



**Сокорнов Антон Александрович**

**МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ТОННЕЛЬНОЙ ОБДЕЛКИ НА УЧАСТКЕ  
СОПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕГОННОГО ТОННЕЛЯ СО СТАНЦИЕЙ  
МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и  
транспортных тоннелей

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

Санкт-Петербург  
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Научный руководитель: **Коньков Александр Николаевич**  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Овчинников Игорь Георгиевич**  
заслуженный деятель науки РФ, действительный член Российской академии транспорта, доктор технических наук, профессор базовой кафедры «АО Мостострой-11» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

**Кузнецов Анатолий Олегович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника, тоннели и метрополитены» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНС»», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» апреля 2026 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.53 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «23» марта 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.53,  
д.т.н., доцент

Баденко В.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В общем объеме объектов строительства на линиях метрополитена в Санкт-Петербурге значительную часть занимают подземные сооружения глубокого заложения. В настоящее время 85% всех станций метрополитена – глубокого заложения (средняя глубина заложения от поверхности до шельги свода – 51 м). Несмотря на плановый переход на мелкое заложение в окраинных районах города («Шушары», «Дунайская», «Зенит», «Беговая»), генеральный план развития транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга предусматривает строительство новых станций метрополитена в черте исторической застройки на глубоком заложении («Театральная», «Путиловская», «Заставская», «Знаменская», «Балтийская», «Суворовская» и др.).

В инженерно-геологическом отношении благоприятными условиями для строительства станций глубокого заложения являются устойчивые необводненные верхнекотлинские глины, залегающие в центральной части Петербурга на глубинах 30–40 метров. Глубина заложения станции назначается с учетом наличия защитной кровли глин над сводом, обеспечивающей технологическую безопасность строительства без применения специальных способов ведения работ. По причине больших пролетов станций и наличия над верхнекотлинскими глинами слабых слоев четвертичных отложений станционные конструкции рассчитываются на полный вес вышележащих грунтов. Над перегонными тоннелями метрополитена непосредственно на подходе к станциям мощность слоя верхнекотлинских глин колеблется в зависимости от типа и глубины заложения станции в пределах 15–35 м.

Важно отметить, что не существует единого метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена. Чаще всего выполняется проверка несущей способности усиленной обделки перегонного тоннеля, в предположении, что величина нагрузки на нее равна той, которая рассчитана для станционной обделки. При этом вопрос о протяженности участка усиленной обделки перегонного тоннеля, примыкающей к станции, в большинстве случаев принимается на основе опыта, приобретенного проектировщиками и производителями работ.

Определение напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля непосредственно на участке сопряжения со станцией метрополитена невозможно без понимания природы физического взаимодействия обделки и грунтового массива. Учесть геомеханические процессы распределения напряжений в грунтовом массиве на этом участке возможно путем выполнения специализированной научно-исследовательской работы. Результаты такого исследования имеют практическую значимость для разработки рациональных и экономически эффективных решений с точки зрения несущей способности и материалоемкости тоннельных конструкций Петербургского метрополитена.

Таким образом, разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со

станцией метрополитена является актуальной задачей для отрасли подземного строительства.

**Степень разработанности.** Научно обоснованные представления о закономерностях формирования и реализации механических процессов в грунтовых массивах при строительстве подземных сооружений сложились благодаря исследованиям Б. З. Амусина, И. В. Баклашова, Н. С. Булычева, Б. А. Картозии, Ю. М. Либермана, С. Г. Лехницкого, Ю. А. Лиманова, В. Е. Меркина, В. М. Мосткова, А. Г. Оловянного, К. В. Руппенейта, А. Г. Протосени, Н. Н. Фотиевой, К. Terzaghi, L. Rabcewicz, L. Müller, F. Pacher, G. Sauer, P. Lunardi, S. Ch. Möller, K. Schikora, Sang Duk Lee, Yong Fang, Yixian Wang, Xinrong Liu.

Исследованию процессов деформирования грунтовых массивов в окрестности подземных сооружений Ленинградского и Петербургского метрополитена, разработке методов прогноза геомеханических процессов и определению напряженного состояния обделок станций и перегонных тоннелей посвящены работы: Б. З. Амусина, К. П. Безродного, П. А. Деменкова, А. Н. Конькова, Е. Г. Козина, Н. И. Кулагина, Ю. С. Фролова, Т. В. Иванес, А. П. Ледяева, Д. В. Кунца, В. И. Ларионова, М. О. Лебедева, А. К. Поправко, А. Г. Протосени, В. А. Маслака, Г. А. Скобенникова, Ю. А. Филонова, М. А. Карасева и др.

Однако теоретические аспекты вопроса оптимального участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена в основном опираются на эмпирику и строительный опыт, ввиду чего такой подход приводит к увеличению материалоемкости тоннельных конструкций. Добиться эффективных проектных решений возможно только путем разработки метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена.

**Цель** диссертационного исследования заключается в разработке метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена глубокого заложения в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга для снижения материалоемкости конструкций тоннельной обделки.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» по пункту б: совершенствование методов расчета конструкций, сооружений и их элементов: земляного полотна, пути, оснований, опор, дорожного и аэродромного покрытий, пролетных строений, защитных покрытий, тоннельной обделки, несущих, подпорных и ограждающих конструкций, средств организации движения, водопропускных труб, галерей и т.п., на статические и динамические воздействия природного и техногенного происхождения, включая расчеты напряженно-деформированного состояния и водно-теплового режима, грунтовых массивов, металлических, бетонных и железобетонных конструкций, гидравлического и ледового режимов акваторий мостовых переходов.

**Объект исследования:** тоннельная обделка перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена глубокого заложения.

**Предмет исследования:** методы расчета напряженно-деформированного состояния подземных сооружений, включая метод конечных элементов и метод учета начальных деформаций выработки.

**Научная задача** исследования заключается в разработке методики оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку и методики физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения.

Для достижения поставленной цели определены и решены следующие **задачи:**

- разработка методики оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку;

- создание численной модели участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения методом конечных элементов с целью изучения распределения действующих на обделки нагрузок от горного давления;

- разработка методики физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения;

- создание физической модели участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения методом эквивалентных материалов для верификации результатов численного моделирования;

- определение оптимальной протяженности участка перегонного тоннеля, на котором необходимо устраивать обделку повышенной несущей способности;

- разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена.

**Научная новизна диссертации** определяется разработкой метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена, *учитывающего* параметры начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку; *отличающегося* полученными аналитическими уравнениями и установленными закономерностями распределения нагрузок от горного давления на тоннельные обделки; *позволяющего* повысить точность расчета параметров напряженно-деформированного состояния тоннельных обделок на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения в объемной постановке с учетом параметров проходки тоннелей и снизить материалоемкость строительных конструкций тоннельной обделки.

**Теоретическая значимость** результатов исследования заключается в дальнейшем развитии методов расчета тоннельной обделки на статические воздействия природного происхождения, включая расчеты напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов.

**Практическая значимость** результатов исследования состоит в том, что разработанные рекомендации могут быть внедрены в проектировании станций метрополитена глубокого заложения для расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля с учетом параметров его проходки, а также границ области влияния тоннельной обделки станции метрополитена на перегонные тоннели для определения рациональных и экономически эффективных решений с точки зрения несущей способности и материалоемкости конструкций.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку.

2. Методика физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения.

**Методология и методы исследований.** Для решения поставленных в работе задач применялись методы теории механики грунтов и механики подземных сооружений. Для создания численных моделей применялся метод конечных элементов, реализованный в специализированном геотехническом программном комплексе Midas GTS NX. Для решения уравнений совместности деформаций в системе «обделка – грунтовый массив» в комбинации с методом конечных элементов в работе использована компьютерная программа CONTACT, разработанная при участии автора. Верификация результатов численного анализа выполнялась на физической модели, созданной с применением метода эквивалентных материалов.

**Достоверность** результатов обеспечивается соответствием исходных данных при численном и физическом моделировании существующим конструктивно-технологическим решениям, принятым в метростроении, соответствием физико-механических характеристик моделируемого грунтового массива результатам лабораторных испытаний; применением апробированных на практике методов теории механики грунтов и механики подземных сооружений, методов расчета тоннельных обделок, применением сертифицированного программного комплекса для исследований на численных моделях, использованием сертифицированного измерительного оборудования для исследований на физической модели; сходимостью расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена глубокого заложения с данными физического моделирования и натурных испытаний.

**Личный вклад автора** состоит в обосновании цели, объекта, предмета, научной задачи, научной новизны, теоретической и практической значимости исследования, в анализе научной литературы по вопросам численного и физического моделирования тоннельных обделок, включая значительное число иностранных работ. В диссертации самостоятельно проанализированы конструктивно-технологические параметры станций метрополитена и перегонных тоннелей глубокого заложения; выполнен анализ физико-механических характеристик грунтового массива; разработана методика оценки параметров

начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку; обоснована допустимость численного и физического моделирования тоннельных обделок из железобетонных тубингов приведенными сечениями для достоверного определения нагрузок от горного давления; выполнено создание численной модели участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения методом конечных элементов с целью изучения распределения действующих на обделки нагрузок от горного давления; разработана методика физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения; осуществлен подбор и проведены лабораторные испытания эквивалентных материалов грунта и обделок для создания физической модели участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения методом эквивалентных материалов; проведен эксперимент над физической моделью для верификации результатов численного моделирования; установлена оптимальная протяженность участка перегонного тоннеля с обделкой повышенной несущей способности; разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена, включающий методику оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку и методику физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения.

**Апробация работы.** Содержание и основные положения работы докладывались на научно-технических семинарах кафедры «Тоннели и метрополитены»; на LXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (Санкт-Петербург, 2014 г.); на LXXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (Санкт-Петербург, 2019 г.); на VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы автоматизированного проектирования на транспорте» (Санкт-Петербург, 2019 г.); на E3S Web Conf. Volume 157, 2020, Key Trends in Transportation Innovation (КТТИ-2019); на LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (Санкт-Петербург, 2020 г.); на III Бетанкуровском международном инженерном форуме (Санкт-Петербург, 2021 г.); на LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (Санкт-Петербург, 2023 г.); на Международной научно-практической конференции «Проблемы прочности материалов и конструкций», посвященной 160-летию кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций» и 170-летию Механической лаборатории имени профессора Н. А. Белелюбского (Санкт-Петербург, 2024 г.).

**Внедрение результатов работы.** Теоретические результаты исследования использованы при выполнении госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ в Петербургском государственном университете путей

сообщения императора Александра I (Отчет о научно-исследовательской работе «Методика оценки и снижения возможного негативного влияния наземного строительства в охранной зоне эксплуатируемых подземных сооружений метрополитена». Федеральная программа: Научно-технологическое развитие Российской Федерации. Рег. № НИОКТР 122012700115-6. 2021 г; Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка рекомендаций по снижению негативного влияния и обоснованию уровня допустимых дополнительных воздействий на сооружения метрополитена от наземного строительства в их охранной зоне». Федеральная программа: Научно-технологическое развитие Российской Федерации. Рег. № НИОКТР 122121500075-4. 2022 г.; Технический отчет «Геотехнический прогноз (оценка) влияния нового строительства: «Объект бытового обслуживания, расположенного по адресу: г. Санкт-Петербург, Фрунзенский район, Бухарестская улица, участок 1, (северо-западнее пересечения с улицей Турку)» – на объекты метрополитена и на изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива, вмещающего объекты метрополитена, с прочностным расчётом в пространственной постановке»». Шифр 7067 от 08.11.2021), а также включены в учебные курсы по дисциплинам «Механика подземных сооружений», «Моделирование и расчет подземных сооружений» и «Применение BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла тоннелей» для студентов, обучающихся по специальности 23.05.06 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» по специализации «Тоннели и метрополитены».

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 5 статей в научных изданиях, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в SCOPUS.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем составляет 149 страниц, работа содержит 76 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 126 источника, из которых 51 – на иностранных языках.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована цель, объект и предмет исследования, определена научная задача, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования.

**В первой главе** диссертации выполнено исследование инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга, а также объемно-планировочных и конструктивно-технологических решений станционных комплексов глубокого заложения Петербургского метрополитена. Установлено, что средняя глубина заложения станций Петербургского метрополитена составляет 51 м до шельги свода, а величина толщи ненарушенных верхнекотлинских глин над станционными комплексами в среднем составляет 16 м, изменяясь от 10 до 30 м и более.

Строительство станционного комплекса может производиться в разной последовательности, начиная с проходки станционных выработок, а затем

перегонных тоннелей, либо наоборот – с проходки перегонных тоннелей, а затем возведения стационарных конструкций. В рамках диссертационной работы рассмотрена конструктивно-технологическая схема, при которой вначале сооружается перегонный тоннель (до участка будущей торцевой стены), а после его проходки – стационарный тоннель с торцевой стеной.

Сложность аналитических решений задачи о напряженно-деформированном состоянии системы «обделка тоннелей – торцевая стена – грунтовый массив» с учетом последовательности раскрытия выработки стационарного тоннеля и сопряжения его с перегонным тоннелем вынуждает прибегать к различного рода допущениям, идеализирующим действительную физическую картину явления. Те же недостатки присущи и плоским моделям метода конечных элементов, что существенно снижает точность решения задачи и достоверность результатов. В связи с этим принимаемые проектные решения во многом опираются на эмпирику и строительный опыт. Такой подход к решению многокритериальной задачи приводит к неоправданно завышенным объемам работ и увеличению материалоемкости обделки перегонного тоннеля. Добиться эффективных проектных решений возможно только при учете в теоретических исследованиях с большей точностью и достоверностью конструктивно-технологических особенностей узла сопряжения станции с перегонными тоннелями, влияющих на характер формирования напряженно-деформированного состояния системы «обделка тоннелей – грунтовый массив». Поэтому особое значение приобретают научные методы исследования с использованием численного моделирования в пространственной постановке задачи, а также сочетания аналитических решений и 3D-численного моделирования с последующей верификацией результатов на физических моделях.

Необходимость разработки метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена заключается в том, что существующий метод численного моделирования не позволяет количественно учесть параметры начальных деформаций выработки, а следовательно, и выполнить грамотную оценку напряженно-деформированного состояния системы «перегонный тоннель – стационарный комплекс – грунтовый массив». В задачу диссертационного исследования входит разработка метода, который позволил бы уйти от качественного расчета к количественной оценке напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена глубокого заложения.

**Во второй главе** диссертации выполнен анализ существующих аналитических методов определения нагрузок от горного давления на тоннельные обделки. Для этого рассмотрено три конструктивных варианта расположения перегонных тоннелей на удалении от станций глубокого заложения – колонной, односводчатой и пилонной. Величина ненарушенной кровли верхнекотлинских глин над стационарными комплексами принята как средняя для станций глубокого заложения Петербургского метрополитена и составляет 16 м. Мощность вышележащих грунтов применялась разной: 20, 30 и 40 м.

Грунтовый массив представлен однородным, изотропным, квазисплошным. Значения физико-механических характеристик верхнекотлинских глин приняты средними, длительными, с учетом «масштабного эффекта» и коэффициента структурной нарушенности:

- объёмный вес грунта,  $\gamma = 2,2 \text{ т/м}^3$ ;
- усредненный объёмный вес вышележащих грунтов,  $\gamma_Q = 1,9 \text{ т/м}^3$ ;
- нормативный угол внутреннего трения в массиве,  $\varphi^H = 23^\circ$ ;
- сцепление,  $C = 100 \text{ кПа}$ ;
- коэффициент крепости по Протодяконову,  $f = 1,5$ ;
- предел прочности на сжатие в образце,  $\sigma_c = 2,00 \text{ МПа}$ ;
- коэффициент структурной нарушенности массива,  $K = 0,7$ ;
- предел прочности на сжатие в массиве,  $\sigma_{cm} = 1,40 \text{ МПа}$ ;
- коэффициент Пуассона,  $\nu = 0,23$ ;
- секущий модуль упругости,  $E_{50} = 200 \text{ МПа}$ ;
- модуль общей деформации,  $E_o = 100 \text{ МПа}$ ;
- модуль длительной деформации,  $E_\infty = 50 \text{ МПа}$ ;
- удельный коэффициент упругого отпора,  $K_o = 80 \text{ кгс/см}^3$ ;
- показатель пластичности  $P = 2,00$ ;
- время ретардации,  $t_p = 30 \text{ сут}$ .

В соответствии с требованиями нормативной документации (СП 120.13330.2022 «СНиП 32-02-2003 Метрополитены», далее – СП) выполнены построения сводов обрушения над перегонными тоннелями и определена нагрузка от горного давления. Установлено, что во всех моделях своды обрушения над перегонными тоннелями на подходах к станционным комплексам не пересекаются. При этом мощность верхнекотлинских глин над перегонными тоннелями превосходит тройные высоты сводов обрушения, что, во-первых, свидетельствует о правомерности применения гипотезы сводообразования, а во-вторых позволяет определять нагрузку от горного давления на обделки перегонных тоннелей без учета вышележащих слабых грунтов.

В отношении обделок станционных тоннелей аналитический метод определения величины нагрузок от горного давления основан на исходном предположении, что обделка станции воспринимает нагрузку от веса всего столба грунтов над сводом станции. Таким образом, нагрузки от горного давления на обделку станции превышают нагрузки на обделку перегонных тоннелей вне станционного комплекса примерно в десять раз.

Вместе с определением нагрузок от горного давления по СП выполнен расчет по методу механики подземных сооружений в программе CONTACT, разработанной на кафедре «Тоннели и метрополитены» при участии автора и внедренной в учебный процесс в 2014 году. Программа позволяет оценить величины вертикальных нагрузок от горного давления и перемещений в системе «обделка – грунтовый массив» с учетом технологии проходки. На удалении от станционного комплекса рассмотрена щитовая проходка с блочной обделкой, обжатой на грунт из лотка.

Для определения вертикальных нагрузок от горного давления на обделку перегонного тоннеля  $p$  решается уравнение совместности деформаций  $u$  контура выработки и наружного контура обделки:

$$u_m(p) = u_0(t) + u_k(p) \quad (1)$$

Графически это уравнение представляет собой пересечение двух функций –  $u_m(p)$  и  $[u_0(t) + u_k(p)]$  (рисунок 1).

График равновесных состояний массива  $u_m(p)$  характеризует множество сочетаний величин горного давления  $p$  и соответствующих им значений смещений контура выработки  $u$ , при которых массив, ослабленный выработкой, находится в равновесии. В упругопластической геомеханической модели график  $u_m(p)$  может быть описан уравнением:

$$u_m(p) = \frac{R}{2G} \left( \gamma H + \frac{\sigma_c}{\alpha} \right) \left( \frac{R_e}{R_c} \right)^2 \left( \frac{R_c}{R} \right)^{\beta+1} \sin \varphi \quad (2)$$

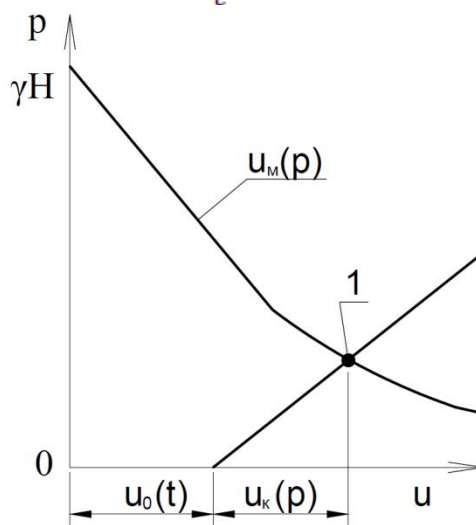


Рисунок 1 – Графическое решение уравнения совместности деформаций: 1 – точка равновесного состояния системы «обделка – грунтовый массив»

$$\left( \frac{R_c}{R} \right)^\alpha = \left[ \frac{2\gamma H - \sigma_c}{2p} (1 - \sin \varphi) \right] \left( \frac{R_c}{R_e} \right)^\alpha - \frac{\sigma_c}{\alpha p} \left[ 1 - \left( \frac{R_c}{R_e} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

$$\left( \frac{R_e}{R_c} \right)^{\alpha+2} = \Pi_\varepsilon \left\{ 1 - \frac{1 - 2\nu}{\sin \varphi} \left[ \left( \frac{R_e}{R_c} \right)^\alpha - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

где  $R$  – радиус выработки;  $G$  – модуль сдвига грунта;  $\gamma H$  – вертикальная компонента начального напряженного состояния;  $\sigma_c$  – временное сопротивление;  $\alpha$  и  $\beta$  – прочностные параметры, зависящие от угла внутреннего трения  $\varphi$ ;  $R_e$  – радиус зоны пластических деформаций;  $R_c$  – радиус зоны разрушения грунта на контуре выработки;  $\Pi_\varepsilon$  – показатель пластичности;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Функция  $u_0(t)$  описывает начальные деформации незакрепленной выработки и определяется с учетом времени установки и разжатия кольца обделки  $t$  непосредственно за оболочкой щита с учетом деформации грунта на величину зазора между внешним контуром щита и обделкой, образующимся до момента её разжатия на грунт по формуле:

$$u_0(t) = \frac{3\gamma H}{2 E_0} R \left[ \frac{E_0}{E_\infty} + \left(1 - \frac{E_0}{E_\infty}\right)^{-\frac{t}{t_p}} \right] K_1 K_2 + 0,25d \quad (5)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий влияние способа выемки грунта;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий отставание сооружения обделки от забоя;  $d$  – толщина оболочки щита.

Функция  $u_k(p)$  соответствует графику линейно нарастающего сопротивления обделки и выражается через коэффициент жесткости  $K_{ж}$ :

$$u_k(p) = \frac{p}{K_{ж}} \quad (6)$$

Расчеты показали, что на глубине заложения перегонных тоннелей ~50–60 м значения вертикальных нагрузок от горного давления на обделку, определенные по разным методикам и геомеханическим моделям близки по значению. При меньшей глубине заложения расчет вертикальных нагрузок от горного давления по методике СП приводит к завышенным результатам.

При этом существующие аналитические методы решают исключительно плоские задачи и не позволяют выполнить оценку напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена глубокого заложения в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

**В третьей главе** диссертации разработана методика оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку, а также методика физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена.

Для разработки метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена необходимо решить основную проблему численного моделирования методом конечных элементов, а именно проблему учета начальных деформаций выработки, которые возникают за время разработки грунта и установки постоянной обделки. Для получения достоверных значений горного давления на обделку в численной модели необходимо искусственным образом понизить начальное напряженное состояние массива, приложив к нему некое «противодавление», формирующее начальные деформации контура выработки.

В международной практике численного моделирования такой метод известен под названием  $\beta$ -метода. Автором предложена методика, основанная на определении значения  $\beta p$  аналитическими методами, реализованными в программе CONTACT. На начальном этапе исследований выполнена оценка влияния основного допущения программы – равностороннего давления в грунтовом массиве (коэффициент бокового давления  $\lambda (K_0) = 1$ ) – на достоверность получаемых результатов путем построения графиков равновесных состояний массива методом конечных элементов при различных коэффициентах бокового давления.

В программном комплексе Midas GTS NX построена плоская конечно-элементная модель грунтового массива, сложенного верхнекотлинскими глинами с выработкой кругового очертания диаметром 5,5 м. Вышележащие четвертичные отложения представлены равномерно-распределенной нагрузкой, величина которой варьировалась в дальнейших расчетах.

Графики равновесных состояний массива строились как *эпюры* следующим образом. На начальном этапе расчета (одинаковом для всех расчетных случаев) вычислялось начальное напряженное состояние массива при заданной величине пригрузки модели. Затем на последующих этапах расчета изнутри контура выработки прикладывались «противодавления»  $\beta p$ . Для построения одного графика последовательно решалось 9 задач с разными значениями  $\beta p$ , начиная с величины начальных напряжений в массиве до практически нулевых значений. Каждой величине  $\beta p$  соответствовала своя деформация шелыги свода выработки. Всего построено три эпюры равновесных состояний массива при разных значениях коэффициента бокового давления  $\lambda (K_0)$ : 0,7, 0,5 и 0,35 (рисунок 2).

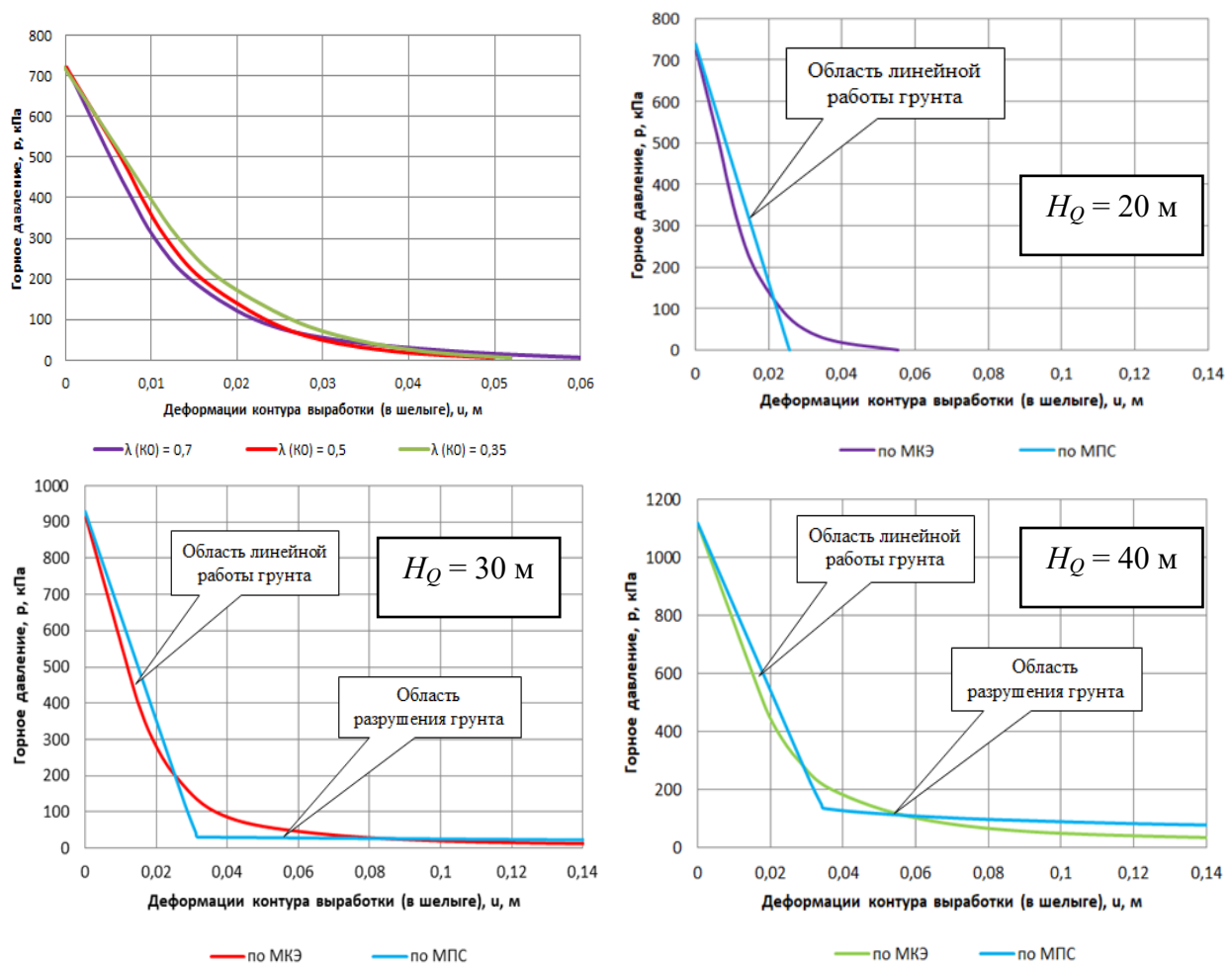


Рисунок 2 – Эпюры равновесных состояний массива при разных коэффициентах бокового давления; сравнение эпюр равновесных состояний массива при разных мощностях грунтов четвертичных отложений

Из полученных результатов следует, что коэффициент бокового давления не играет существенную роль в очертании графика равновесных состояний массива, следовательно, решения аналитического метода (при коэффициенте бокового давления  $\lambda (K_0) = 1$ ) являются допустимыми.

Далее выполнено сравнение графиков равновесных состояний массива, получаемых аналитически (по формулам 2–4) в программе CONTACT (при  $\lambda (K_0) = 1$ ) и методом конечных элементов в Midas GTS NX (при  $\lambda (K_0) = 0,5$ ). В обеих программах построены графики равновесных состояний массива при разных пригрузках, соответствующих мощностям четвертичных отложений  $H_Q$ : 20, 30 и 40 м (см. рисунок 2).

Из представленных графиков видно, что аналитические решения демонстрируют принципиальную сходимость с методом конечных элементов, особенно в зоне линейной работы массива и в области разрушения грунта на контуре выработки. Следовательно, аналитическим путем можно достаточно точно и быстро получить очень важный параметр – значение противодействия, соответствующее этапу окончания начальных деформаций незакрепленной выработки.

Этот подход применен при моделировании методом конечных элементов участка сопряжения перегонного тоннеля с пилонной станцией глубокого заложения. Численная модель включает в себя участок перегонного тоннеля протяженностью 20 м, торцевую стену толщиной один метр и 10 м стационарного тоннеля. Мощность ненарушенных верхнекотлинских глин над стационарным тоннелем принята равной 10 м. Вышележащие слои грунта представлены равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к верхней границе массива и соответствующей мощности четвертичных отложений 20, 30 и 40 м.

Обделка перегонного тоннеля выполнена из железобетонных усиленных тубингов наружным диаметром 5,54 м, стационарного тоннеля – из железобетонных тубингов наружным диаметром 9,8 м. Обделки моделировались укрупненно пространственными трубами с толщиной стен, приведенной к изгибной жесткости тубинговой обделки (рисунок 3).

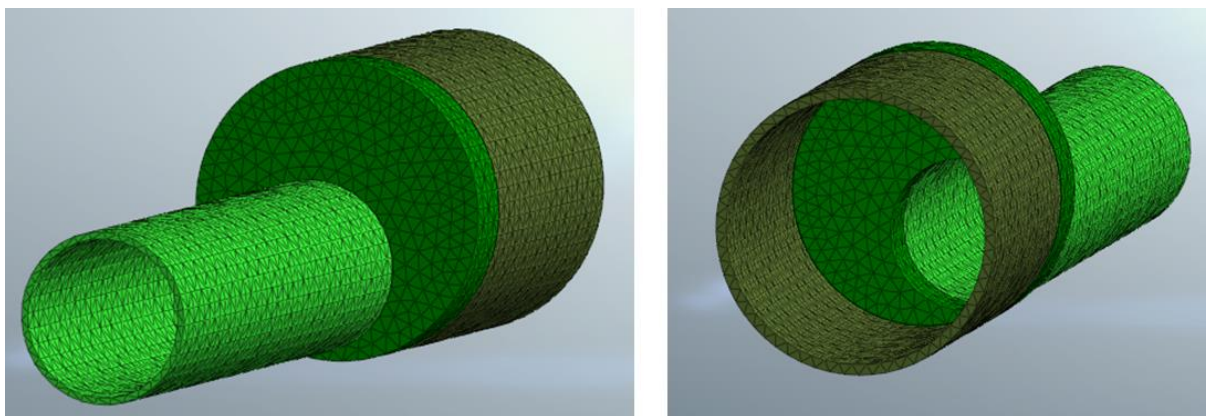


Рисунок 3 – Модель сопряжения участка перегонного тоннеля с торцевой стеной пилонной станции (грунтовый массив не показан)

По результатам моделирования установлено, что учет начальных деформаций выработки приводит к уменьшению результирующего горного давления на обделку стационарного тоннеля примерно в два раза по сравнению с начальными напряжениями в массиве. Такой результат полностью согласуется с «физикой» геомеханических процессов, но не учитывает более сложное поведение реального грунтового массива. Результаты натурных исследований, обобщенные К. П. Безродным, Н. И. Кулагиным и П. А. Деменковым, указывают

на то, что длительные реологические процессы в протерозойских глинах приводят к постепенному увеличению вертикальных нагрузок от горного давления на обделку станционных тоннелей от 0,5 γН сразу после строительства станции до (0,8–1,0) γН спустя один-два года наблюдений.

Таким образом, с точки зрения прогноза развития нагрузок от горного давления на обделку более доверительным является расчет без учета начальных деформаций выработки станционного тоннеля.

При этом для оценки НДС обделки перегонного тоннеля следует учитывать начальные деформации выработки станционного тоннеля, поскольку они оказывает значительное влияние на формирование вертикальной нагрузки на обделку перегонного тоннеля. Так величина нагрузок на обделку перегонного тоннеля оказывается выше в два раза при учете начальных деформаций выработки станционного тоннеля.

С целью верификации численного моделирования разработана методика физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена, позволяющая учесть начальные деформации выработки при физическом моделировании проходки тоннелей методом эквивалентных материалов. Новизна разработанной методики физического моделирования заключается в учете начальных деформаций выработки, параметры которой получены на основе решения уравнения совместности деформаций.

**В четвертой главе** диссертации выполнены экспериментальные исследования на физической модели участка сопряжения перегонного и станционного тоннелей с учетом выбранной конструктивно-технологической схемы проходки. Физическое моделирование выполнялось с применением метода эквивалентных материалов.

Подбор эквивалентного материала грунта выполнен с учетом масштаба моделирования 1:20 в соответствии с формулами теории подобия:

$$E_{ом} = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l}{L} \cdot E_{он} \quad (7)$$

$$C_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l}{L} \cdot C_n \quad (8)$$

$$\varphi_m = \varphi_n \quad (9)$$

где  $\frac{l}{L}$  – масштаб моделирования;  $E_o$  – модули общей деформации,  $C$  – сцепления,  $\varphi$  – углы внутреннего трения модели и природы.

Обделки моделировались пространственными гипсовыми трубами с толщиной стен, приведенной к изгибной жесткости тубинговой обделки:

$$E_m I_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l_m^5}{L_n^5} \cdot E_n I_n \quad (10)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент инерции сечения обделки.

По результатам сдвиговых и стабилметрических испытаний определены значения физико-механических характеристик материала грунта. Результат сравнения фактических характеристик состава с расчетными представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики грунта натуры и модели

Физико-механические характеристики	Натуры	Модели		Погрешность
		Расчетные	Подобранные	
Плотность	$\gamma = 2,2 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 1,66 \text{ г/см}^3$	$\gamma = 1,66 \text{ г/см}^3$	–
Угол внутреннего трения	$\varphi = 23^0$	$\varphi = 23^0$	$\varphi = 23^0$	0 %
Сцепление	$C = 100 \text{ кПа}$	$C = 3,62 \text{ кПа}$	$C = 3,2 \text{ кПа}$	13 %
Модуль общей деформации	$E_o = 100 \text{ МПа}$	$E_o = 3,62 \text{ МПа}$	$E_o = 3,2 \text{ МПа}$	13 %
Модуль упругости (секущий)	$E_{50} = 200 \text{ МПа}$	$E_{50} = 7,24 \text{ МПа}$	$E_{50} = 6,4 \text{ МПа}$	13 %

В физической модели, по аналогии с численной моделью, рассмотрен участок сопряжения перегонного и станционного тоннелей с учетом выбранной технологической схемы проходки, при которой вначале сооружается перегонный тоннель (до участка будущей торцевой стены), а после его проходки – станционный тоннель с торцевой стеной. Торцевая стена выполнена монолитной, толщиной 50 мм, что соответствует 1 м в натуре. В продольном направлении участок сопряжения обделок перегонного и станционного тоннелей разбит на 6 измерительных профилей с установленными на обделки резистивными датчиками. Принципиальная схема испытательного стенда с физической моделью показана на рисунке 4.

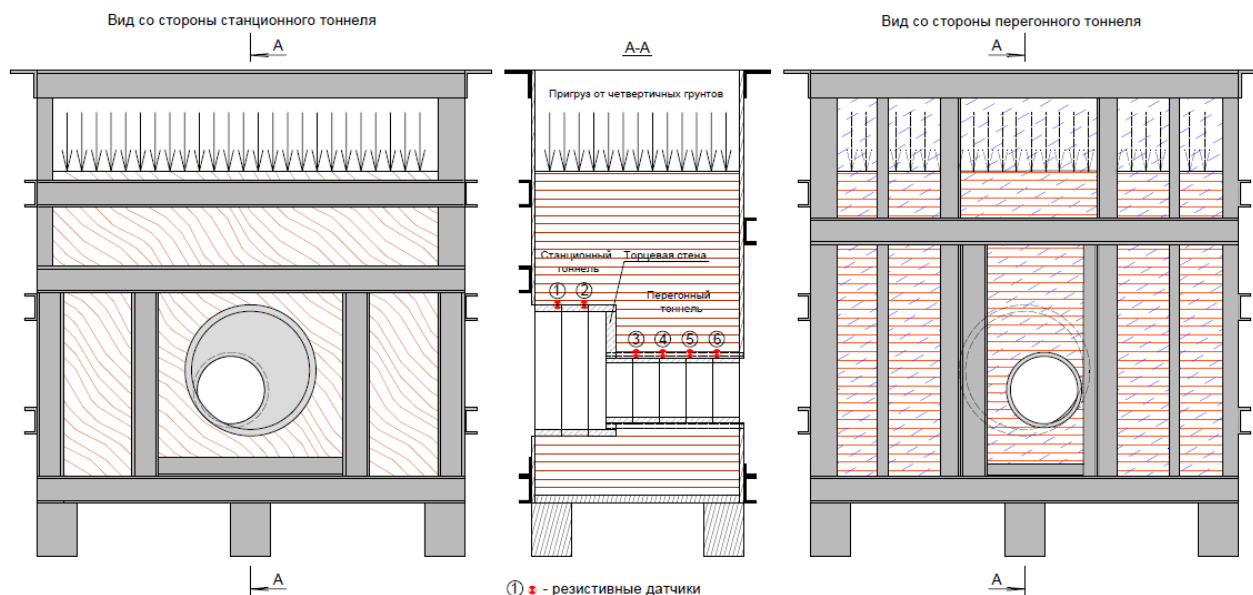


Рисунок 4 – Принципиальная схема испытательного стенда с физической моделью

Новизна разработанной методики физического моделирования заключается в учете начальных деформаций выработки, параметры которой получены из Главы 2. Разработка грунта выполнялась от калотты к лотку на величину заходки 50 мм с доработкой контура выработки специальными ножами, вырезанными из

листовой стали. Ножи имели вырез, равный толщине обделок с учетом зазора в 2 мм. Таким образом, общий зазор между обделкой и грунтом составлял ~ 4–5 мм (80–100 мм в натуре), что соответствует начальным деформациям тоннеля при реальной проходке.

Таким образом, результаты методики оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку, находят свое применение и при физическом моделировании, обеспечивая возможность сопоставления получаемых результатов с результатами численного моделирования.

По завершению проходки перегонного и станционного тоннелей со стороны станции устанавливалась торцевая стена с заполнением зазоров между ней и обделками тоннелей свежим гипсовым раствором. После схватывания гипса снимались начальные показания по датчикам, а затем к модели прикладывалась нагрузка, эквивалентная весу 20 м четвертичных отложений. Показания с датчиков снимались с интервалом в трое суток, с таким же интервалом модель загружалась двумя ступенями нагрузки, эквивалентными 10 м четвертичных отложений каждая.

Результаты эксперимента с физической моделью представлены в виде графиков на рисунке 5, соотнесенных с результатами численного моделирования.

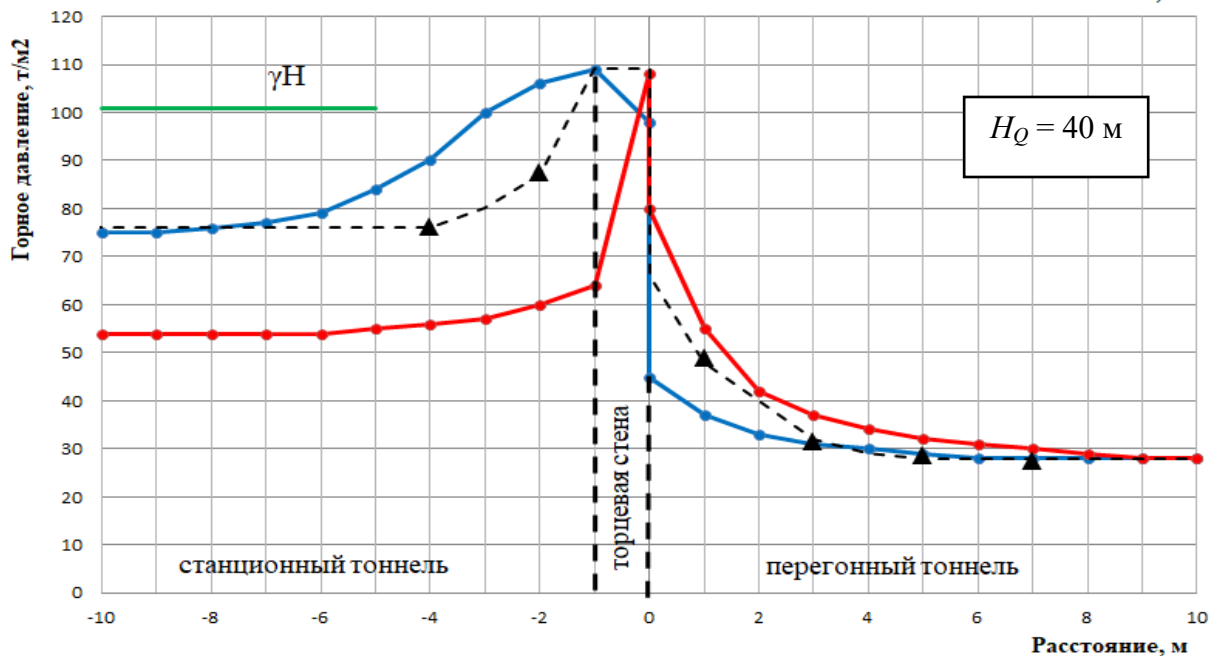
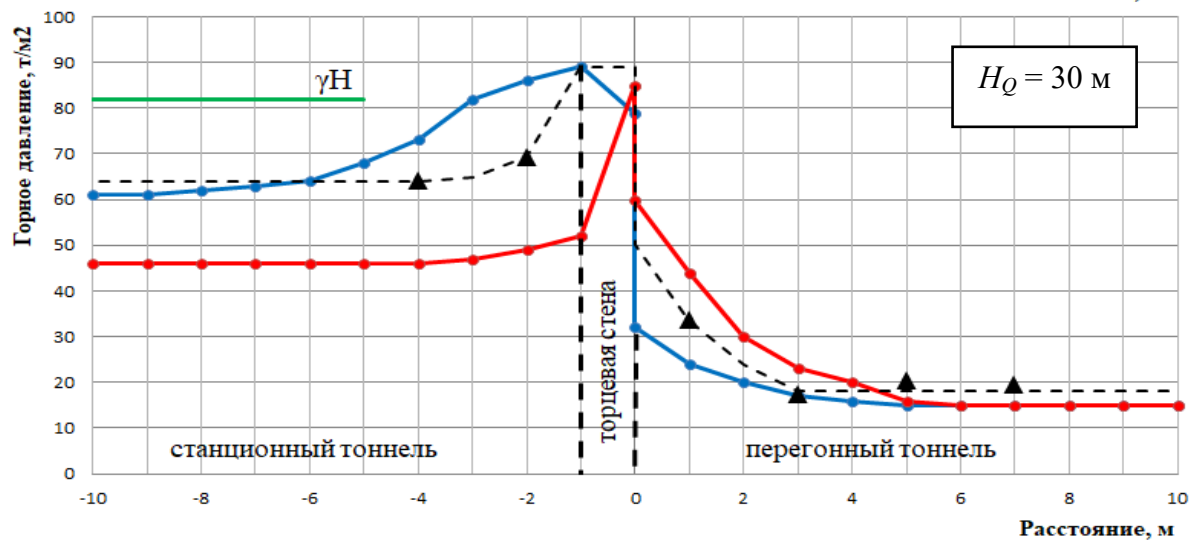
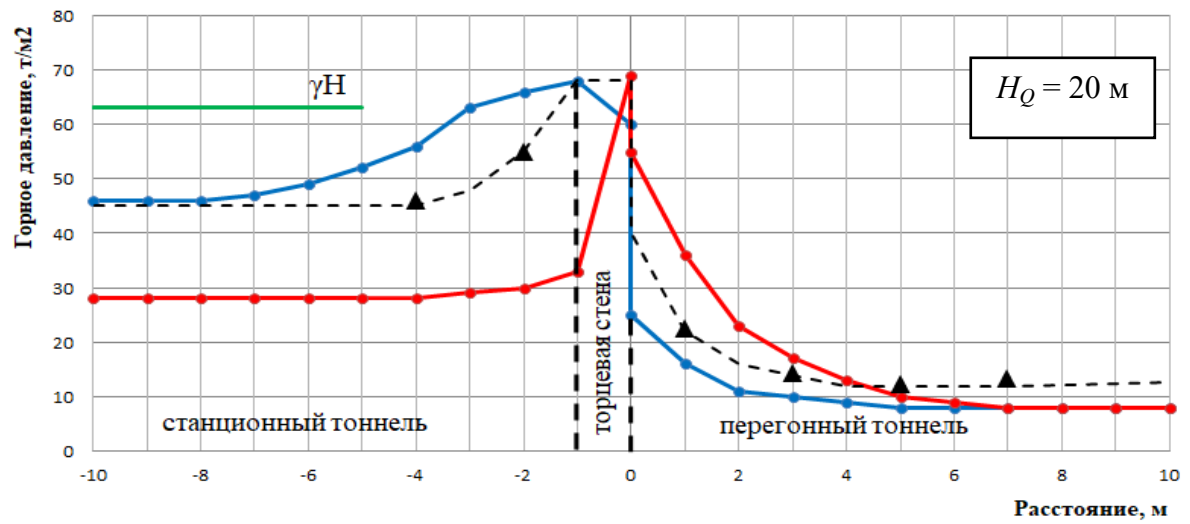
Синими кривыми на графиках показаны значения вертикальной нагрузки от горного давления на обделки станционного и перегонного тоннелей в уровне шельги свода без учета начальных деформаций выработки станционного тоннеля. Красными кривыми показаны те же значения, но с учетом начальных деформаций станционной выработки.

Зелеными линиями показано значение начальных напряжений в массиве в уровне шельги свода обделки станционного тоннеля, равное весу столба грунтов над тоннелем. Черными значками показаны результаты физического эксперимента, пересчитанные в значения натуре, а пунктирной линией – их интерполяция.

По результатам физического моделирования нагрузка от горного давления на обделку станционного тоннеля оказалась ближе к результатам численного моделирования без учета начальных деформаций станционной выработки (синие кривые на графиках).

Вместе с тем нагрузка от горного давления на обделку перегонного тоннеля по результатам физического моделирования оказалась выше, чем при численном моделировании без учета начальных деформаций станционной выработки, то есть ближе к красным кривым.

Кажущееся противоречие может быть объяснено тем, что в физическом эксперименте по периметру установленной торцевой стены предусматривались зазоры, впоследствии заполняемые гипсовой смесью. Также зазоры образовались и на контакте торцевой стены с грунтовым массивом. Эти зазоры могли вызвать некоторые деформации обделок и грунта вблизи торцевой стены, что и нашло отражение на росте нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля. Таким образом, такое «противоречие» только подтверждает корректность рассмотренных численных моделей.



● без учета начальных деформаций станции и торцевой стены    ● с учетом начальных деформаций станции и торцевой стены  
— значение  $\gamma_H$  в уровне шельги станционного тоннеля    ▲ результаты физического моделирования

Рисунок 5 – Вертикальная нагрузка от горного давления на обделки станционного и перегонного тоннеля (сопоставление результатов численного и физического моделирования)

Граница области влияния станции на перегонный тоннель составляет приблизительно 5–7 м. Размеры этой области практически не зависят от уровня напряжений в массиве (от глубины заложения), то есть в первую очередь определяется геометрией системы.

Выполненные исследования позволяют разработать метод расчета напряженно-деформированного состояния обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена глубокого заложения, представленный в виде блок-схемы на рисунке 6. Красным цветом показана разработанная автором методика учета начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку как структурный элемент метода. Первые этапы алгоритма численного моделирования являются общими для моделирования методом конечных элементов большинства типов подземных сооружений: построение геометрии объемной модели (1), задание свойств конечных элементов строительных материалов и грунтов (2), разбиение модели на сеть конечных элементов (3), задание граничных условий (4), моделирование начального напряженного состояния массива (5). Далее в соответствии с конструктивно-технологической схемой производства работ выполняется определение очередности проходки тоннелей (6).

Для моделирования проходки выработки (7) применяется  $\beta$ -метод (8). Для совершенствования  $\beta$ -метода автором введены дополнительные этапы алгоритма (9 – 12), на которых выполняется анализ сходимости графиков равновесных состояний массива, получаемых путем построения в методе конечных элементов и аналитически – в программе CONTACT. В случае удовлетворительной сходимости выполняется определение величины горного давления  $\beta p$  на этапе окончания начальных деформаций выработки (8), в противном случае этапы (9 – 12) повторяются.

В зависимости от поставленной задачи этап моделирования проходки выработки (7) можно опустить, например, для расчета обделки станционного тоннеля на максимальные нагрузки от горного давления. Вместе с тем, поскольку установлено, что деформации станционной выработки оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля, целесообразно выполнять два расчета – с учетом начальных деформаций станционной выработки и без него, что отражено на схеме пунктирной линией.

Этапы численного и физического моделирования соотносятся между собой, за исключением очередности этапов (3), (3') и (4), (4'). Также при физическом моделировании этап (7', 13') – проходка выработки и монтаж обделки – объединяет в себе этапы (7) и (13) численного моделирования. Разработанная методика оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку, применяемая при численном моделировании, позволяет выполнить количественную оценку напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена. Результаты этой методики также применяются и в разработанной методике физического моделирования, что позволяет верифицировать результаты численного моделирования.

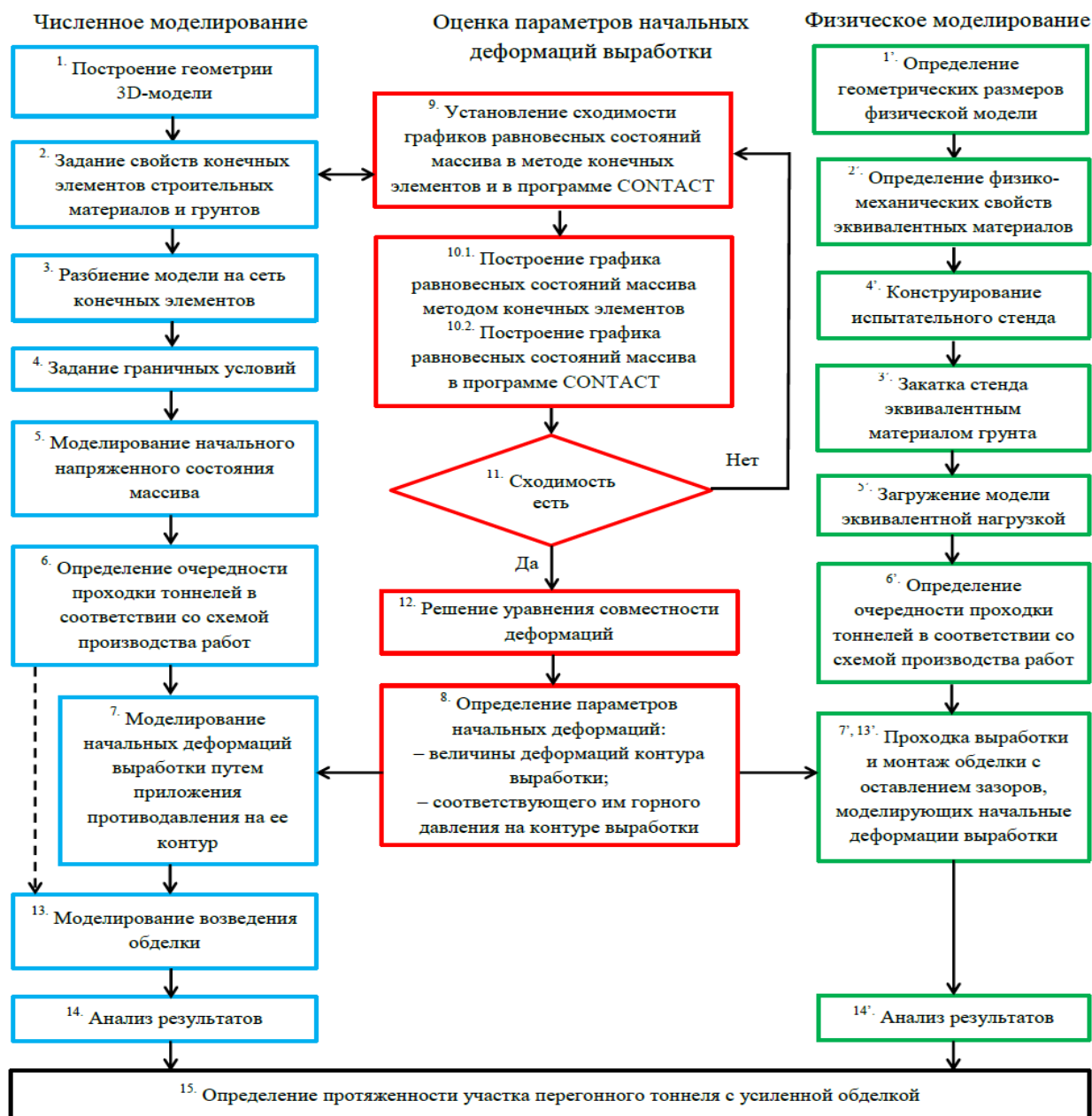


Рисунок 6 – Блок-схема метода расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля на участке сопряжения со станцией метрополитена

После анализа результатов численного (13) и физического (13') моделирования выполняется определение величины участка перегонного тоннеля с усиленной обделкой (14).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполненных исследований достигнута цель исследования, решена научная задача, заключающаяся в разработке методики оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку и методики физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения, имеющая значение для соответствующей отрасли знания. Сформулированы следующие основные выводы:

1. Проанализированы особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга, объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения станционных комплексов глубокого заложения Петербургского метрополитена, а также существующие аналитические методы определения нагрузок от горного давления на тоннельные обделки.

2. Разработана методика учета начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку, научная новизна которой состоит в том, что она по сравнению с имеющимися учитывает значение давления на контуре выработки, соответствующее этапу завершения начальных деформаций выработки, что позволяет повысить точность расчета параметров напряженно-деформированного состояния тоннельных обделок на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения в объемной постановке с учетом параметров проходки тоннелей.

3. Выполнена апробация разработанной методики при численном моделировании участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена, в результате чего выявлены закономерности распределения нагрузок от вертикального горного давления на обделку перегонного тоннеля на участке сопряжения с пилонной станцией глубокого заложения при схеме производства работ, заключающейся в сооружении перегонного тоннеля, а затем станционного.

4. Разработана методика физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения, научная новизна которой состоит в том, что она по сравнению с имеющимися учитывает начальные деформации контура выработки, что позволяет верифицировать результаты численного моделирования участка сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения в объемной постановке с учетом параметров проходки тоннелей, а также снизить материалоемкость строительных конструкций тоннельной обделки.

5. Выполнена апробация разработанной методики при эксперименте над физической моделью участка сопряжения перегонного и станционного тоннелей с учетом выбранной конструктивно-технологической схемы проходки.

6. Установлено, что на подходе к торцевой стене станции обделка перегонного тоннеля воспринимает вертикальную нагрузку от горного давления, превышающую нагрузку на обделку вне области влияния станции примерно в 2–4 раза. При этом установлено, что начальные деформации станционной выработки приводят к увеличению нагрузки на перегонный тоннель. Обделка станционного тоннеля вне торцевой стены воспринимает нагрузку от горного давления в значении  $(0,5–0,8) \gamma H$ , где нижняя граница соответствует расчету с учетом начальных деформаций выработки станционного тоннеля, верхняя граница – без учета начальных деформаций, что является более достоверным в отношении прогноза напряженно-деформированного состояния станционной обделки. Вместе с тем расчет нагрузки от горного давления на обделку перегонного тоннеля рационально выполнять с учетом начальных деформаций станционной выработки.

7. Доказано, что граница области влияния стационарного тоннеля на напряженно-деформированное состояние обделки перегонного тоннеля на участке их сопряжения практически не зависит от глубины заложения и может быть принята равной 7 м, что позволяет снизить материалоемкость обделки.

8. Разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена, включающий методику оценки параметров начальных деформаций выработки при расчете нагрузок от горного давления на тоннельную обделку и методику физического моделирования тоннельной обделки на участке сопряжения перегонного тоннеля со станцией метрополитена глубокого заложения.

9. Обоснованы рекомендации для внедрения в проектирование станций метрополитена глубокого заложения для расчета напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки перегонного тоннеля с учетом параметров его проходки, а также границ области влияния тоннельной обделки станции метрополитена на перегонные тоннели для определения рациональных и экономически эффективных решений с точки зрения несущей способности и материалоемкости конструкций.

10. Определены направления дальнейших исследований, которые заключаются в повышении точности расчетов за счет учета параметров стыков обделки и использовании более совершенных геомеханических моделей грунта.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России**

1. Сокорнов, А. А. Лабораторные испытания искусственных грунтов / А. А. Сокорнов, Е. А. Шапошников, А. Н. Коньков // Путевой навигатор. – 2019. – №41 (67) – С. 49–55.
2. Сокорнов, А. А. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов/ А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков // Путевой навигатор. – № 50 (76). – 2022. – С. 36–44.
3. Сокорнов, А. А. Физическое моделирование как инструмент верификации при решении задач геомеханики / А. А. Сокорнов, А. Н. Коньков // Известия ПГУПС. – 2024. – Т. 21, вып. 4. – С. 874-890.
4. Formation of Loads on the Interstation Tunnels at Deep Grounding Subway Stations in the Geotechnical Conditions of St. Petersburg / A. N. Konkov, A. A. Sokornov, G. N. Polyankin, A. Kh. Yagofarov // Transportation Research Procedia. – 2023. – Volume 68. – P. 680–687.
5. Konkov, A. N. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections / A. N. Konkov, A. A. Sokornov, K. V. Korolev// TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 402. Springer, Cham. – 2022. – Volume 1. – P. 568-576.