

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

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

**ЦЮПА ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ  
ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА  
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Специальность 2.8.7

Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ  
НАУК**

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
Панкратенко Александр Никитович

Москва – 2024

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях недропользования и реализации технологий подземного городского строительства возникает спектр трудноразрешимых задач, связанных с плотной городской застройкой и расположением мест объектов нового строительства, соприкасающихся или пересекающихся с действующей подземной инфраструктурой различного функционального назначения. Как правило, данные ситуации характеризуются наличием дополнительных превентивных мер технологической направленности, минимизирующих риски строительства. Все это с полным основанием можно отнести и к процедуре проектирования и строительства новых объектов метрополитена.

До конца 2027 года в Москве планируется построить 329 км новых линий метрополитена. Строительство ведётся в условиях плотной городской, в том числе исторической застройки. В среднем на 1 пог. км линии строящегося метрополитена приходится порядка 17 – 20 существующих зданий и сооружений. В зоне влияния строящегося котлована в среднем располагается порядка 5-7 зданий, в некоторых случаях их число доходит до 10 – 12.

Следует отметить, что геотехническое и геомеханическое обоснование проектных решений строительства новых подземных сооружений метрополитена в обозначенной проблематичной области, в настоящий момент времени имеет весьма существенные недостатки, что обусловлено наличием ряда методических и методологических составляющих, отражающих учет основополагающих особенностей пластического деформирования вмещающего массива, описываемого и прогнозируемого с использованием численных методов.

Это подтверждается значительной аварийностью при проведении подобного рода подземных работ, вплоть до изменения проектной траектории тоннельных сооружений и сооружением обходных маршрутов.

В методологическом плане это, в основном, связано с определенными сложностями реализации комплексного перехода от установленных экспериментальных данных в области установления основных параметров физико-механических свойств пород вмещающего массива к определенным функциональным зависимостям, которые задействованы в рамках проектирования с использованием математического моделирования конкретных геомеханических ситуаций.

Одновременно с этим, следует учесть, что правомерный и адекватный учёт всех составляющих и процессов нелинейного упругого пластического деформирования литологических разностей вмещающего массива при проектировании является основополагающей составляющей процедуры обоснования численных расчётов устойчивости и эксплуатационной сохранности подземных сооружений в сложной среде функционирования.

Исходя из этого, поставленная научно-практическая задача разработки процедуры обоснования надежности технологических решений при проектировании и строительстве объектов метрополитена с учетом влияния существующей застройки (технологических решений по сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства) на основе методов математического моделирования, становится актуальной и приоритетной с учетом стремительного развивающихся требований эколого-промышленной безопасности, предъявляемых к устойчивому и эффективному освоению новых участков подземного строительства с учетом сложившейся и функционирующей инфраструктуры. Все это подтверждается приведенными в значительном количестве литературных источников указаниями на чрезвычайно низкую сходимость результатов геотехнических расчетов с данными натурных наблюдений. Основными факторами, определяющими точность численного моделирования, являются отсутствие системного подхода к геотехническим изысканиям и выбору математической модели поведения грунта под нагрузкой.

**Целью** работы является разработка научно-методического обеспечения решения геотехнических и геомеханических ситуаций в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро при проектировании объектов метрополитена, попадающих в зону влияния нового строительства.

**Идея** работы заключается в использовании математического моделирования в пространственной постановке для расчета изменения напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и средств крепления существующих тоннелей метро от строительства новых станций и перегонных тоннелей.

**Задачи исследований:**

- анализ исследований теоретического и практического плана в области прогнозирования и регулирования процессов напряженно-деформированного состояния горного массива с использованием статических расчетов и механики горных пород и технологических подходов к оптимизации параметров комплексной модели системы «горнотехническое сооружение – технологические процессы строительства подземных сооружений – природная среда»;
- провести анализ системных составляющих проявлений аварийных ситуаций в практике строительства объектов метрополитена;
- разработка алгоритмического наполнения научно-методического обеспечения численного математического моделирования процессов и механизмов геомеханической обстановки при проектировании и строительстве подземных сооружений с учетом литологических разностей грунтового массива на базе метода конечных элементов;
- обосновать основные ограничения и уточнения, необходимые для правильной интерпретации результирующих целевых параметров оптимизационной модели Hardening Soil;
- обосновать систему практических рекомендаций и технологических решений для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности

существующих тоннельных сооружений в зоне влияния нового строительства.

**Степень проработанности основных составляющих проблематичной области:**

Основные методические и методологические составляющие исследований, выполненных в последнее время в исследуемой области (2019-2023 гг) связаны с именами таких ученых, как: Протосеня А. Г., Панкратенко А.Н., Плешко М.С., Тер-Мартirosян З. Г., Конюхов Д.С., Пастушков В. Г., Ванина Ю. В., Матюхова О. С., Манько А. В., Волохов Е. М., Мукминова Д. З., Харченко И. Я., Фомченкова Д. И., Лебедев М. О., Романевич К. В., Латышев О. Г., Карасев М. А., Беляков Н. А., Иовлев Г. А. и др. Данные исследования базируются на методологической основе интенсивно развивающегося сектора нелинейной механики грунтов с использованием трансформированных методов численного моделирования, позволяющих осуществлять комплексную оценку и прогнозирование НДС вмещающего массива при проектировании и строительстве подземных сооружений с более тщательным учетом граничных условий и ограничений, - здесь можно отметить труды Федоровского В. Г. (1975), Тер-Мартirosяна З. Г. (1979), Бугрова А. К. (1980); Фадеева А. Б. (1982), Иванова П.Л. (1985), Зарецкого Ю. К. (1988); Улицкого В.М. (1999); Вялова С. С. (2000) и др.

Основными апологетами в области развития теории и практики прогнозирования и оценки НДС вмещающего массива при проектировании и строительстве подземных сооружений является ряд ученых, которые внесли значительный вклад в становление данного научного направления: М.М. Протодряконов, И.В. Баклашов, К.В. Руппенейт, Н.С. Булычев, П.М. Цимбаревич, Б.А. Картозия, А.Г. Протосеня, И.В. Родин, W. Prager, D.W. Muir и др.

В проблемной области разработки и использования моделей нелинейного характера протекающих процессов и отдельных составляющих теории пластичности можно выделить работы М.А. Карасева, К. Генки, А.Г.

Шашкина, А.А. Ильюшина, А.Н. Ставрогина, R. Lagioia, J.M. Duncan, P.A.Vermeer, T. Schanz, T.A. Bower., S. C. Moller, T. Benz, отдельные аспекты формирования и протекания процессов НДС рассматривались в работах О. Зенкевича, А.П. Господарикова, Р.И. Ларионова, Н.А. Беякова и др. Развитием теоретической базы в области оценки устойчивости обделок тоннельных сооружений с использованием различных подходов занимались в свое время такие ученые, как Б.А.Картозия, А.Н. Панкратенко, А.С. Саммаль, М.С.Плешко, П.А. Деменков и др. В области использования эквивалентных материалов в физическом моделировании можно отметить работы Ф.С. Фролова, А.Н. Конькова, A. Kirsch и др.

Анализ данных исследований показал, что при наличии обширного числа методических и методологических подходов к обоснованию проектных технологических решений с учетом расчетной базы НДС вмещающих массивов был использован ряд различных и кардинально отличающихся по своей сути допущений, которые приводят к возникновению весьма существенных неточностей в процедуру оценки и прогнозирования НДС с учетом определенных сложностей выделения наиболее значащих и влияющих горно-геологических и горнотехнических факторов на фоне других при строительстве подземных сооружений.

**Объектом исследования** в диссертационной работе является область взаимовлияния участков нового строительства и действующей инфраструктуры подземных сооружений.

**Предметом исследования** является оценка и прогнозирование НДС вмещающего массива и технологические решения по сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в контур влияния ведения подземных работ и объектов нового строительства.

**Защищаемые научные положения в рамках проведенных исследований:**

1. Нивелирование существенных неточностей процедуры оценки и прогнозирования НДС с учетом определенных сложностей выделения

наиболее значащих и влияющих горно-геологических и горнотехнических факторов при проектировании и строительстве объектов метрополитена следует осуществлять с учетом закономерностей протекающих процессов НДС массива литологических разностей горных пород с правомерным и адекватным учётом всех составляющих и процессов их нелинейного упругого пластического деформирования, что является основополагающей составляющей процедуры обоснования численных расчётов устойчивости и эксплуатационной сохранности подземных сооружений в сложной среде функционирования и разработки дополнительных превентивных мер технологической направленности, минимизирующих риски строительства.

2. Выбор и обоснование рациональных направлений в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства следует осуществлять на базе научно-методического обеспечения оптимизационного многопараметрического моделирования (метод конечных элементов плюс оптимизационная модель упрочняющего грунта Hardening Soil), которое направлено на реализацию наиболее эффективных технологий подземного строительства с позиций минимизации сопутствующих геотехнических рисков и создания приемлемого уровня промышленно-экологической безопасности.

3. Достоверная и объективная система формирования расчетных схем деформационных процессов в литологических разностях вмещающего массива при проектировании и строительстве тоннельных сооружений в контурах нового строительства и существующей действующей подземной инфраструктуры с учетом их взаимовлияния и при использовании технологий подземного строительства должна формироваться на базе взаимоувязанного корректного учёта сопутствующих физико-механических свойств литологических разностей вмещающего массива пород и конструкционных материалов, технологий последовательности возведения подземных сооружений и т.д.), решения возникающих при этом геомеханических и геотехнических с учетом комплексной трансформации и оптимизации

составляющих результирующих целевых индикаторов оптимизационной модели упрочняющего грунта *Hardening Soil*, что дает возможность прогнозировать и идентифицировать образование в режиме разупрочнения проблемных участков и наметить выработку корректирующих технологических решений.

**Методы исследований.** В области заявленной проблематики диссертации для решения основных составляющих задач исследований был использован комплекс научных методов, включающий: методы системной оценки, структурно-логического анализа, натурные экспериментальные методы исследований с обработкой массивов статистических данных, отдельные методические и методологические составляющие механики твердых тел, теории прогнозирования и деформирования упругих пластических пористых сред, оптимизационные методы параметров и т.д. Основой методологического и алгоритмического обеспечения проведения исследований являются принципы и концептуальные составляющие метода конечных элементов, который реализуется в пространственной постановке в рамках оптимизационной модели упрочняющего грунта *Hardening Soil*.

**Достоверность и объективность** результатов теоретического и практического плана в рамках проведенных автором исследований с элементами научной новизны, предопределяется и находит подтверждение в области удовлетворительной степени сходимости и совпадения конечных результирующих данных математического моделирования по сравнению с экспериментальными опытными данными, корректного учёта физико-механических свойств литологических разностей вмещающего массива пород и конструктивного исполнения систем крепления, технологических процессов и операций строительства подземных сооружений и т.д.), корректным использованием и правильной интерпретацией результирующих целевых индикаторов оптимизационной модели упрочняющего грунта *Hardening Soil*.



**Теоретическая значимость** проведенных исследований в области проектирования горнотехнических систем обусловлена элементами развития методологии формирования научной информации, в основе которой заложена возможность изменения, уточнения и адаптации сложившихся представлений о формировании НДС в различных горно-геологических и горнотехнических условиях и используемых технологических схем строительства подземных сооружений, позволяющей с достаточной степенью объективности и надежности верифицировать используемые методы расчета систем крепления с оптимизацией их параметров и обеспечением приемлемого уровня промышленно-экологической безопасности.

**Практическая значимость** проведенных исследований заключается в разработке и обосновании практических рекомендаций применительно к объектам Московского метрополитена в области оценки влияния строительства станции «Косино» и проходки тоннелей Кожуховской линии на существующие тоннели Таганско-Краснопресненской линии и разработки технологических решений по сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства.

Определенная степень практической ценности присутствует при реализации НИР в заявленной проблематичной области и использовании в учебном процессе высших учебных заведений горного профиля при изучении профильных дисциплин, которые формируют необходимые знания и компетенции в области проектирования и строительства подземных объектов различного функционального назначения.

**Научная новизна** обусловлена следующими составляющими:

- трансформированы и усовершенствованы существующие методические подходы к формированию математических моделей в области оценки и прогнозирования НДС в сегменте решения геотехнических и геомеханических ситуаций в области сохранности и эксплуатационной

надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства;

- разработаны основные составляющие научно-методического обоснования технологических решений в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства методика (алгоритм, итерации, продукционные правила, система ограничений и граничных условий, программный комплекс), отличающиеся актуализированным наличием аппарата численного моделирования сопутствующих задач геомеханического плана при подземном строительстве тоннельных сооружений и возможностью их и управления и регулирования;

- с привлечением метода конечных элементов, который реализуется в пространственной постановке в рамках оптимизационной модели упрочняющего грунта Hardening Soil разработан механизм сравнения и выбора наиболее эффективных технологических проектных решений по обеспечению эксплуатационную сохранности и распределению более равномерной силовой нагрузки на обделку существующих тоннелей метро в условиях нового строительства;

- с использованием оптимизационной модели получено распределение основных внутренних усилий в тоннельных сооружениях до и после завершения проходки тоннелей Кожуховской линии из котлована ст. «Косино». По результатам внутренних усилий в обделке существующих тоннелей рассчитаны коэффициенты запаса по прочности, также визуализированы дополнительные перемещения в тоннельных сооружениях после окончания строительства объектов метрополитена Кожуховской линии.

**Личный вклад автора состоит:**

- в обосновании актуальности, формировании внутреннего наполнения основной идеи и цели проведения исследований в рамках обозначенной проблематики, взаимоувязанного ряда частных задач, решение которых позволяет сформировать целостную систему последовательности проведения

исследований, концепции, методологических и методических положений формирования расчетных схем деформационных процессов в литологических разностях вмещающего массива при проектировании и строительстве тоннельных сооружений, проведении ряда численных экспериментов в области механики сплошной среды, установлении сопутствующих закономерностей и верификации разработанных практических рекомендаций применительно к объектам Московского метрополитена в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства.

**Реализация результатов работы.** Разработанная целостная система последовательности проведения исследований в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства, сопутствующей концепции, методологических и методических положений формирования расчетных схем деформационных процессов в литологических разностях вмещающего массива при проектировании и строительстве тоннельных сооружений использованы применительно к объектам Московского метрополитена в области оценки влияния строительства станции «Косино» и проходки тоннелей Кожуховской линии на существующие тоннели Таганско-Краснопресненской линии и разработки превентивных технологических решений.

Отдельные элементы и результативные составляющие проведенных автором исследований используются в рамках учебного процесса в Московском горном институте НИТУ МИСИС при освоении ряда профильных дисциплин кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт» и «Геотехнологии освоения недр (строительные)» (г. Москва).

**Апробация работы.** Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы и научные положения представлялись, докладывались и получили одобрение на международных научных

конференциях: "Неделя горняка - 2021", г. Москва, 2021 г; "Неделя горняка - 2022", г. Москва, 2022 г; "Неделя горняка - 2023", г. Москва, 2023 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, включая 2 в изданиях ВАК, 2 – в системе цитирования SCOPUS и 2 – в системе цитирования Web of Science, 1 – в прочих изданиях.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 231 наименования, приложения (2 стр.) и содержит 173 страницы машинописного текста, 99 рисунков, 22 таблицы.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Можно констатировать, что к настоящему времени научным, проектным и строительным сообществом сформирован и накоплен значительный опыт реализации различных проектов подземного строительства (эффективные проектные, технологические и конструктивные решения), отличающихся довольно сложными условиями воплощения.

Однако для того, чтобы сформировать работоспособное и одновременно адаптивное и объективное научно-методическое обеспечение решения заявленной задачи требуется провести анализ значимых этапов и фрагментов развития методологии в заявленной области.

Проведенный анализ в первой главе исследований в области оценки надежности проектных технологических решений при строительстве объектов метрополитена с учетом прогнозирования и регулирования процессов напряженно-деформированного состояния горного массива с использованием статических расчетов и механики горных пород выделил основной тренд, базирующийся на использовании упругопластических моделей с упрочнением грунта.

Трансформация этого тренда осуществлялась с учетом верификации получаемых результатов на базе валидационного анализа до приемлемого уровня сходимости экспериментальных и теоретических данных, что практически сводит на нет использование других модельных представлений при оценке НДС вмещающего массива в зонах нового строительства с учетом существующей инфраструктуры и позволяет обеспечить разработку

проектных технологических решений для обеспечения эксплуатационной устойчивости подземных сооружений и обоснования наиболее целесообразного способа его строительства.

Исходя из результатов проведенного обзора отечественных и зарубежных исследований в качестве основной концепции проектирования и строительства тоннельных сооружений и объектов метростроения в крупных мегаполисах следует осуществлять сооружение перегонных тоннелей преимущественно неглубокого заложении закрытым способом, с использованием щитовой проходки с активным пригрузом, а станций и сопутствующих сооружений – с использованием открытого и полузакрытого способов в котлованах, где имеются все сопутствующие возможности использования более дешевых технических средств строительства с более высокой производительностью на более широком фронте, хотя это утверждение является констатацией принятой практики современного строительства метрополитенов, противоречит многим литературным источникам и не обеспечено должным технико-экономическим обоснованием.

Было выявлено, что в течении последних пяти лет сформировалась достаточно устойчивая тенденция повышения уровня аварийности при строительстве объектов Московского метрополитена (количественные данные общедоступных источников телеграм-канала, метро, twitter metro (<https://tgram.ru/channels/metrooperativno>, [//mosday.ru/news/tags.php?metro](https://mosday.ru/news/tags.php?metro), [//twitter.com/metrooperativno?lang=ru](https://twitter.com/metrooperativno?lang=ru))).

Систематизированные проявления аварийных ситуаций при строительстве объектов метрополитенов (виды, последствия, причинные факторы) приведены в таблице 1.

Все это, в конечном итоге, приводит к разрушительным проявлениям инженерной, автотранспортной и промышленной инфраструктуры города, причем превалирующей причиной аварий является низкая технологическая подготовка процедуры строительства, которая приводит к нарушению технологических регламентов производства работ.

Таблица 1 - Проявления аварийных ситуаций при строительстве объектов метрополитенов (виды, последствия, причинные факторы)

Виды	Негативные последствия	Причинные факторы
<ul style="list-style-type: none"> <li>• разрушающие деформации, приводящие к обрушению стен, полное или частичное затопление строительных котлованов;</li> <li>• трассовые отклонения профильной строительной траектории; нарушение геометрии обделки с формированием нарушений сплошности и трещинообразования сверхнормативного характера;</li> <li>• водопроявления и прорывы селевых масс в рабочее пространство строительных котлованов, притоннельных сооружений и систему транспортных тоннелей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• нарушения сплошности строительных и инженерных конструкций в виде просадок, коммуникаций и промышленной инфраструктуры;</li> <li>• изменение регламентированных зазоров и габаритных размеров транспортных и перегонных тоннелей;</li> <li>• потеря водонепроницаемости и несущей способности систем крепления и обделки;</li> <li>• полное или частичное затопление рабочего пространства строительного котлована, транспортных тоннелей, нарушения сплошности строительных и инженерных конструкций в виде просадок, коммуникаций и промышленной инфраструктуры</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• отклонения от принятых проектных проработок, технических регламентов строительства;</li> <li>• прорыв селевых масс в рабочее пространство строительных котлованов, притоннельных обслуживающих сооружений и систему транспортных и перегонных тоннелей, нарушения технологии ведения работ с использованием грунтопригруза;</li> <li>• нарушение технологического регламента ведения работ при сооружении ограждения строительного котлована;</li> <li>• использование оборудования с повышенным износом;</li> <li>• отклонения от принятых проектных проработок, технических регламентов строительства</li> </ul>

Если обобщающе систематизировать проявления аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, то их можно свести к следующим составляющим:

- аварийные ситуации в области трудно – или непрогнозируемого разрушения и сдвижения отдельных составляющих вмещающего массива (обрушения, оползни, деформации и смещения);
- аварийные ситуации в области трудно – или непрогнозируемого проявления прорывов водонасыщенных грунтов (плывуны, пульпа и пр.);
- аварийные ситуации в области загазованности вредоносными газами рудничной атмосферы и рабочего пространства горных выработок;
- аварийные ситуации в области возгорания и возникновения пожаров в рабочем пространстве подземных сооружений;
- аварийные ситуации в области нового строительства при наличии действующих тоннелей.

В обобщающем систематизированном виде негативные последствия аварий при реализации технологий подземного строительства, можно представить следующим образом:

- сверхнормативные деформации и недопустимый уровень коррозии элементов систем крепления, приводящих к их разрушению;
- вынос водонасыщенной породы в рабочее пространство тоннельных сооружений (заиливание) с очагами разрушений системы крепления;
- разрушающее воздействие интенсивных водопроявлений (подтопление и затопление рабочего пространства подземных строительных сооружений);
- разрушения логистической системы доставки материалов и оборудования, а также транспортировки горной массы;
- разрушения систем энерго – и электроснабжения подземных потребителей;
- разрушения, приводящие к несоответствию зазоров и габаритов подвижного состава;

- проникновение в рабочее пространство тоннельных сооружений нефтесодержащих, химических или бактериологических веществ.

Анализ концептуальных научных подходов в области оценки, прогнозирования и регулирования процессов напряженно-деформированного состояния горного массива, выполненный во второй главе показал, что в настоящий период развития научно-технического прогресса в области проектирования и реализации подземных строительных технологий для сооружения различного типа подземных конструкций и горнотехнических систем в рамках решения комплекса сопутствующих геомеханических задач приоритетное использование получил метод конечных элементов. Блок-схема алгоритма целевого решения математической модели МКЭ представлена на рис.1.

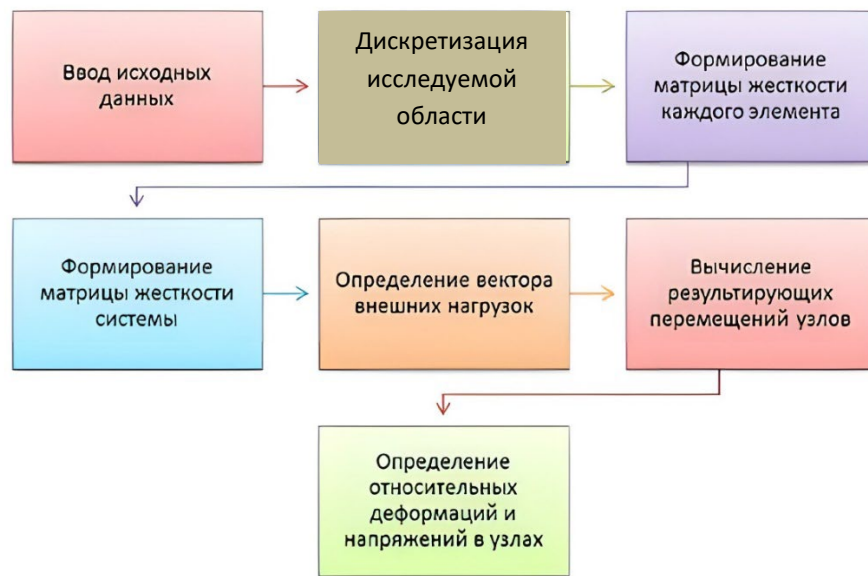


Рис. 1 - Блок-схема алгоритма целевого решения математической модели МКЭ

В основу физической интерпретации МКЭ заложен основополагающий принцип Лагранжа (возможных перемещений), основанный на базисном восприятии равновесного состояния (с учетом произвольно малых перемещений работа внешних сил полностью уравнивается работой внутренних сил), что математически можно описать формулой

$$1/2 \int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_V \delta u^T p dV + \int_S \delta u^T q ds + \int_L \delta u^T f_L dL, \quad (1)$$



где  $\delta u$  – составляющая возможных вариаций вектора смещений;

$\delta \varepsilon$  – составляющая возможных вариаций тензора относительных деформаций;

$q, p, f_L$  – составляющие внешних нагрузок поверхностного, объемного и сосредоточенного факторов;

$\sigma$  – составляющая тензора возникающих внутренних напряжений.

Процедура численного математического моделирования процессов и параметров геомеханической обстановки в режиме проектирования и строительства требует проведения ряда инженерно-геологических изысканий, необходимых в рамках проведения расчетов, рис. 2.

С учетом осуществления этой процедуры количественные величины узловых перемещений позволяют осуществить расчет деформаций и смещений в конкретных конечных элементах исследуемой области.

Анализ проведенных исследований в области решений системы уравнений показывает преобладающее использование метода прямого счета Холецкого и итерационного метода Гаусса — Зейделя.

В третьей главе, посвященной определению параметров модели упрочняющегося грунта HARDENING SOIL на основании натуральных лабораторных испытаний грунтов и их оптимизации с помощью математического моделирования испытаний грунтов в виртуальной лаборатории PLAXIS SOIL TEST было выявлено, что использование модельного представления HARDENING SOIL позволяет правомерно интерпретировать картину складывающейся геомеханической обстановки при проектировании объектов метрополитена: - эта интерпретация связана с возникновением и формированием зон упрочнения на основе изотропного сжатия, что является следствием комплексного проявления процессов в ее контуре от изотропного сдвига и сжатия при их одновременных проявлениях. Наличие данных фрагментов дает возможность определить количественные величины и проследить

характер распределения пластических деформаций, а также размер этой ЗОНЫ.

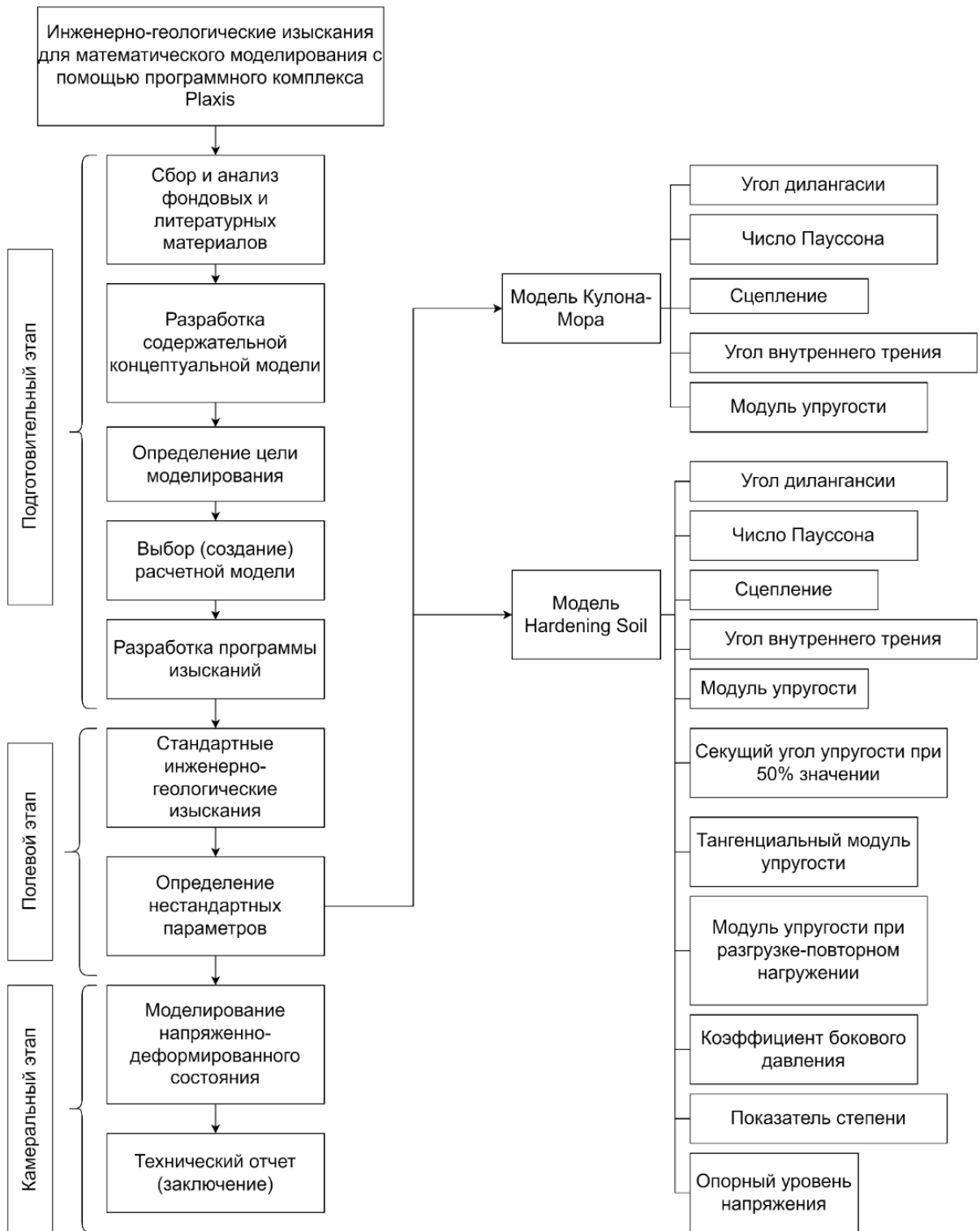


Рис. 2 – Системная интерпретация проведения комплекса инженерно-геологических изысканий в рамках использования МКЭ

В качестве преобладающей составляющей обоснования необходимости применения модели HARDENING SOIL в геотехнических расчетах,

подтверждающей ее преимущества по сравнению с другими моделями грунта выступает следующее преимущество: - кроме теоретического обоснования, здесь может быть использовано сопоставление результатов расчетов по различным моделям поведения грунтов под нагрузкой с данными полевых или лабораторных испытаний, в том числе по литературным источникам.

Математическое моделирование испытаний грунтов с оптимизацией параметров в рамках объекта исследований производилось с учетом результатов компрессионных и трехосных испытаний и в виртуальной лаборатории PLAXIS SOIL TEST (рис.3,4,5,6). После проведения комплекса испытаний полученные параметры модели Hardening Soil (таблица 2) вводятся в программный комплекс PLAXIS для проверки корректности соотношений их величин между собой (таблица 3,4).

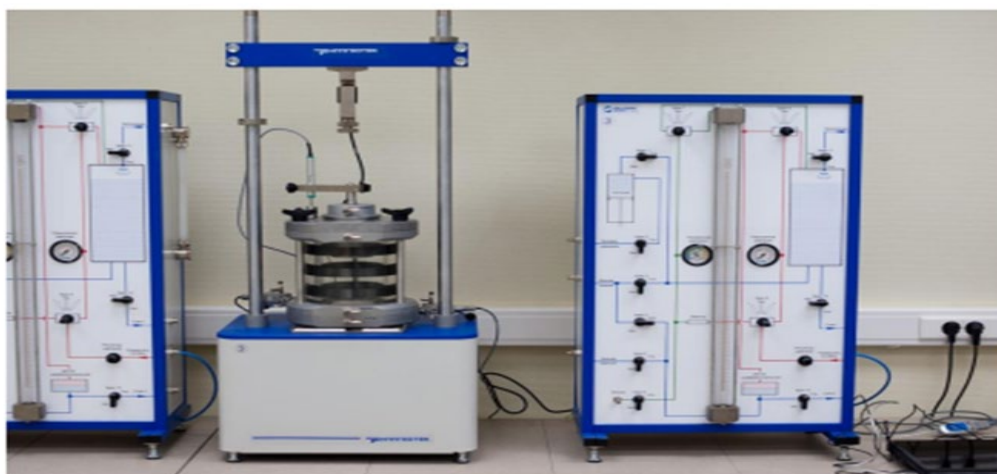


Рис. 3 – Установка трехосного сжатия



Рис.4 – Установка компрессионного сжатия

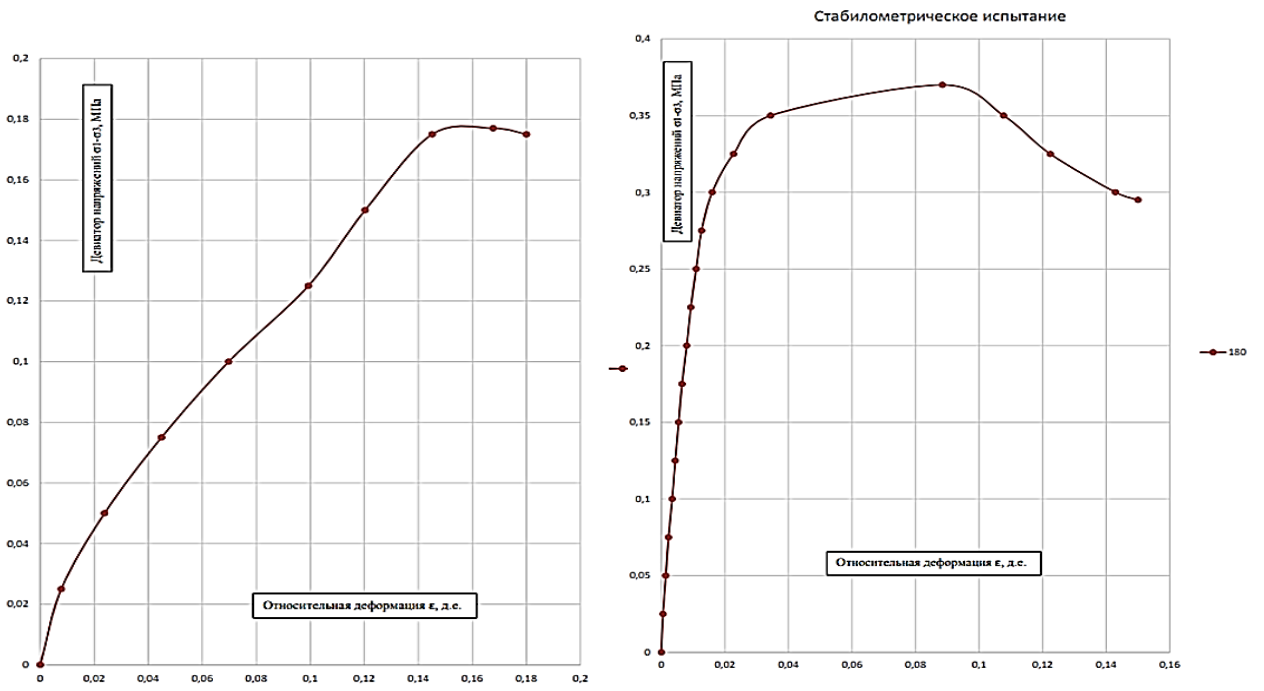


Рис. 5 – Фрагменты результатов стабилометрических испытаний

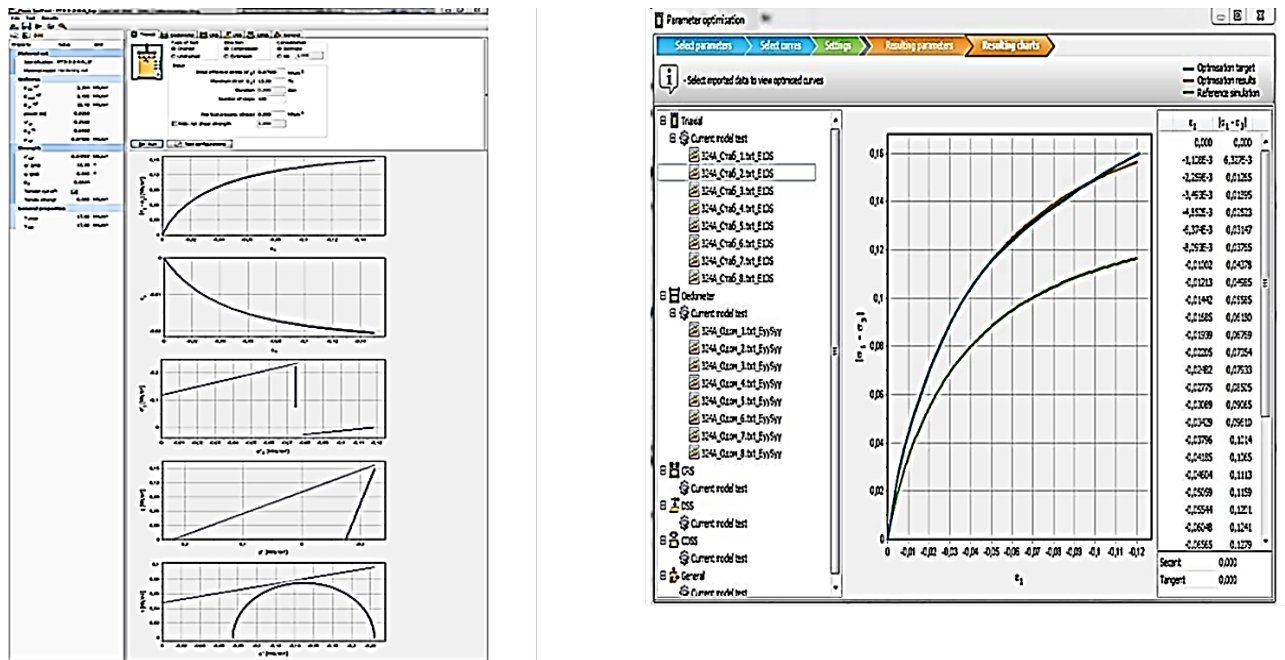


Рис. 6 - Моделирование испытаний в виртуальной лаборатории PLAXIS SOIL TEST

Таблица 2 – Сводная таблица нормативных и расчетных характеристик ИГЭ

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ИГЭ		3-2-4А	3-2-3-А	3-5-3-2	3-5-3-1	3-5-2-1	4-1-2-2	4-2-2-2	4-3-3-3	3-5-5-1	
$p^{ref}$	Опорное давление, кПа	75	75	75	75	75	180	200	220	220	
$c$	Эффективное сцепление, кПа	$\alpha=0.95$	47.38	19.59	3.60	1.26	1.21	88.20	77.97	80.45	16.72
		$\alpha=0.85$	46.68	18.43	3.19	0.62	0.70	87.44	77.27	79.40	16.43
		норм.	48.38	21.25	4.16	2.14	1.90	89.295	78.98	81.97	17.11
$\varphi$	Эффективный угол внутреннего трения, °	$\alpha=0.95$	11.40	19.80	37.20	40.80	41.00	17.40	29.30	23.70	29.40
		$\alpha=0.85$	11.00	19.40	37.00	40.40	40.80	17.30	29.10	23.50	28.90
		норм.	12.00	20.50	37.40	41.30	41.40	17.60	29.60	23.90	29.90
$E_{50}^{ref}$	Секущий модуль деформации, МПа	$\alpha=0.95$	2.092	3.501	16.376	22.511	17.273	30.011	22.431	28.370	27.861
		$\alpha=0.85$	1.887	3.398	15.678	22.032	16.630	29.154	21.956	27.953	27.330
		норм.	2.387	3.648	17.329	23.164	18.150	31.242	23.112	28.969	28.586
$E_{oed}^{ref}$	Касательный модуль деформации, МПа	$\alpha=0.95$	3.171	2.618	13.922	19.625	15.175	19.068	13.471	15.642	27.883
		$\alpha=0.85$	3.068	2.479	12.988	19.400	14.674	18.144	12.858	15.273	27.448
		норм.	3.320	2.818	15.183	19.931	15.859	20.395	14.352	16.172	28.447
$E_{ur}^{ref}$	Секущий модуль деформации разгрузки, МПа	$\alpha=0.95$	10.389	10.922	63.754	58.707	59.263	51.127	161.777	69.989	69.173
		$\alpha=0.85$	10.188	10.677	62.607	55.880	56.754	47.609	158.076	68.426	65.774
		норм.	10.676	11.275	65.319	62.566	62.700	56.178	167.091	72.233	73.812
$\psi$	Угол дилатансии, °	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
$\nu_{ur}$	Коэффициент Пуассона при разгрузке	0.216	0.219	0.255	0.209	0.212	0.239	0.201	0.213	0.192	
$m$	Степенной показатель	0.978	0.753	0.553	0.715	0.620	0.923	0.943	0.693	0.847	
$K_0$	Коэффициент бокового давления	0.587	0.544	0.519	0.547	0.610	0.513	0.349	0.456	0.453	

Таблица 3 – Оптимизированные параметры предельных состояний первой группы, рекомендованные для моделирования

№	ИГЭ	Опорное давление, кПа	Эффективное сцепление, кПа	Эффективный угол внутреннего трения, °	Угол дилатансии, °	Секущий модуль деформации, МПа	Касательный модуль деформации, МПа	Секущий модуль деформации разгрузки, МПа	Коэффициент Пуассона при разгрузке	Степенной показатель	Коэффициент разрушения	Коэффициент бокового давления
		$p^{ref}$	$c$	$\varphi$	$\psi$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	$\nu_{ur}$	$m$	$R_f$	$K_0$
1	3-2-4А	75	47.87	12.22	0.0	3.394	3.490	10.450	0.217	0.826	0.883	0.655
2	3-2-3-А	75	28.25	18.24	0.0	3.379	2.8879	11.440	0.217	0.892	0.837	0.556
3	3-5-3-2	75	2.67	36.13	0.0	17.600	18.960	60.280	0.232	0.775	0.855	0.471
4	3-5-3-1	75	2.67	39.70	0.0	22.900	19.230	71.880	0.208	0.843	0.944	0.510
5	3-5-2-1	75	1.51	40.26	0.0	15.510	14.610	69.880	0.210	0.603	0.758	0.513
6	4-1-2-2	180	88.76	18.09	0.0	34.310	21.480	76.720	0.248	0.826	0.899	0.539
7	4-2-2-2	200	77.92	29.49	0.0	23.890	11.840	169.900	0.202	0.887	0.704	0.362
8	4-3-3-3	220	76.96	22.71	0.0	26.810	16.780	68.710	0.218	0.581	0.951	0.502
9	4-3-5-5-1	220	16.34	27.73	0.0	27.780	26.820	67.250	0.194	0.700	0.898	0.436

Таблица 4 – Оптимизированные параметры, рекомендованные для моделирования по второй группе предельных состояний

№	РГЭ	Опорное давление, кПа	Эффективное сцепление, кПа	Эффективный угол внутреннего трения, °	Угол дилатансии, °	Секущий модуль деформации, МПа	Касательный модуль деформации, МПа	Секущий модуль деформации разгрузки, МПа	Коэффициент Пуассона при разгрузке	Степенной показатель	Коэффициент разрушения	Коэффициент бокового давления
		$p^{ref}$	$c$	$\varphi$	$\psi$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	$\nu_{ur}$	$n$	$R_f$	$K_0$
1	3-2-4А	75	52.23	13.46	0.0	3.435	3.843	10.810	0.214	0.835	0.878	0.634
2	3-2-3-А	75	24.62	21.21	0.0	3.691	2.895	12.450	0.216	0.995	0.873	0.540
3	3-5-3-2	75	5.17	37.72	0.0	19.110	18.970	64.930	0.209	0.632	0.857	0.467
4	3-5-3-1	75	3.26	40.28	0.0	24.420	20.640	74.470	0.204	0.842	0.950	0.506
5	3-5-2-1	75	3.65	40.51	0.0	16.590	16.190	75.250	0.205	0.619	0.818	0.510
6	41-2-2	180	92.06	18.61	0.0	36.050	21.830	81.290	0.221	0.922	0.898	0.537
7	42-2-2	200	83.68	30.47	0.0	25.300	13.990	177.400	0.194	0.862	0.809	0.327
8	43-3-3	220	83.66	23.77	0.0	27.640	17.670	72.170	0.203	0.584	0.965	0.501
9	43-5-5-1	220	17.01	28.63	0.0	27.840	28.940	79.540	0.187	0.728	0.899	0.425

В четвертой главе, посвященной верификации и апробации практических рекомендаций применительно к объектам Московского метрополитена, выполнена оценка влияния строительства станции Косино и проходки тоннелей Кожуховской линии на существующие тоннели Таганско-Краснопресненской линии.

Фрагменты инженерно-геологических разрезов, физико-механических характеристик грунтов, принятые для расчета в рамках объекта исследований позволяют сделать основополагающий вывод о довольно сложных условиях при проектировании и строительстве, в связи с чем для корректного использования модели Hardening Soil требуется ввод в систему расчетов некоторых ограничений и уточнений основополагающих параметров, которые необходимы для правильной интерпретации результирующих целевых индикаторов модели.

Основными проблемными областями использования этой модели следует считать выделение граничных условий и ограничений при проведении процедуры, связанной с трехосными и компрессионными исследованиями прочностных свойств грунта испытательного плана, необходимых для

определения базовых значений модулей деформации при пороговом значении прочности в 50%, а также процедуры, связанной с подходами при определении одометрического модуля, степенного показателя Ohde и модуля разгрузки / повторной нагрузки.

Исследование изменения напряженно-деформированного состояния обделки существующих тоннелей Таганско-Краснопресненской линии от строительства котлована станции «Косино» и поочередной проходки перегонных тоннелей по объекту: «Кожуховская линия ст. «Авиамоторная» ст. «Некрасовка» 10-й этап с использованием заявленного научно-методического и программного обеспечения, показали достаточную степень эксплуатационной надежности и безопасности принятых проектных решений, однако некоторые деформации приводят к необходимости разработки дополнительных проектных технологических решений на базе сооружения разгружающих рам, что подтверждается визуальным представлением изополей горизонтальных и вертикальных перемещений в обделке тоннелей ТКЛ на момент окончания строительства объектов метрополитена Кожуховской линии (без учета и с учетом устройства рам усиления) (рис. 7, 9, таблицы 5,6). На основании расчета были подобраны участки устройства рам усиления: по правому тоннелю от ПК 174 +58,348 до ПК 175 + 21,438; левому - от ПК 74 +70,175 до ПК 175 +33,975. Представлены основные внутренние усилия в тоннельных сооружениях ТКЛ, по результатам которых рассчитаны коэффициенты запаса прочности для данных сооружений, там же приведены дополнительные перемещения в тоннельных сооружениях ТКЛ. Предлагаемый вариант усиления выбран на основе апробированного решения: - подбор металлических профилей элементов рам усиления производился исходя из обеспечения условий их прочности и устойчивости по внутренним усилиям полученным в результате расчета, а также для обеспечения дополнительных перемещений обделки существующих тоннелей на момент завершения строительства объектов метрополитена Кожуховской линии не более 4 мм (рис.8).



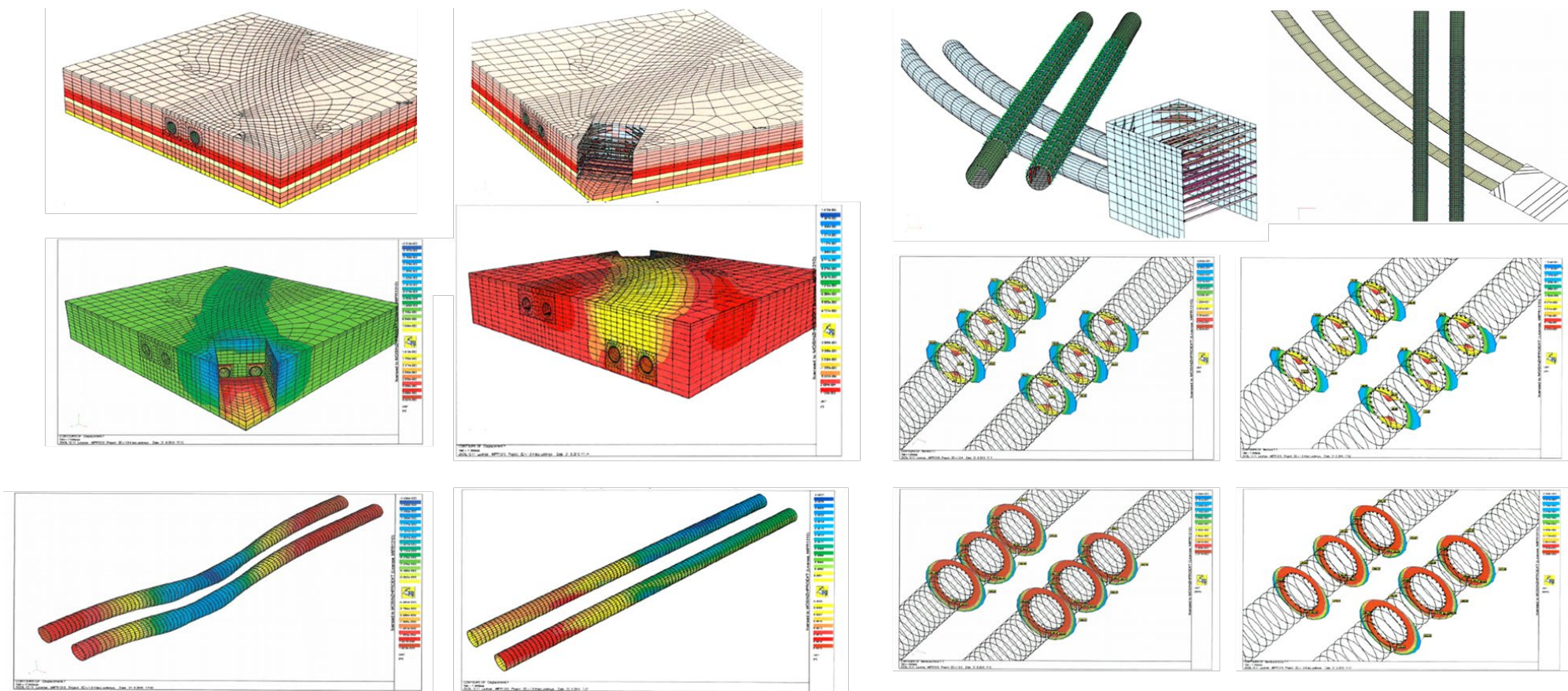
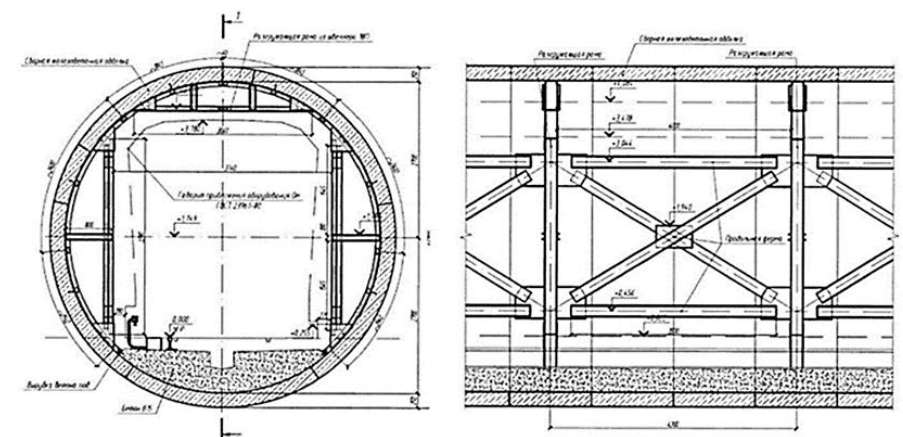


Рис. 7 - Фрагменты моделирования НДС





Принципиальная схема устройства рам  
крепления с рекомендациями по подбору  
профилей сборных металлических элементов

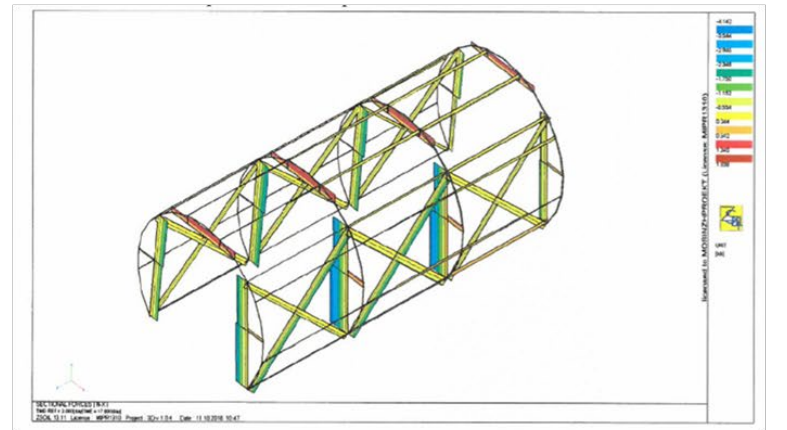
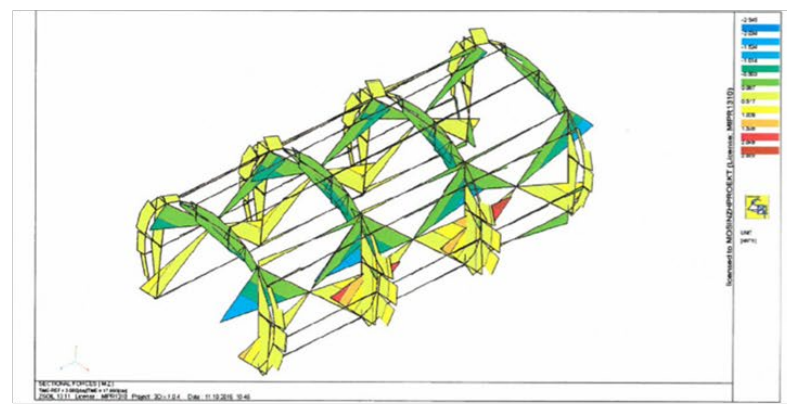
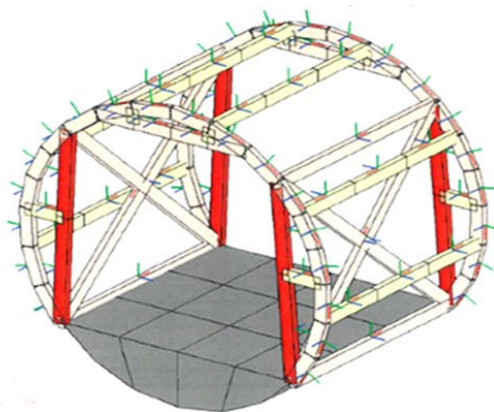
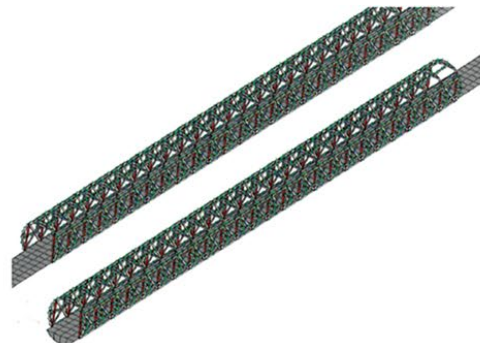


Рис. 8 – Технологические решения по сохранности и обеспечению эксплуатационной устойчивости тоннельных сооружений с эпюрами изгибающих моментов



Секция рам усиления



Рамы усиления тоннелей

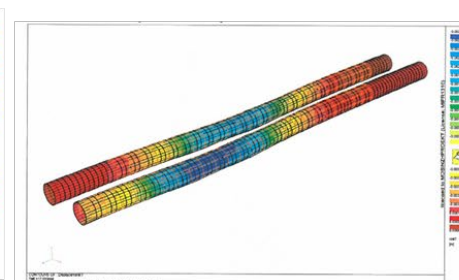
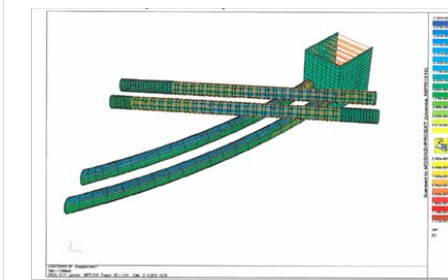
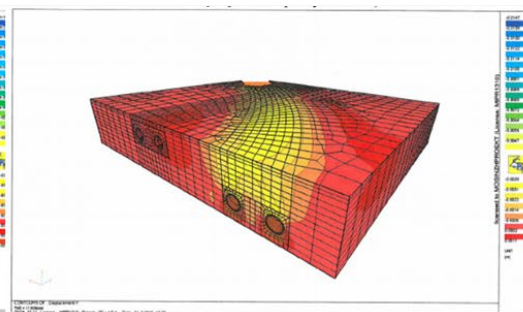
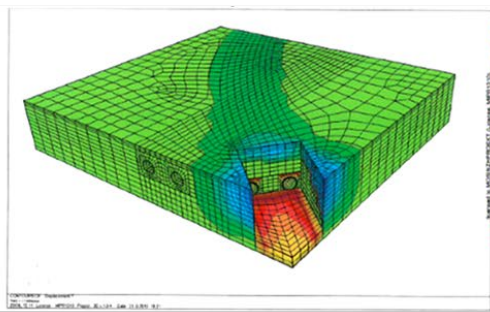
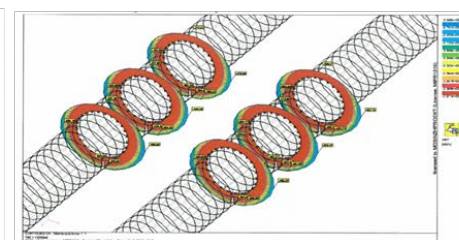
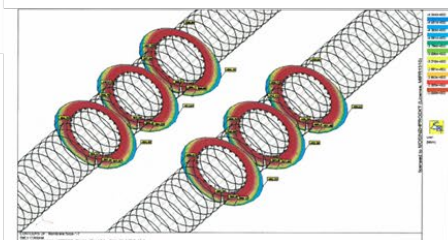
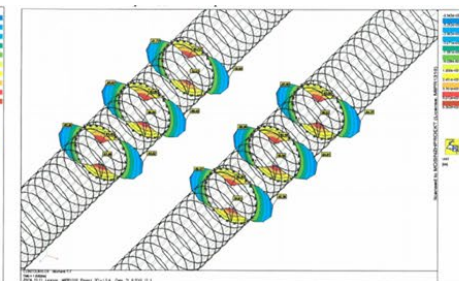
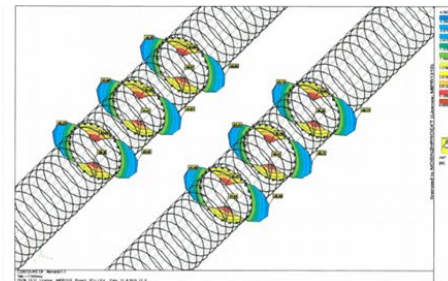


Рис. 9 - Фрагменты моделирования изменения НДС после реализации технологических решений

Таблица 5 - Результаты расчета внецентренно сжатых элементов

Элемент конструкции	Нормативные действующие усилия		Расчетные действующие усилия		$e = e_0\eta + \frac{h_0 - a}{2}, \text{м}$	$Ne, \text{кНм}$	$R_b b x (h_0 - 0.5) + R_{sc} A_s (h_0 - a), \text{кН}$	Условие прочности
	Изгибающий момент, кНм	Продольная сила, кН	Изгибающий момент, кНм	Продольная сила, кН				
До стр-ва правый (без рам)	63,49	207,16	63,49	207,16	0,432	89,4723	167,847	Выполнено
До стр-ва левый (без рам)	63,58	208,27	63,58	208,27	0,417	86,8332	147,799	Выполнено
После стр-ва правый (без рам)	65,04	223,97	65,04	223,97	0,416	93,1416	172,090	Выполнено
После стр-ва левый (без рам)	65,21	226,16	65,21	226,16	0,400	90,4778	151,777	Выполнено
До стр-ва правый (с рамами)	63,49	207,16	63,49	207,16	0,432	89,4723	167,847	Выполнено
До стр-ва левый (с рамами)	63,58	208,27	63,58	208,27	0,417	86,8332	147,799	Выполнено
После стр-ва правый (с рамами)	64,04	206,75	64,04	206,75	0,435	89,9785	167,744	Выполнено
После стр-ва левый (с рамами)	63,66	209,06	63,66	209,06	0,416	87,0022	147,975	Выполнено

Таблица 6 – Сводная таблица результатов расчетов

Элемент конструкции	Нормативные действующие усилия		Расчетные действующие усилия		Коэффициент запаса
	Изгибающий момент, кНм	Продольная сила, кН	Изгибающий момент, кНм	Продольная сила, кН	
До стр-ва правый (без рам)	63,49	207,16	63,49	207,16	1,88
До стр-ва левый (без рам)	63,58	208,27	63,58	208,27	1,7
После стр-ва правый(без рам)	65,04	223,97	65,04	223,97	1,85
После стр-ва левый (без рам)	65,21	226,16	65,21	226,16	1,68
До стр-ва правый (с рамами)	63,49	207,16	63,49	207,16	1,88
До стр-ва левый (с рамами)	63,58	208,27	63,58	208,27	1,7
После стр-ва правый (с рамами)	64,04	206,75	64,04	206,75	1,86
После стр-ва левый (с рамами)	63,66	209,06	63,66	209,06	1,7

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты проведенных исследований в области обоснования надежности технологических решений при проектировании и строительстве объектов метрополитена с учетом влияния существующей застройки с учетом геотехнического и геомеханического обоснования проектных решений строительства подземных сооружений метрополитена в условиях плотной городской застройки и расположением мест объектов нового строительства, соприкасающихся или пересекающихся с действующей подземной инфраструктурой различного функционального назначения представляют собой законченную научно квалификационную работу, посвященной решению актуальной научно-производственной задачи – разработки научно-методического обеспечения решения геотехнических и геомеханических ситуаций при проектировании объектов метрополитена и выбора проектных технологических решений в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в контур нового строительства.

**Основные результирующие составляющие комплекса выполненных теоретических и практических исследований:**

1. Проанализированы исследования теоретического и практического плана в области надежности технологических решений при проектировании и строительстве объектов метрополитена с учетом прогнозирования и регулирования процессов напряженно-деформированного состояния горного массива с использованием статических расчетов, механики горных пород и технологических подходов к оптимизации параметров комплексной модели системы «горнотехническое сооружение – технологические процессы строительства подземных сооружений - природная среда».

2. Предложена концепция использования упругопластических моделей с упрочнением грунта до приемлемого уровня сходимости экспериментальных и теоретических данных, что практически сводит на нет использование других модельных представлений при оценке НДС вмещающего массива в зонах проектирования нового строительства с учетом существующей инфраструктуры и позволяет обеспечить разработку проектных технологических решений для обеспечения эксплуатационной устойчивости подземных сооружений и обоснования наиболее целесообразного способа его строительства.

3. Исходя из результатов проведенного обзора отечественных и зарубежных исследований установлено, что в качестве основной концепции проектирования и строительства тоннельных сооружений и объектов метростроения в крупных мегаполисах следует осуществлять сооружение перегонных тоннелей

преимущественно неглубокого заложении закрытым способом, с использованием щитовой проходки с активным пригрузом, а станций и сопутствующих сооружений – с использованием открытого и полужакрытого способов в котлованах, где имеются все сопутствующие возможности использования более дешевых технических средств строительства с более высокой производительностью на более широком фронте.

4. Установлено, что в течение последних пяти лет сформировалась достаточно устойчивая тенденция повышения уровня аварийности при строительстве объектов Московского метрополитена, что всегда приводит к разрушительным проявлениям инженерной, автотранспортной и промышленной инфраструктуры города, причем преобладающей причиной аварий является низкая технологическая подготовка процедуры строительства, которая обусловлена нарушениями технологических регламентов производства работ.

5. Предложены концептуальные методические положения в области оценки, прогнозирования и регулирования процессов напряженно-деформированного состояния горного массива при проектировании и реализации подземных строительных технологий для сооружения различного типа подземных конструкций и горнотехнических систем в рамках решения комплекса сопутствующих геомеханических задач с приоритетным использованием метода конечных элементов, основанного на основополагающих принципах, методических и методологических особенностях теории механики сплошной среды.

6. Установлено, что выбор и обоснование конкретных методических и методологических составляющих процедур проектирования на базе прогнозной оценки деформаций и смещений в области взаимосвязанного влияния ведения подземных горных работ с учетом действующей инфраструктур требует решения ряда взаимоувязанных задач и реализации управления с учетом обязательной корректировки определенных технологических параметров с целью стабилизации НДС вмещающего грунтового массива, что предопределяет наличие отдельных составляющих различных методических подходов и теорий, сформировавшихся в заявленной проблематичной области.

7. Установлено, что система и основные принципы реализации научно-методического обеспечения МКЭ требуют достаточности объема проводимых полевых и лабораторных инженерно-геологических и геотехнических изысканий и испытаний с целью получения статистически обеспеченных показателей, параметров и характеристик физико-механических свойств присутствующих в исследуемой толще инженерно-геологических элементов (ИГЭ), которые необходимы в рамках формирования расчетных геологических



элементов (РГЭ), которые служат базовыми элементами геомеханических моделей вмещающего грунтового массива и расчета несущих конструкций подземных строительных сооружений с учетом процедуры их калибровки.

8. Подтверждено, что при реализации алгоритмического обеспечения модельного подхода HARDENING SOIL совместно с зонами предельных состояний возникают и формируется зона упрочнения на основе изотропного сжатия, что является следствием комплексного проявления процессов в ее контуре от изотропного сдвига и сжатия при их одновременных проявлениях. Наличие данных фрагментов дает возможность определить количественные величины и проследить характер распределения пластических деформаций, а также размер этой зоны.

9. Установлено, что математическое моделирование испытаний грунтов с оптимизацией параметров должно производиться с учетом результатов компрессионных и трехосных испытаний и в виртуальной лаборатории PLAXIS SOIL TEST. После проведения комплекса испытаний полученные параметры модели Hardening Soil вводятся в программный комплекс PLAXIS для проверки корректности соотношений их величин между собой. Данные, полученные непосредственно из испытаний, не всегда вписываются в рамки математической модели грунта, поэтому для возможности проектировщиков без дополнительной обработки использовать параметры в расчетах должна производиться процедура математического моделирования лабораторных испытаний с целью оптимизации прямых данных опытов под конкретную задачу. При геомеханических расчётах в рамках использования модельного представления HARDENING SOIL с целью обеспечения требуемой детализации и объективности для осуществления процедуры генерации начальных напряжений, развиваемых в исследуемом массиве следует использовать тип расчёта Gravity loading (гравитационное нагружение).

10. Установлены основные составляющие и закономерности в области возникновения и формирования пластических деформаций при изотропном сжатии. Основополагающими факторами устойчивости грунтов в области ведения подземных горных работ являются: учитываемая предложенным модельным представлением Hardening Soil нелинейность процесса деформирования, учет составляющих сдвигового и изотропного упрочнения и зависимости изменения структуры жесткости, связанной с изменениями девиаторной составляющей нагрузки, величина учитываемого эквивалентного давления на литологические разности вмещающего массива и технологические параметры строительства подземных сооружений.

11. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния обделки существующих тоннелей Таганско-Краснопресненской линии от

строительства котлована станции «Косино» и поочередной проходки перегонных тоннелей по объекту: «Кожуховская линия ст. «Авиамоторная» ст. «Некрасовка» 10-й этап (эпюры развиваемых внутренних усилий и деформационных смещений системы крепления (постоянной обделки)) показало, что эксплуатационная надежность и безопасность тоннельных сооружений Таганско-Краснопресненской линии при строительстве станции «Косино» и проходке перегонных тоннелей Кожуховской линии обеспечивается с приемлемым уровнем надежности. Полученные в расчете деформации в тоннельной обделке вызывают опасения лишь с точки зрения обеспечения габаритов и кривых в плане и профиле и требуют разработки дополнительных технологических решений в соответствии с действующими нормативными документами. Для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности тоннельных сооружений Таганско-Краснопресненской линии при строительстве котлована ст. «Косино» и закрытой проходки тоннелей Кожуховской линии с учетом существующих следует использовать вариант с устройством разгружающих рам. Участки устройства рам усиления следует выбирать с учетом основных внутренних усилий в тоннельных сооружениях ТКЛ, коэффициентов запаса прочности для данных сооружений и дополнительных перемещений в тоннельных сооружениях ТКЛ строительства объектов метрополитена Кожуховской линии 10-го этапа.

12. Установлено, что подбор металлических профилей элементов рам усиления в рамках предложенных технологических решений следует производить исходя из обеспечения условий их прочности и устойчивости по внутренним усилиям, полученным в результате расчета, а также с условием обеспечения дополнительных перемещений обделки существующих тоннелей на момент завершения строительства объектов метрополитена Кожуховской линии не более 4 мм.

13. Разработанное научно-методическое обеспечение решения геотехнических и геомеханических ситуаций и выбора проектных технологических решений в области сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в контур нового строительства исключает в рамках доверительного интервала проявления негативных процессов, связанных с формированием в окрестностях ведения подземных строительных работ зон предельных состояний и разрушительных деформаций. Разработанный и сформированный методический аппарат позволяет с достаточной степенью объективности и надежности оценивать и прогнозировать эксплуатационную устойчивость подземных сооружений в грунтовых массивах с физической нелинейностью и расширяет интерпретацию



сложившихся гипотез и представлений, сопутствующих геомеханических процессов.

### Публикации автора

1. Цюпа Д.А. Методические и методологические составляющие процедуры прогнозной оценки деформаций и смещений в области взаимосвязанного влияния ведения подземных горных работ. Журнал «Уголь», №8, 2023, с.96-101.(Scopus).

2. Цюпа Д.А. Систематизация причин возникновения аварийных ситуаций при строительстве подземных сооружений. Журнал «Уголь», №7, 2023, с.72-75. (Scopus).

3. Цюпа Д.А., Панкратенко А.Н. Обоснование технологических решений по сохранности и эксплуатационной надежности существующих тоннелей метро, попадающих в зону влияния нового строительства. Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. №2, 2023.С. 367-373. (Web of Science).

4. Цюпа Д.А. Оценка влияния технологии строительства тоннельных сооружений на породы приконтурного массива с использованием метода конечных элементов. Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. №7, 2023. С. 426-436. (Web of Science).

5. Цюпа Д.А. Особенности проектирования линии скоростного транспорта в Челябинске в условиях плотной застройки. Метро и тоннели. 2023. № 2. с. 9-12.

6. Цюпа Д.А. Оценка надежности технологических решений при проектировании и строительстве объектов метрополитена с учетом влияния существующей застройки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 10 (специальный выпуск 10). — С. 3–9. DOI:10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_10\_3.

7. Цюпа Д.А. Определение параметров модели упрочняющегося грунта HARDENING SOIL в виртуальной лаборатории PLAXIS SOIL, необходимых для оценки надежности технологических решений при проектировании и строительстве объектов метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 10 (специальный выпуск 10). — С. 10–18. DOI:10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_10\_10.