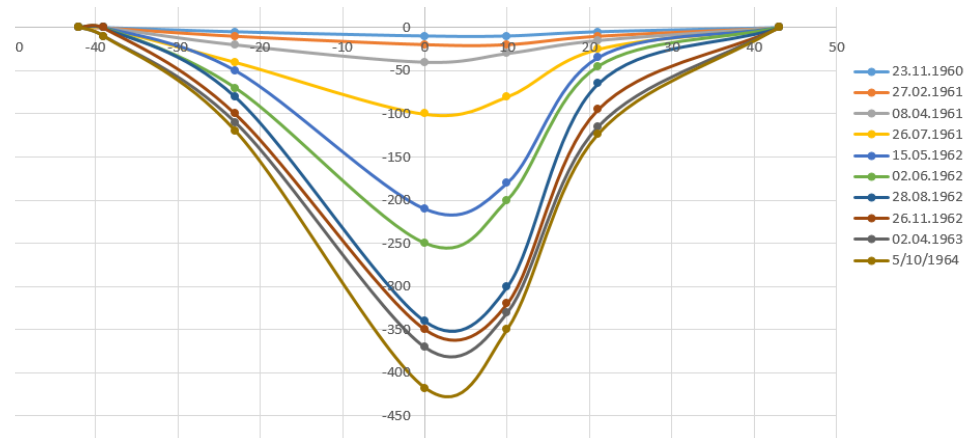


Рисунок 10 – Распределение оседаний в главном поперечном сечении (для эскалаторного тоннеля ст. метро «Сенная»)



Рисунок 12 – Схема к определению положения точки максимального оседания