

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

Насибуллин Рамиль Раильевич

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА И
ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ ПРИ ПРОХОДКЕ
ТОННЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТПМК

2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и
горная теплофизика»

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Набатов Владимир Вячеславович

Москва, 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования связана с активным развитием подземного транспорта в крупных городах и, в частности, в Москве. Увеличение протяженности строящихся тоннелей метро с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) приводит к возникновению новых, нетипичных ситуаций, к которым относится проходка тоннелей под существующими железнодорожными путями.

Поскольку город пронизан транспортными системами, как наземными, так и подземными, всё чаще возникают ситуации их пересечения. При этом в последние годы наблюдается рост количества аварий. Это легко объяснить увеличением объёмов подземного строительства, необходимостью работать во всё более усложняющейся геологической среде мегаполиса, а также повышением требований к безопасности объектов современного строительства.

Существенно снизить вероятность аварии можно с помощью геомеханического прогноза, который служит основанием для принятия технологических решений и традиционно реализуется построением прогнозных моделей с использованием конечно-элементного численного моделирования. Одним из наиболее перспективных решений также является использование технических средств контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) в глубине породного массива.

Стоит отметить, что результаты геомеханического прогноза довольно часто расходятся с результатами поверхностных геодезических наблюдений. Наиболее вероятными причинами этой ситуации является недостаточная изученность вопросов сложного напряженно-деформированного состояния массива пород (НДС) в его глубине, возникающего при подземном строительстве. Кроме того, существуют неточность определения свойств пород при инженерных изысканиях и неизвестность технологических аспектов строительства (например, перебор грунта при щитовой проходке), применяемых при расчете прогнозной модели. Важен и тот факт, что прогнозные модели фактически верифицируются по измерениям, производимым только в ограниченной части массива на поверхности Земли или на стенках тоннеля. Обширные области внутренней части массива пород, находящегося под воздействием проходки, фактически никак не контролируются.

Важность снижения рисков при увеличении объёмов подземного строительства, а также увеличение количества ситуаций пересечения строящихся тоннелей и железнодорожных линий, присутствие ряда нерешенных проблем геомеханического прогноза и контроля делает тему исследования влияния проходки тоннелей с помощью ТПМК на железнодорожные пути важной и актуальной для исследования.

Цель работы состоит в выявлении закономерностей поведения грунтового массива при подземном строительстве тоннелей метрополитенов, служащих основанием

для разработки технических решений по безаварийной эксплуатации железнодорожных путей, находящихся в зоне воздействия подземного строительства.

Идея работы заключается в совместном анализе результатов конечно-элементного моделирования и натурных измерений деформаций поверхностных и глубинных участков породного массива при проходке тоннелей с помощью ТПМК под системой железнодорожных путей для выявления причин неравномерного опускания грунта под ними.

Задачи исследования:

1. Провести натурные исследования в ситуациях пересечения трассы ТПМК и железнодорожных путей с использованием геотехнических и геодезических методов. Выявить закономерности в полученных результатах измерений.

2. Построить ряд конечно-элементных моделей, соответствующих условиям проведения исследований, и провести их валидацию по данным натурных измерений.

3. Исследовать полученные ранее конечно-элементные модели, выявить закономерности поведения породного массива. Исследовать влияние параметров конечно-элементных моделей на результаты моделирования.

4. Выявить нежелательные проявления, наблюдаемые в процессе проходки тоннеля под железнодорожными путями, путем анализа результатов натурных и модельных исследований. Разработать рекомендации по геомеханическому обеспечению безаварийной эксплуатации железнодорожных путей в процессе ведения проходки.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. По результатам натурных наблюдений за грунтовым массивом и рельсами железнодорожного полотна в зоне влияния ТПМК установлено большее опускание дальних по отношению к приближающемуся забою рельсов по сравнению с ближними, что может служить источником аварий.

2. Выявлена причина большего опускания дальнего по отношению к приближающемуся забою рельса, состоящая в несимметричном относительно оси железной дороги распределении областей пластических деформаций, вызванных неравномерным деформированием массива при перемещении ТПМК.

3. Выявлена закономерность возникновения двух временных максимумов абсолютных значений скоростей V_1 и V_2 горизонтальных деформаций грунтового массива в процессе движения ТПМК, соотношение которых V_2/V_1 служит индикатором снижения чрезмерных деформаций и минимизации изменений напряженно-деформированного состояния массива пород в результате проходки.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

– непротиворечивостью результатов исследования законам геомеханики и общим законам физики;

- применением средств измерений с высокими метрологическими характеристиками, а также хорошо зарекомендовавших себя методов и программ расчёта конечно-элементных моделей и обработки экспериментальных данных,
- удовлетворительными результатами валидации построенных численных моделей по экспериментальным данным;
- хорошей сходимостью результатов натурных измерений и результатов расчёта конечно-элементных моделей.

Методы исследований включают: анализ и обобщение научно-технической информации; статистический анализ результатов натурных измерений; сравнительный анализ конечно-элементных моделей; валидация получаемых моделей по результатам с натурального эксперимента.

Научная новизна работы заключается в:

- выявлении закономерностей, связанных с неравномерными вертикальными осадками приближенных к забою ТПМК и удалённых от него участков железнодорожного полотна, способных быть причиной развития аварийной ситуации;
- выявлении несимметричного распределения областей пластической деформации вблизи железнодорожных путей, находящихся в зоне воздействия проходки с помощью ТПМК;
- выявлении закономерностей, состоящих в увеличении, уменьшении и повторном увеличении скоростей горизонтальных деформаций, наблюдающихся в глубине массива при строительстве тоннеля.

Практическая значимость и реализация результатов:

Разработаны «Методические рекомендации по контролю воздействия проходки тоннелей метро с помощью ТПМК на грунтовое основание железнодорожных путей по результатам инклинометрических измерений», переданные для использования в ООО «СпецСтройЭксперт».

Апробация работы

Результаты работы были представлены на следующих конференциях: XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (9-11 февраля 2024 г., Институт горного дела УрО РАН г. Екатеринбург); «Неделя горняка — 2024» (29 января – 2 февраля, г.Москва); Междисциплинарная дискуссионная научно-практическая конференция «Мониторинг состояния сооружений и оснований: диагностика, оценка и прогнозирование» (24-26 апреля 2024 г., г.Сочи); 6 конференция Международной научной школы академика РАН К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр», посвященная 300-летию Российской академии наук, 17-21 июня 2024 г. , ИПКОН РАН , г.Москва;XXV международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 30 сентября - 4 октября 2024 г., ГЕОХИ, ИФЗ и ИГЕМ РАН, ГО «Борок» ИФЗ РАН, г.Москва.

Публикации: По теме диссертации опубликованы 4 научные работы, в том числе 2 – в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 164 источника, содержит 46 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** анализируется современное состояние ряда проблем, связанных с прогнозом и контролем деформаций грунтового массива при проходке тоннелей метрополитенов. В частности, проанализированы основные типы аварий, возникающие при проходке, основные методы контроля, используемые для предотвращения этих аварий. Проанализирована роль различных факторов, которые влияют на результаты прогноза. Выявлено современное состояние вопросов оценки воздействия проходки на грунтовой массив. Отмечена роль ученых, которые внесли ощутимый вклад в развитие данного направления, среди них Вознесенский А.С., Волохов Е.М., Гусев В.Н., Исаев О.Н., Мазеин С.В., Тер-Мартirosян А.З., Шарафутдинов Р.Ф., Attewell P.V., Broere W., Langmaak L., Mair R.J., Peck R.V. и др.

Анализ научных публикаций показал, что довольно часто возникает ситуация, когда результаты конечно-элементного моделирования и геодезического либо геомеханического контроля существенно расходятся. В некоторых случаях это приводит к аварийным ситуациям. Чаще всего причинами этого расхождения называются недостаточная точность лабораторных оценок физико-механических свойств грунта (изъятие кернов из скважин изменяет их свойства, локально определённые свойства не представляет свойства всего породного массива), сложность в определении технологических параметров (например, перебор грунта), недостаточная изученность процессов в породном массиве при проходке.

Следует отметить, что подавляющее количество исследований, ведущихся как в направлении улучшения работы прогнозных моделей, так и в направлении изучения процессов в породном массиве при проходке с помощью ТПМК, используют подход, когда результаты моделирования поверяются только результатами геодезических и маркшейдерских измерений. То есть при этих исследованиях в процессе проходки анализируются только деформации поверхностей, что, возможно, связано с дороговизной других видов деформационных измерений непосредственно в массиве пород. В результате случаи валидации моделей по измерениям деформаций внутри массива довольно редки, а общий объём исследований поведения грунтов в толще массива явно недостаточен.

Обзор научных публикаций позволил сделать вывод, что тема, связанная с изучением особенностей поведения массива горных пород и, в частности, основания же-

лезнодорожных путей при проходке тоннелей с целью обеспечения их безопасности, является важной и при этом недостаточно разработанной, то есть актуальной.

На основе анализа материалов первой главы были сформулированы представленные выше цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена регистрации полевых измерений, произведённых на ряде участков, характеризующихся сложной горно-технологической ситуацией. Оценка горно-технологической ситуации как сложной связана с тем, что на этих участках проходка тоннелей Московского метрополитена велась под системой эксплуатируемых железнодорожных путей. Потенциальная опасность этой ситуации потребовала проведения процедур геотехнического мониторинга, состоявшего в многоцикловых измерениях с помощью инклинометрических наблюдательных скважин, а также процедур геодезического мониторинга. Обработка полученных результатов позволила выявить закономерности в изменении напряжённо-деформированного состояния породного массива, которые легли в основу научных положений. В процессе проведения исследований также использовались натурные данные с других площадок обследования (объектов), на которых производились только геодезические измерения.

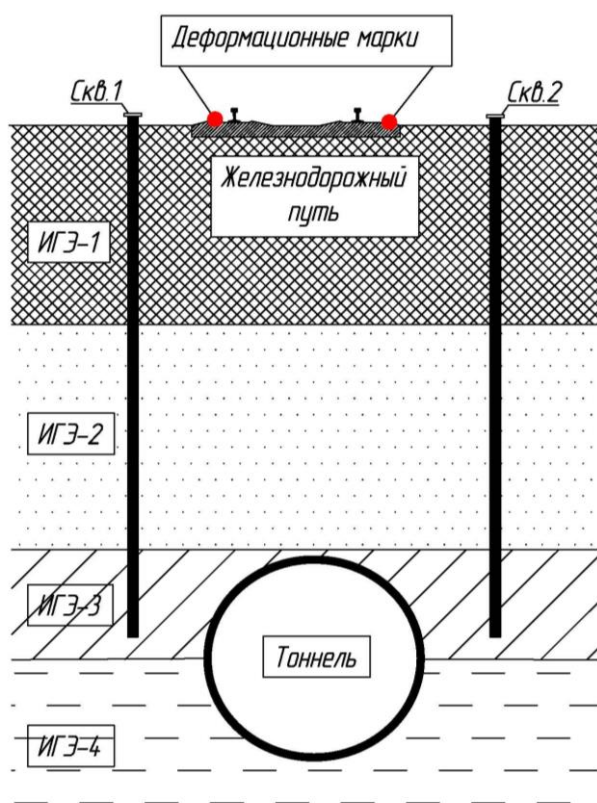
Перегонные тоннели сооружались закрытым способом с применением тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК) фирмы «Herrenknecht» диаметром 6.25 м с грунтопригрузом забоя. Параметры обделки сооружаемого тоннеля: диаметр кольца 6.0 м, ширина 1.4 м, толщина 0.3 м, бетона класса В45. Геологический разрез сложен в основном песчаными породами и техногенными отложениями со слоями суглинков небольшой мощности.

В зону влияния строительства попали железнодорожные пути. По железнодорожным путям регулярно движутся составы, в том числе высокоскоростные поезда «Сапсан». На период проходки на железнодорожном полотне устраивались страховочные пакеты (системы креплений, устанавливаемые на рельсах при осуществлении строительных работ под железнодорожными путями).

Трассу строящихся тоннелей пересекает несколько систем железнодорожных путей – сеть главных путей, а также стрелочные переводы, что потребовало организации большого количества мест измерения (далее по тексту эти места будут называться участками измерений). В результате от участка к участку геологический разрез существенно менялся, что происходило как за счёт выклинивания слоёв грунта, так и за счёт существенного понижения уровня дневной поверхности. Это позволило получить результаты для различных вариантов строения массива пород. Один из вариантов разреза представлен на рисунке 1. На рисунке также нанесены скважины для геотехнических измерений, описанные ниже.

Геодезические изыскания. Геодезические изыскания реализовывались в форме геодезического мониторинга абсолютных деформаций основания и самих железнодорожных путей. Для мониторинга было создано деформационное обоснование: одна ис-

ходная группа и две контрольные, каждая состояла из трёх реперов. Контроль стабильности высотного деформационного обоснования производился 1 раз в неделю. Для производства наблюдений за деформациями верхнего строения пути закладывались деформационные марки. Шаг установки марок – 5 м. Общее количество марок – 310 шт. Геодезический мониторинг производился с частотой не менее 1 раза в 6 часов.



ИГЭ-1	Насыпной грунт: песок средней крупности средней плотности от малой до средней степени водонасыщения
ИГЭ-2	Песок средней крупности средней плотности от средней степени водонасыщения до водонасыщенного
ИГЭ-3	Суглинок легкий песчаный мягкопластичный
ИГЭ-4	Песок мелкий средней плотности от средней степени водонасыщения до водонасыщенного

Рисунок 1 – Пример типичного геологического разреза, а также типичной схемы измерений с указанием расположения инклинометрических скважин и геодезических деформационных марок

Для определения превышений между деформационными марками выполнялся метод геометрического нивелирования II класса (согласно п. 6.3 ГОСТ 24846-2012). Измерения производились высокоточным цифровым нивелиром SOKKIA SDL 30 (п. 6.3.2. ГОСТ 24846-2012). Наиболее важными для последующего анализа оказались вертикальные деформации железнодорожного полотна U_z . Точность измерения этих деформаций составила 0,3 мм.

В результате анализа вертикальных деформаций U_z железнодорожного полотна была выявлена закономерность, которая легла в основу первого научного положения. При сопоставлении поведения точек, находящихся над трассой строящегося тоннеля, и располагающихся так, что одна марка находится ближе к забою строящегося тоннеля, а другая дальше от забоя, была выявлена следующая особенность. В большинстве случаев точка, более удалённая от забоя, испытывала значительные вертикальные деформации.

ции, в ряде случаев начинающиеся ранее по времени. На рисунке 2 представлен ряд типичных наблюдавшихся ситуаций.

На рисунке 2 а представлена ситуация, когда обе марки начинают испытывать деформации U_z одновременно. Однако, с течением времени более удаленная точка испытывает более существенные деформации. После смещения, вызванного проходкой (55-й цикл) эта тенденция сохраняется. В процессе анализа результатов было получено большое количество подобных графиков. Разница между вертикальными деформациями ΔU_z колеблется от 0.7 до 4 мм.

Также в ряде случаев возникала ситуация, когда удалённая от забоя точка не только испытывала более существенные деформации, но и начинала смещаться раньше приближённой точки (см. рисунок 2 б). Такое развитие ситуации приводило к тому, что в течение длительного времени наблюдался перепад высот между удалённым от забоя рельсом и приближённым к забою рельсом. На рисунке перепад составляет более 10 мм.

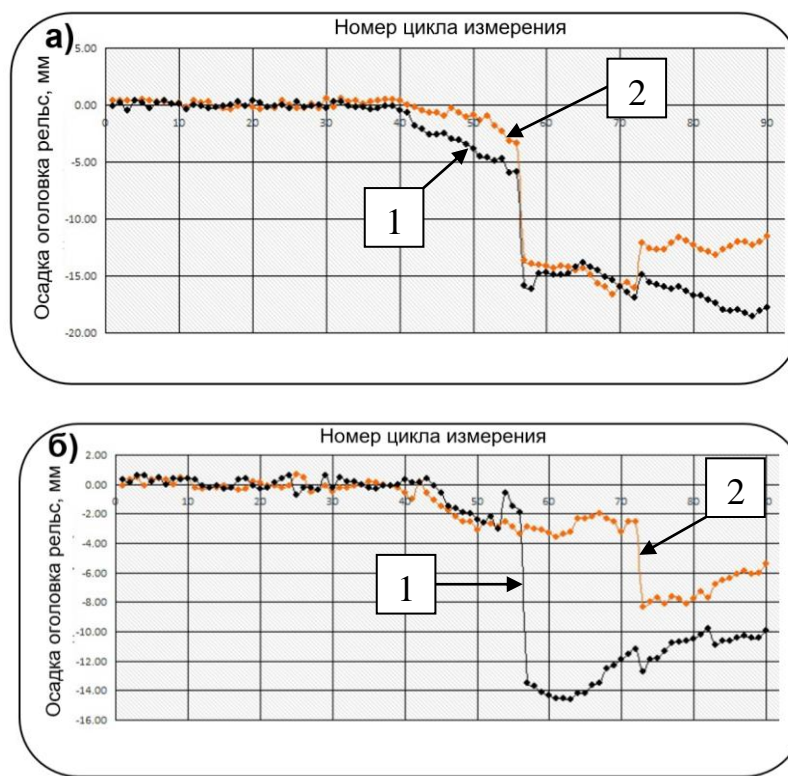


Рисунок 2 – Деформации оголовков рельс для ряда изыскательских площадок: а, б –различные участки; точки: 1– удалённая от забоя, 2 – приближённая к забою

Для того чтобы оценить, насколько часто встречаются случаи «дальняя точка испытывает большие деформации», информация с множества объектов была сведена в единый журнал. Отобраны случаи, когда марки находятся на оси тоннеля либо вблизи от неё. Результат этого анализа представлен на рисунке 3 в виде столбиковой диаграммы (размер выборки – 54 элемента). Хорошо видно, что на всех четырёх участках случаи «дальняя точка испытывает большие деформации» (синие столбцы) преобладают.

Согласно нормативам, предельный уровень, после которого вводится ограничение на скорость движения поездов, составляет 20 мм («Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути ОАО РЖД» № 2288р от 14.11.2016). При этом наблюдаемые максимальные перепады высот между удалённым от забоя рельсом и рельсом, приближённым к забою, не превышают 10 мм. Однако стоит учесть, что в случае воздействия ряда негативных факторов, таких как наличие разуплотнений вблизи железнодорожных путей, эксплуатация путей с повышенной нагрузкой, перебор грунта ТПМК и прочих, оно может обострить ситуацию и привести к аварии.

Используя собранные данные о максимальных перепадах, можно оценить вероятность возникновения ситуации, когда перепад составит более 20 мм. Для этого значения наблюдаемых максимальных перепадов были аппроксимированы логнормальным распределением (см. рисунок 4). Проверка полученной теоретической кривой по критерию согласия Пирсона позволила принять решение, что различия между фактическими и теоретическими значениями незначительны.

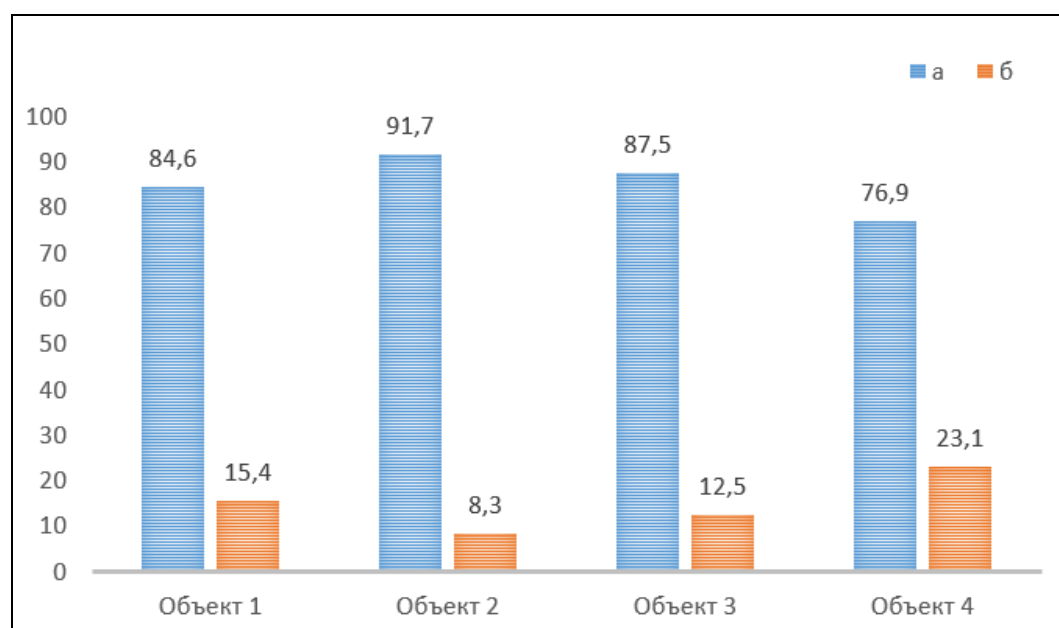


Рисунок 3 – Соотношение случаев наличия (*a*) и отсутствия (*b*) ситуации «дальняя точка испытывает большие деформации» для различных объектов обследования

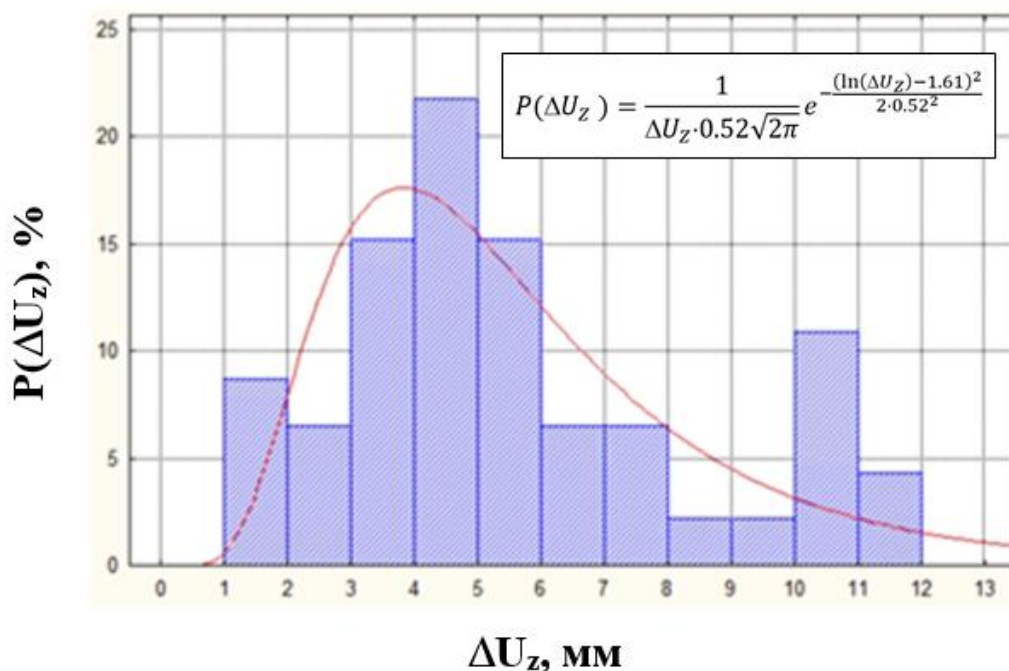


Рисунок 4 – Аппроксимация выборки значений ΔU_z логнормальным законом распределения

Анализируя полученную теоретическую кривую, можно отметить, что значение 20 мм соответствует 99.6-му перцентилю. Это означает, что вероятность наблюдения перепада между ближней и дальней точками более 20 мм составит $P = 0.004$. Другими словами, эта ситуация может наблюдаться в каждом из 250-случаев, что, учитывая опасность события, стоит признать достаточно высокой вероятностью.

Стоит также отметить, что вероятность события $U_z > 20$ мм в несколько раз превышает вероятность, соответствующую критерию 3σ ($P_{3\sigma} = 0.00137$ для одностороннего усечённого распределения), которая традиционно принимается в качестве невероятного события. Такое событие уже нельзя считать невозможным.

Таким образом, в процессе проведённых исследований удалось выявить закономерности в особенностях деформирования основания железнодорожного полотна, связанные с различными величиной и характером изменения вертикальных деформаций, и обосновать опасность их возникновения. Этими результатами подтверждается **первое научное положение**.

Геотехнические изыскания. Геотехнические изыскания были представлены инклинометрическими измерениями. Инклинометрические скважины закладывались в грунтовой массив с отступом от оси проходки на 5-7 метров с обеих сторон.

На рисунке 1 представлена схема установки наблюдательных скважин для одного из участков (участок №1). Присутствовали варианты размещения скважин: «две инклинометрические скважины» и «одна инклинометрическая скважина» (не всегда существовала возможность разместить скважины с обеих сторон из-за присутствия раз-

личных технических сооружений). Стадии обустройства скважин включали: бурение (УБГ-С-30 «Беркут», диаметр 200 мм), монтаж направляющей трубы, установка измерительного оборудования, заполнение скважин универсальным заменителем грунта. Инклинометрические скважины обустраивались после устройства страховочных пакетов, поскольку их установка могла повредить измерительное оборудование. Геотехнический мониторинг производился с частотой не менее 1 раза в 6 часов.

Для измерений в наблюдательных скважинах использовались скважинные инклинометры, состоящие из измерительного зонда и блока сбора данных. Измерительный зонд представлял собой металлический стержень с двумя MEMS-датчиками внутри и двумя направляющими роликами снаружи. При горизонтальных деформациях грунтового массива, помещенный в скважину измерительный зонд изменял угол наклона. Блок сбора данных регистрировал показания датчиков углов наклона и преобразовывал данные в горизонтальные перемещения.

Через 7 дней после обустройства скважин был выполнен нулевой цикл измерения. Необходимость выдержки этого временного отрезка связана с тем, что оборудование подвергается усадке, создающей небольшие помеховые деформации. По результатам предварительного контроля стало ясно, что эти деформации прекратились через 5 дней после обустройства скважин. Дополнительно проводился геодезический контроль оголовка инклинометрических скважин с привязкой к опорным реперам, расположенных вне зоны влияния строительства.

Инклинометрические измерения проводились вдоль двух перпендикулярных осей – А и Б. Ось А была направлена на железнодорожное полотно, ось Б была параллельна железнодорожному полотну. Для измерения вдоль одной из осей, зонд должен был пройти всю скважину, после чего он вынимался из скважины, ориентировался вдоль другой оси, и серия измерений повторялась. В процессе измерений зонд фиксировался каждые 0,5 м, в которых производились измерения.

Перемещение зонда по скважине происходило по четырем продольным направляющим пазам, расположенным по всей глубине скважины. Наличие пазов позволяло контролировать единообразие положений зонда при всех циклах измерений. Поскольку оси были направлены вдоль и поперёк ожидаемых максимальных деформаций, не было необходимости в пересчете направлений деформаций.

Анализ обработанных измерений проводился после каждого цикла. Такой подход позволил оперативно предоставлять рекомендации по дальнейшей эксплуатации железнодорожных путей. При достижении просадок свыше 50 мм аварийной бригадой производилась подсыпка щебня (земельного полотна) и выправка верхнего строения пути, что позволяло избегать появления аварийной ситуации в процессе строительства.

По результатам обработки произведённых измерений были получены значения деформаций массива (горизонтальные смещения в скважинах сбоку от ЖД-путей) для

различных глубин. На рисунке 5 представлены результаты скважинной инклинометрии по скважине №1 и скважине №2).



Рисунок 5 – Результаты скважинной инклинометрии (скважина №1 и скважина №2)

При анализе данных наибольший интерес вызвали стабильно проявляющиеся особенности изменения скоростей деформирования на различных глубинах. Эти особенности можно проиллюстрировать графиками скоростей деформаций на различных глубинах (рисунок 6; оси абсцисс графиков описывают скорости деформаций, оси ординат – глубины). В процессе построения этих графиков для конкретной глубины брались приращения абсолютных деформаций ΔU_x [мм] между определёнными циклами скважинных измерений. График А – между 1 и 0 циклом; график Б – между 2 и 1 циклом; график В – между 3 и 2 циклом; график Г – между 4 и 3 циклом; график Д – между 5 и 4 циклом (график для диапазона времени Е – между 6 и 5 циклом и более поздними – опущены, поскольку слабо отличаются от графика диапазона времени Д).

Анализируя полученные графики, можно отметить, что в процессе проходки вблизи измерительной скважины скорости деформирования участков грунтового массива изменяются по-разному на различных глубинах. Эти описываемые глубины разделены на два диапазона: ДП1 – 1...7 м и ДП2 – 9...16 м (указаны на рисунке 6).

Далее из полевых журналов бралось время регистрации измерений Δt (в часах). Скорости деформаций V_n вычислялись как (размерность скоростей – мм/час):

$$V_n = \Delta U_x / \Delta t.$$

На рисунке 7 представлена привязка циклов измерения к положениям забоя ТПМК.

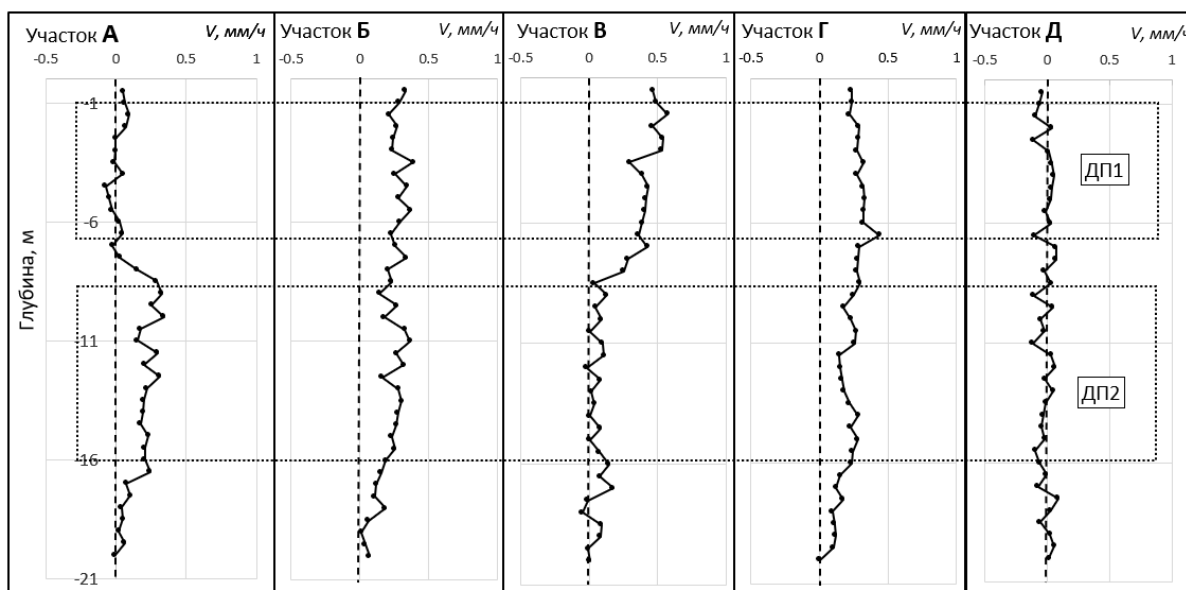


Рисунок 6 – Графики скоростей деформаций для скважины №1. Скорости вычисляются между: А – 1-м и 0-м циклами; Б – 2-м и 1-м циклами; В – 3-м и 2-м циклами; Г – 4-м и 3-м циклами; Д – 5-м и 4-м циклами

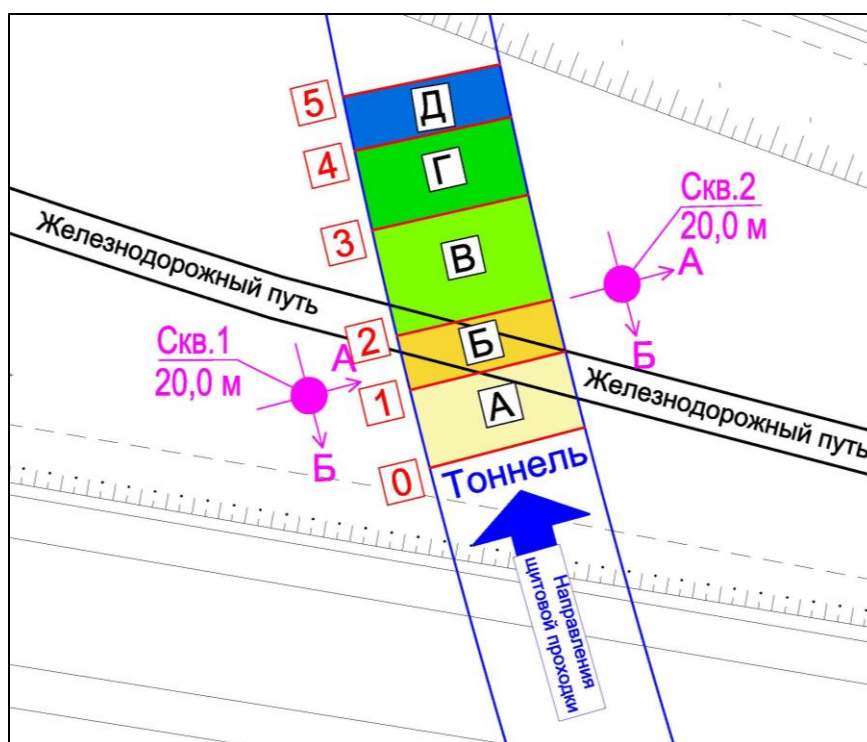


Рисунок 7 – Привязка циклов измерения к положениям забоя ТПМК

Анализируя изменения значений скоростей горизонтальных деформаций V_n по рисунку 6 в диапазоне ДП1, можно отметить, что на графике А деформации ещё не достигли приповерхностной области массива, на графиках Б и В видно возрастание значений V_n , на графике Г скорости V_n стали меньше (по сравнению с графиком В), на графике Д фактически просматривается отсутствие приращения деформаций. Другими

словами, реализуется типичная ситуация с достижением максимальных значений V_n в некоторый момент времени, после чего наблюдается их уменьшение.

В диапазоне глубин ДП2 ситуация развивается иным образом. На графике А наблюдаются высокие значения скоростей V_n (скважина находится недалеко от тоннеля и деформации быстро её достигают), на графике Б – ещё более высокие значения V_n , В – резкое уменьшение V_n , Г – снова высокие значения V_n , Д – низкие значения. Другими словами, графики имеют два отрезка времени, когда происходит увеличение абсолютного значения V_n , и один отрезок времени в середине процесса, когда происходит существенное уменьшение скоростей V_n .

Для упрощения сравнительного анализа были построены графики средних значений скоростей V_n для диапазонов ДП1 и ДП2 в зависимости от периодов времени А-Е (для удобства анализа периоды времени пересчитаны в диапазоны расстояний «забой-скважина» $L_{зс}$). Графики представлены на рисунке 8. Приведены результаты вычислений для ряда участков (рисунок 8, а-в), существенно отличающихся строением разреза.

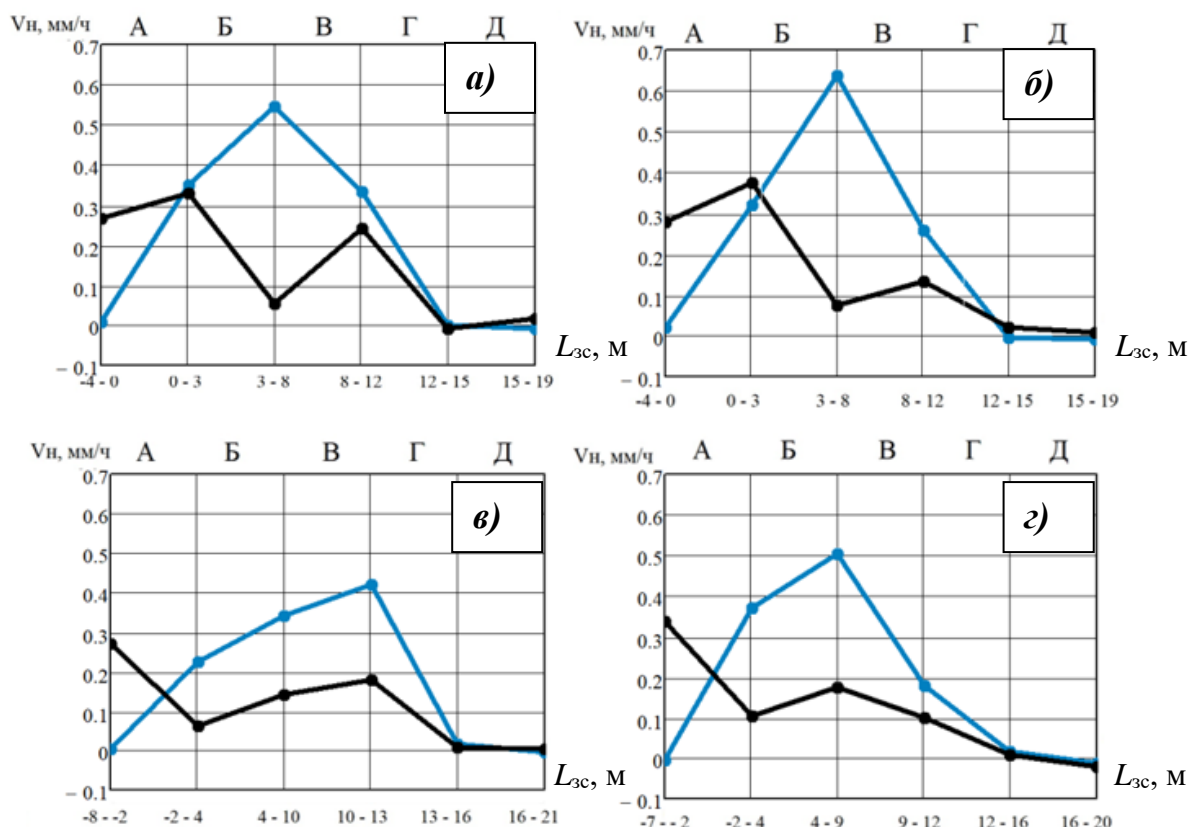


Рисунок 8 – Изменения средних скоростей деформаций V_n в зависимости от положения забоя для различных диапазонов глубин (синий – ДП1, черный – ДП2): а – скважина №1, б – скважина №2, в – скважина №3, г – скважина №4

Анализируя графики, можно отметить повторяющуюся во всех случаях закономерность. Если для поверхностного диапазона ДП1 характерно постепенное увеличе-

ние скоростей деформации, а потом их уменьшение, то для диапазона ДП2 характерной особенностью является процесс возрастания скоростей деформаций, потом уменьшение этих скоростей и повторное возрастание. Таким образом, график изменения абсолютных значений скоростей горизонтальных деформаций имеет чётко выраженную двухпиковую природу с обязательным присутствием в середине процесса участка с низкой скоростью деформаций. Наблюдаемая закономерность проявилась практически на всех инклинометрических скважинах.

Для того, чтобы подтвердить полученные в натурных измерениях результаты, было проведено конечно-элементное моделирование. Результаты этого моделирования представлены в следующей главе.

Третья глава посвящена вопросам создания и валидации конечно-элементных моделей сложной горно-технологической ситуации, описанной во второй главе. Работа велась как на моделях с параметрами, соответствующими специфике площадок, на которых были получены натурные данные, так и на обобщённых моделях (однородный массив, состоящий из одного слоя и др.). В результате произведённых исследований удалось достичь хорошей сходимости между конечно-элементными моделями и результатами натурных измерений.

Построение и расчёт моделей, а также исследование влияния параметров моделей на результаты моделирования производилось с помощью программного комплекса «Plaxis 3D». При работе с 3D-моделями в основном использовались модели, симметричные относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось строящегося тоннеля. С целью проверки независимости результатов от допущений тех или иных моделей проводился ряд дополнительных исследований. При этом рассчитывались модели: представляющие собой полный объём массива пород; имеющие увеличенные размеры модели и более детальную сеть конечных элементов; обобщённые модели без деления на слои (вся модель имеет свойства, типичные для того или иного типа пород); модели с различным относительным расположением тоннеля и ЖД-путей и т.п.

В процессе проведения моделирования было решено, что возникающие при перемещении ТПМК различные расстояния между забоем и скважиной, а также забоем и железнодорожными путями нужно моделировать не как перемещение забоя, а как перемещение самого объекта (скважины либо путей), что позволяет экономить время расчёта. Ситуации перемещения забоя при неподвижной скважине и железнодорожных путях также моделировались, дали схожие результаты, также они использовались на финальной стадии исследований.

Поведение грунтов описывалось идеально-пластической моделью Мора-Кулона. Исходные данные (геометрические параметры слоёв, физико-механические и деформационные характеристики) для расчетов были взяты из инженерно-геологических изысканий. Разрез в основном состоял из песчаных грунтов, с отдельными тонкими пластами суглинков. На различных участках разрез существенно менялся (выклинивание сло-

ёв, а также перепады уровня дневной поверхности). Для каждого из таких участков создавалась своя модель с конкретными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами. При моделировании проходки учитывался возможный перебор грунта V_L в соответствии с СП 249.1325800.2016. Нормативная временная вертикальная нагрузка от подвижного состава железных дорог принималась в виде максимальных эквивалентных нагрузок v [кН/м пути], в соответствии с СП 35.13330.2011 (п. 6.11). Размеры моделей выбирались исходя из рекомендаций СП249.1325800.2016. Внешний вид одного из вариантов модели с визуализированной сетью конечных элементов представлен на рисунке 9.

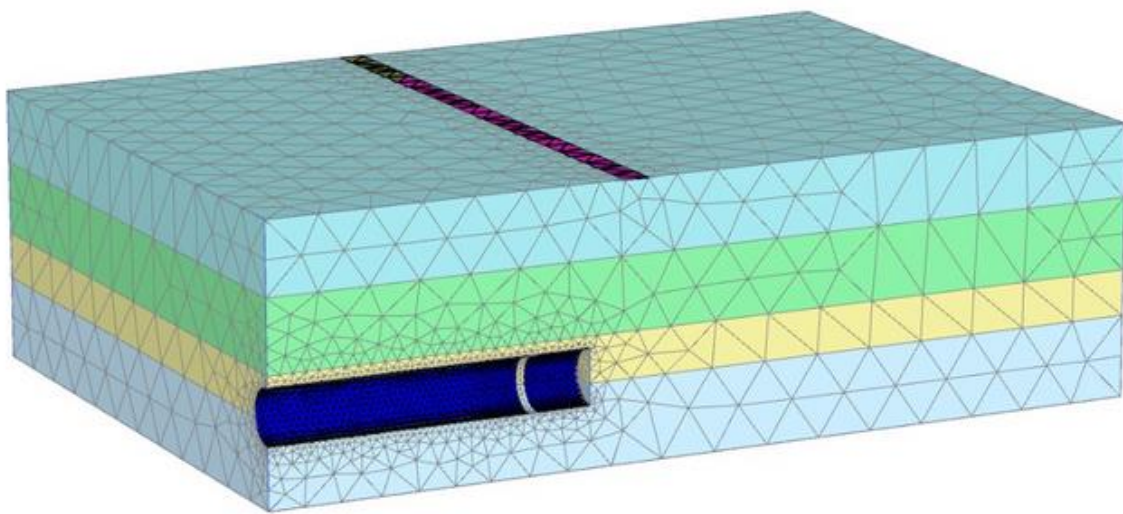


Рисунок 9 – Общая схема модели с разбивкой на конечные элементы

Расчёт моделей производился поэтапно: 1) начальное напряженное состояние грунтового массива, предшествующее строительству; 2) исходная стадия – строительство существующих железнодорожных путей; 3) строительная стадия – моделирование проходки перегонных тоннелей с помощью ТПМК.

Изменение напряжённо-деформированного состояния грунтового массива анализировалось путём построения карт и графиков различных параметров (горизонтальных, вертикальных, объёмных деформаций, касательных и нормальных напряжений; с помощью визуализации областей, в которых участки массива подверглись упругой либо пластической деформации).

В процессе расчёта модели с геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами, соответствующими лабораторным, были получены карты и графики, соответствующие закономерностям изменения скоростей деформаций в породном массиве на различных глубинах («первый пик» – «замедление» – «второй пик» для диапазона глубин ДП2 и «единственный пик» для диапазона глубин ДП1).

Это хорошо иллюстрируют карты значений на рисунке 10. Карты представляют собой горизонтальные сечения 3D-модели, в которых рассчитаны горизонтальные деформации U_x , направление которых совпадает с осью А при натурных измерениях в скважинах. На рисунке представлены два сечения (рисунок 10 а – сечение из диапазона ДП1, рисунок 10 б – сечение из диапазона ДП2). Сплошным прямоугольником (цифра 1) указано местоположение ТПМК. Пунктирным прямоугольником (цифра 2) показана область, в которой находится скважина. Точками указаны положения скважины, соответствующие номерам циклов измерения 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6. Чтобы соответствовать графикам рисунка 8, рядом с точками даны расстояния «забой-скважина».

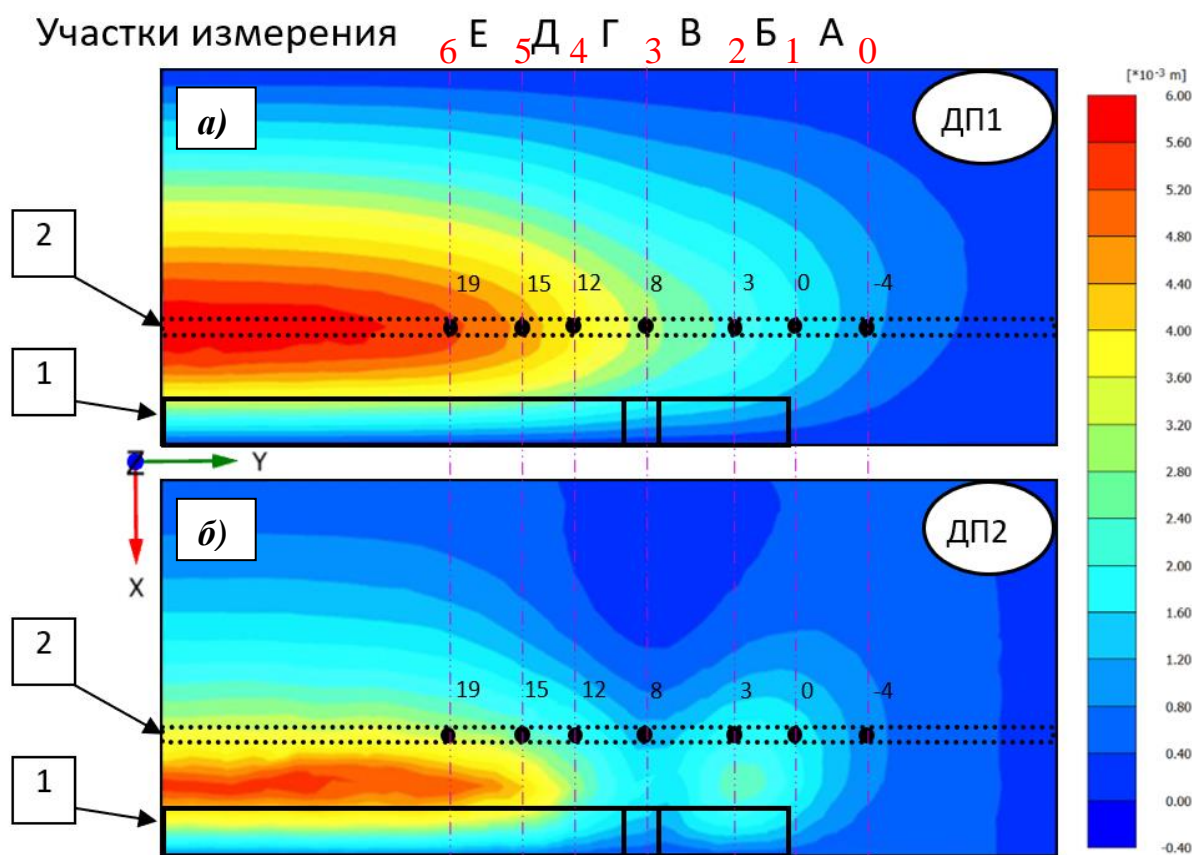


Рисунок 10 – Карты горизонтальных деформаций U_x в массиве пород, полученные для различных сечений 3D-модели на различных глубинах: а – 7.6 м; б – 12 м; 1 – проекция положения ТПМК (находится ниже сечений); 2 – участок массива соответствующий положениям скважины; цифрами даны расстояния между скважиной и забоем

При анализе карты рисунок 10 б (сечение из диапазона ДП2) можно отметить, что перемещение скважины внутри «коридора» (цифра 2) приводит к ситуации, когда горизонтальные деформации сперва нарастают, потом процесс приостанавливается, после чего начинается следующая стадия увеличения деформаций. Другими словами, модель ведёт себя аналогично тому, как ведут себя натурные данные. При анализе карты рисунок 10 а (сечение из диапазона ДП1) можно отметить, что ситуация изменилась –

присутствует единственное нарастание деформаций U_x , что также соответствует натурным измерениям.

Расчитанная модель позволяет получить графики скоростей деформаций V_m , аналогичные представленным на рисунке 8. Это можно сделать, опираясь на информацию об относительном положении забоя и скважины при производстве натурных данных. На рисунке 11 а даны графики изменения скоростей горизонтальных деформаций U_x , полученных по натурным измерениям V_n и по результатам моделирования V_m . Хорошо видно, что графики ведут себя схожим образом.

Полученные две выборки (модельные скорости V_m и натурные V_n) визуализированы в виде диаграммы рассеяния на рисунке 11 б. Эти данные были аппроксимированы линейной функцией, также был получен линейный коэффициент корреляции Пирсона R . Это позволило оценить сходимость результатов моделирования и натурных измерений. Для приведённого на рисунке 11 случая $R = 0.93$, что говорит о высокой схожести. Полученный коэффициент корреляции является значимым на уровне доверительной вероятности $p = 0.007$, что говорит о высокой надёжности полученной оценки корреляции. Подобные оценки для других скважин дали аналогичные результаты.

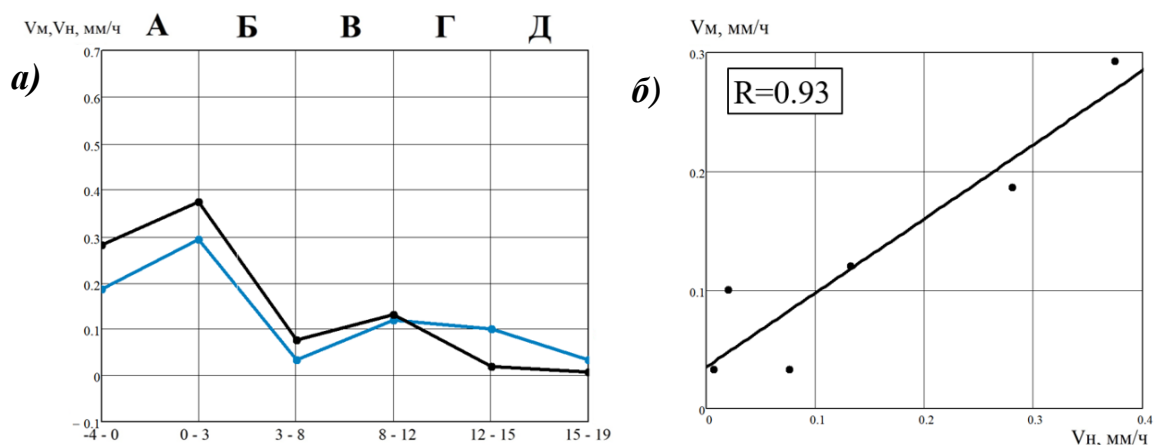


Рисунок 11 – Сравнение результатов натурных измерений и моделирования для скважины №2: а) – графики скоростей горизонтальных деформаций U_x , полученных на модели V_m и на натурных данных V_n для скважины №2; б) диаграмма рассеяния V_m на V_n с нанесённой регрессионной линией

На рисунке 10 приведены только два сечения 3D-модели. Анализируя промежуточные сечения, можно наблюдать как распределение горизонтальных деформаций в диапазоне ДП2 («два пика» скоростей деформаций) постепенно превращается в распределение ДП1 («один пик»). Этот переход происходит на тех же глубинах, где изменение характера скоростей происходит и в натурных данных. Из этого анализа модели можно сделать вывод о том, что переход картины распределения U_x ДП2 в картину U_x ДП1 происходит из-за того, что сглаживаются особенности изменения скоростей деформаций, реализующиеся на глубине.

Таким образом, в процессе проведённых исследований удалось выявить закономерности в изменении скоростей горизонтальных деформаций, возникающих под воздействием проходки, а также создать конечно-элементную модель, обладающую высокой сходимостью с натурными данными, и с её помощью подтвердить выявленные закономерности в изменении скоростей горизонтальных деформаций.

Четвертая глава посвящена вопросам исследования реакции конечно-элементных моделей, полученных на предыдущих этапах исследования, на изменение их параметров. Эта часть исследования велась по трем направлениям.

Первое направление включало исследование того, как параметры модели влияют на выявленный в натурных исследованиях и подтвержденный при моделировании эффект присутствия двух максимумов скоростей горизонтальных деформаций. Исследование производилось как расчёт множества моделей с различными параметрами. Варьировались размеры модели и размеры слоёв пород, глубина расположения ТПМК, диаметр строящегося тоннеля, физико-механические свойства пород, давление тампонажного раствора. При исследовании брались максимальные и минимальные типичные значения параметров, исследовались также промежуточные значения.

В процессе исследования стало ясно, что эффект с двумя максимумами скоростей наблюдается в рамках некоторой зоны, имеющей свой размер. При этом на этот размер, а также на величину максимума скорости существенное влияние оказывает только давление тампонажного раствора, а остальные параметры модели влияют слабо.

При работе с моделью было отмечено, что первый скоростной максимум связан с прохождением забоя вблизи измерительной скважины и фактически связан с началом усадки грунта на ТПМК. Второй скоростной максимум возникает после прохождения мимо измерительной скважины участка ТПМК, где происходит нагнетание тампонажного раствора. Анализ множества полученных моделей также показал, что время между максимумами слабо зависит от различных параметров модели. Единственным существенно влияющим фактором является геометрия ТПМК (расстояние между забоем и местом нагнетания тампонажного раствора). Эти особенности были использованы при разработке методики контроля давления тампонажного раствора, описанной ниже.

Второе направление было связано с исследованием того, как ведение проходки влияет на железнодорожные пути. За основу была взята валидированная по натурным данным модель, описанная выше, в которую были добавлены дополнительные стадии расчета, подразумевающие перемещения забоя. Последствием этого решения оказалось существенное увеличение времени расчета, однако этот подход позволил выявить интересные особенности поведения грунтового массива.

Рассчитывались варианты, когда забой неподвижен, а железнодорожные пути перемещаются, и варианты, когда перемещается забой, а железнодорожные пути остаются на одном и том же месте. Также рассчитывались варианты с различным положением железнодорожных путей (перпендикулярно строящемуся тоннелю, параллельно и

на различных расстояниях, под углом). Эти опробования давали аналогичные результаты. Далее по тексту в качестве основной выбрана модель, в которой железнодорожный путь и ось строящего тоннеля перпендикулярны друг к другу.

Основной целью исследования был анализ того, как изменяется форма областей, в которых грунты вблизи железнодорожных путей достигают стадии пластической деформации.

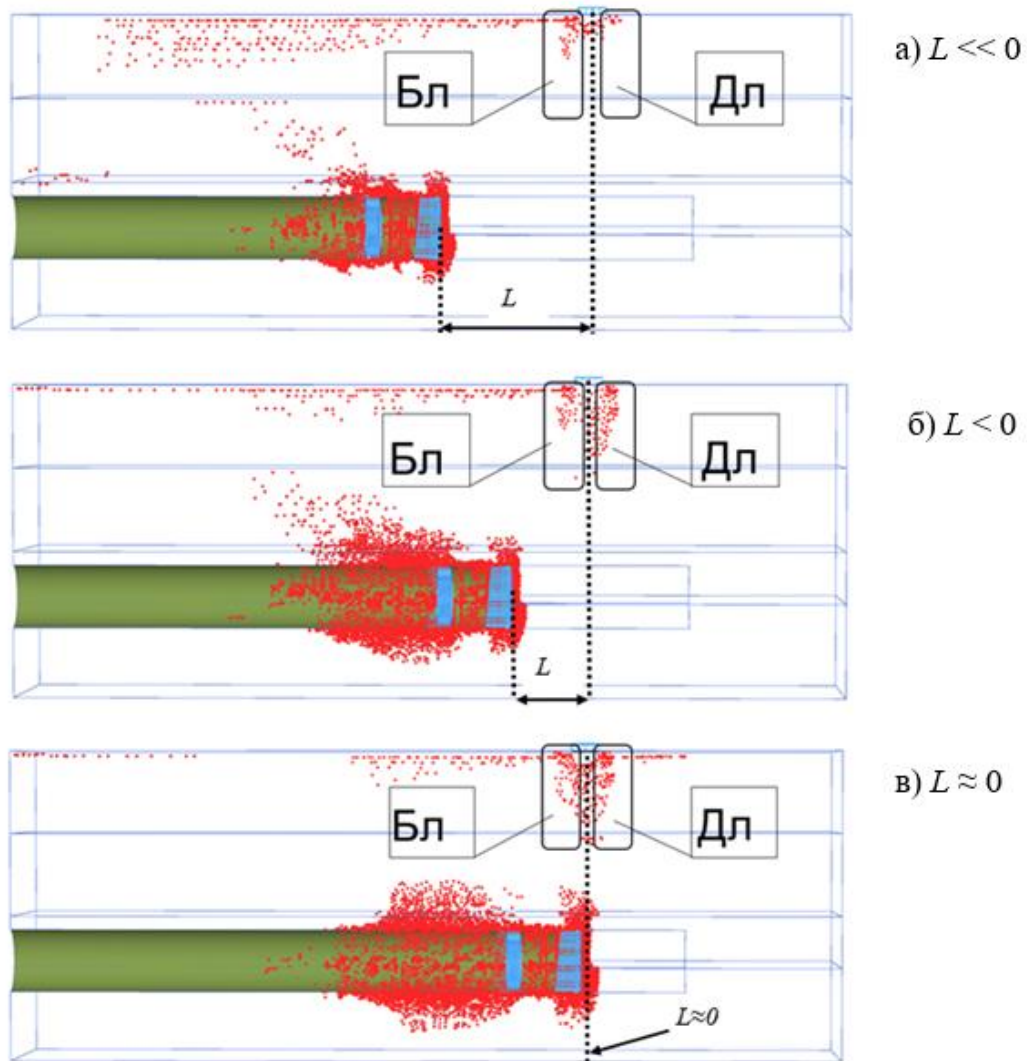


Рисунок 12 – Распределение в модели породного массива областей, в которых происходит пластическая деформация: Бл – ближняя зона, Дл – дальняя зона

Установлено, что области пластической деформации развивались не под железнодорожными путями, а по бокам от них. Поскольку железнодорожные пути и ось тоннеля пересекаются под прямым углом, то одна из таких областей будет приближена к забою, а вторая удалена. Эти области далее по тексту обозначаются как «Бл» (ближняя) и «Дл» (дальняя). Описываемые области в программном комплексе «Plaxis 3D» индицируются как облака точек, что хорошо видно на рисунке 12.

Наиболее интересным результатом исследования стал тот факт, что на определенных расстояниях размер зоны «Дл» был больше размера зоны «Бл». Это хорошо видно по рисунку 12, где показана геометрия областей пластических деформаций при различных положениях забоя. Особенно хорошо видна разная величина зон «Бл» и «Дл» по рисунку 12 б.

С целью проверки того, не является ли этот эффект результатом проявления особенностей моделирования, были просчитаны модели с другим размером моделируемого грунтового массива, другими физико-механическими свойствами, другим расположением тоннеля и железнодорожных путей (перпендикулярно, параллельно на разных расстояниях). Выявленные эффекты в этих случаях сохранялись.

Для того, чтобы оценить в какой степени проявляется этот эффект при приближении тоннелепроходческого комплекса к железнодорожным путям при каждом положении забоя ТПМК оценивались размеры зон, перешедшие к пластическому деформированию ($S_{Дл}$ и $S_{Бл}$), после чего вычислялось отношение их размеров $K = S_{Дл} / S_{Бл}$. Далее был построен график значений коэффициента K от расстояний «забой – железнодорожные пути» L , представленный на рисунке 13. График сглажен скользящим средним с шириной окна 4 элемента. Значения L в этом случае нужно читать следующим образом: $L \ll 0$ – забой далеко от ЖД, $L < 0$ – забой приближается к ЖД, $L \approx 0$ – забой проходит под ЖД.

K

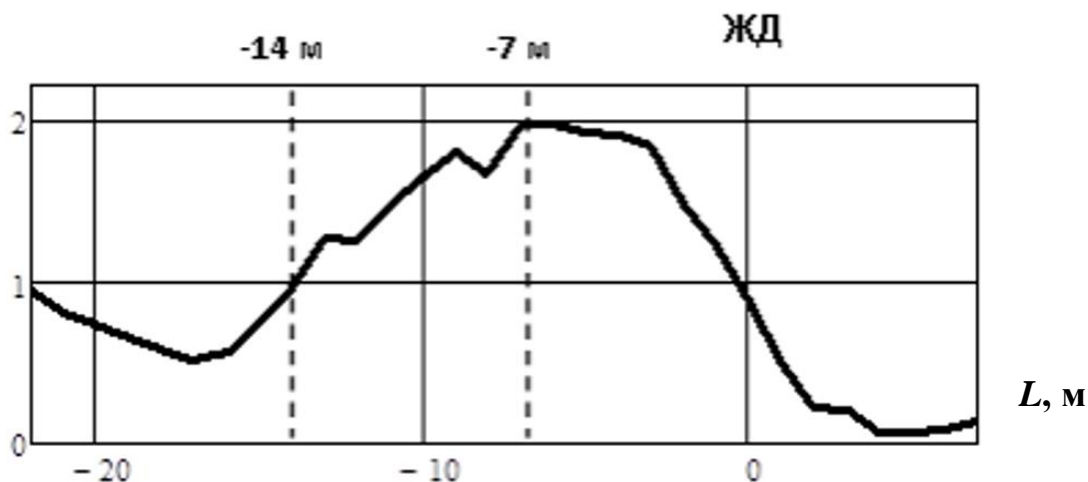


Рисунок 13 – Изменение отношения K при приближении забоя к участку расположения железнодорожных путей

Анализируя график можно отметить, что на большом расстоянии (более 20 м) отношение размеров дальней и ближней областей, перешедших к пластическому деформированию, равно единице. Далее, при передвижении забоя, сперва начинает более интенсивно развиваться процесс пластических деформаций в ближней зоне ($K < 1$), а

начиная с расстояния $L = -14$ м – в дальней ($K > 1$), приходя к ситуации одинакового развития ($K = 1$) под железнодорожными путями.

Таким образом, приближение забоя вызывает сложную, несимметричную, меняющуюся со временем картину распределения зон пластической деформации вблизи железнодорожных путей.

Очевидно, что подобное развитие процессов в породном массиве должно приводить к изменению характера деформирования самого железнодорожного полотна. По результатам проведённого моделирования были построены графики вертикальных деформаций точек железнодорожного полотна, представленные на рисунке 14. При анализе графика хорошо видно, что точки, находящиеся дальше от забоя, испытывают большие вертикальные деформации, что согласуется с результатами геодезических изменений, позволивших сформировать первое научное положение.

Указанная особенность деформирования массива может быть связана с отмеченным ранее рядом ученых явлением циклического образования достигающих поверхности наклонных плоскостей сдвига, которые формируются перед забоем ТПМК в процессе проходки.

Таким образом, выявленные закономерности, связанные с различным развитием пластических деформаций по бокам от железнодорожного полотна, позволили объяснить различие вертикальных деформаций приближённых и удалённых от забоя ТПМК и сформулировать **второе научное положение**.

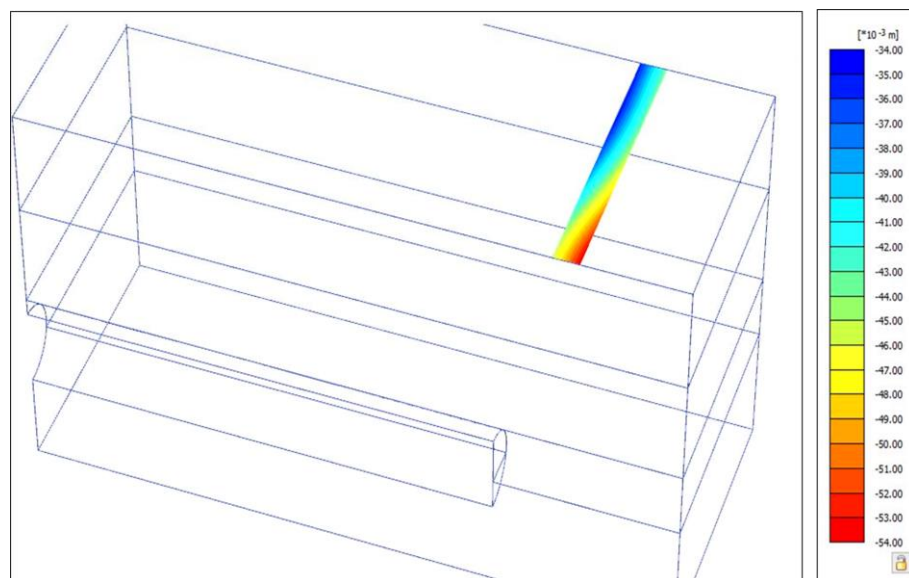


Рисунок 14 – Величины деформаций U_z железнодорожного основания по результатам моделирования

Третье направление исследования возникло как результат изучения реакции моделей на изменение их параметров, а также как результат совместного анализа натуральных данных автора и привлечённого эмпирического материала, собранного по публи-

кациям других исследователей. Этот материал был оцифрован, после чего были вычислены скорости (в этих публикациях анализ скоростей деформаций авторы не производили).

При анализе этих трех источников данных (моделирование, данные автора, привлеченные данные) было отмечено, что при наблюдении высоких значений соотношения скоростей деформаций второго и первого максимума V_2/V_1 также наблюдаются и высокие значения горизонтальных деформаций в массиве пород после окончания строительства тоннеля. При этом на предыдущих этапах исследования было выявлено, что именно давление тампонажного раствора наибольшим образом воздействует на величину второго пика скорости. Всё это привело к выводу о возможности использования инклинометрических измерений в качестве опорных данных для оптимизации давления тампонажного раствора.

Как привлечённые, так и натурные данные автора были объединены в один массив. При исследовании этого массива данных была выявлена закономерность, состоящая в высокой соизменчивости значений деформаций, наблюдающихся после прохождения ТПМК через конкретное сечение в массиве $\epsilon_{\text{ост}}$ и соотношением значений скоростей горизонтальных деформаций второго и первого максимумов V_2/V_1 . Описываемые данные представлены на рисунке 15 в виде облака рассеяния. Так же на рисунке дана аппроксимация этого облака линейной моделью $\epsilon_{\text{ост}}(V_2/V_1)$, при этом коэффициент корреляции составил $R = 0.93$. Эти результаты позволили сформулировать **третье научное положение**.

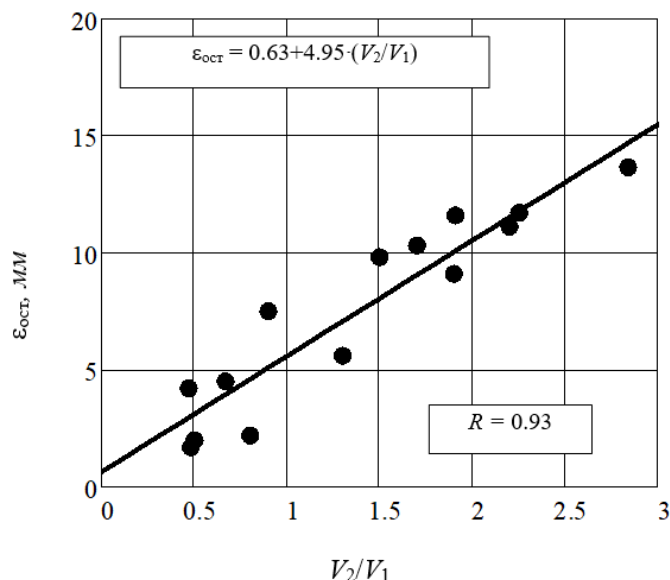


Рисунок 15 – Зависимость $\epsilon_{\text{ост}}(V_2/V_1)$ – облако рассеяния и результат линейной аппроксимации

Полученная зависимость $\epsilon_{\text{ост}}(V_2/V_1)$ может быть использована для прогнозирования максимальных деформаций в массиве пород. Также возникает возможность использовать полученную зависимость для оценки деформаций породного массива и ми-

нимизации изменений НДС через подбор оптимального давления нагнетания тампонажного раствора.

Для оценки деформаций породного массива может быть использована следующая методика. Рядом с пересечением железнодорожных путей и трассы тоннеля организуется измерительная скважина (участок находится до пересечения и позволяет наблюдать процесс влияния ТПМК на массив немного ранее самого момента подработки). В процессе проходки регистрируются инклинометрические данные, по которым оперативно вычисляется соотношение абсолютных значений скоростей деформации V_2/V_1 . Далее, с помощью, представленной выше регрессионной модели, даётся прогноз деформаций $\epsilon_{ост}$, которые могут реализоваться вблизи железнодорожного полотна через некоторое время после проходки.

Для минимизации изменений НДС может быть использована следующая методика. После прохождения ТПМК мимо измерительной скважины регистрируются инклинометрические данные, позволяющие вычислить максимальные значения скоростей V_2 и V_1 . При $V_2/V_1 > 1$ принимают решение о снижении, либо увеличении расчётных значений давления тампонажного раствора, опираясь на знак скорости V_2 . Поскольку при $V_2/V_1 < 1$ наблюдаемые деформации оказываются на уровне погрешностей метода коррекцию не производят. Рекомендации используют на участке, где геологические условия ещё не слишком изменились относительно участка, где была организована измерительная скважина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача выявления геомеханических закономерностей поведения грунтового массива при проходке с помощью ТПМК тоннелей метро под железнодорожными путями, что имеет важное значение для безаварийной эксплуатации железнодорожного полотна в условиях плотной городской застройки.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведён ряд натуральных измерений с использованием геотехнических и геодезических методов в ситуациях пересечения трассы ТПМК и железнодорожных путей. Построен ряд конечно-элементных моделей, соответствующих этим участкам, проведена их валидация по натурным данным.

2. При анализе результатов натуральных исследований выявлен эффект неравномерного оседания различных участков железнодорожного пути, возникающего при приближении к ним забоя строящегося с помощью ТПМК тоннеля, способного приводить к аварийным ситуациям. На основе результатов геодезических измерений оценена вероятность наблюдения ситуаций, способных приводить к авариям.

3. Выявлена закономерность возникновения двух временных максимумов абсолютных значений скоростей горизонтальных деформаций грунтового массива в процессе движения ТПМК, первый из которых связан с выемкой грунта при проходке, а второй обусловлен закачкой тампонажного раствора, что служит индикатором для снижения чрезмерных деформаций и минимизации изменений напряженно-деформированного состояния массива пород. Существование закономерности подтверждено геотехническими измерениями и конечно-элементным моделированием.

4. В процессе проведения геодезических измерений и конечно-элементного моделирования были выявлены закономерности, состоящие в асимметричном относительно железнодорожных путей развитии областей пластической деформации, проявляющиеся при пересечении железнодорожных путей и оси тоннеля. Выявленные с помощью конечно-элементного численного анализа закономерности позволили объяснить разницу вертикальных деформаций между точками удалёнными и приближёнными к забою.

5. Учитывая выявленные нежелательные проявления, разработаны рекомендации по геомеханическому обеспечению безаварийной эксплуатации железнодорожных путей в процессе ведения проходки с помощью ТПМК.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящие в Перечень ВАК при Минобрнауки РФ, а также статьи, индексируемые наукометрической базой Scopus:

1. Дымбренев Т. Н., Насибуллин Р. Р., Буштак Н. В., Лейзер В. И. Система автоматизированного геотехнического мониторинга при строительстве перегонных тоннелей метрополитена под эксплуатируемыми железнодорожными путями // Горный журнал. 2021. № 5. С. 53–57. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.04.

2. Насибуллин Р. Р., Набатов В. В. Анализ изменения напряжённо-деформированного состояния породного массива в процессе проходки тоннелей метро под железнодорожными путями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2 (специальный выпуск 1). С. 3–25. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_1_3.

В прочих изданиях:

2. Насибуллин Р.Р., Набатов В.В. Особенности поведения породного массива при щитовой проходке тоннелей метрополитенов по результатам анализа результатов геомеханического мониторинга // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Материалы 6 конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. 17-21 июня 2024 г. – М: ИПКОН РАН, 2024.

3. Насибуллин Р.Р. Мониторинг состояния основания железнодорожных путей и окружающего грунтового массива в процессе подземного строительства транспортных тоннелей // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы XXV международной конференция, 30 сентября - 4 октября 2024 г. ГЕОХИ, ИФЗ и ИГЕМ РАН, ГО «Борок» ИФЗ РАН. С. 189–192.