



На правах рукописи

Алексеев Александр Васильевич

**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ
ОБНАЖЕНИЙ ПРОХОДЧЕСКОГО ЗАБОЯ
В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ НАРУШЕННОСТИ МАССИВА**

Специальность 25.00.20 - *Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

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

Санкт-Петербург – 2019

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

Научный руководитель

доктор технических наук,
доцент

– ***Деменков Петр Алексеевич***

Официальные оппоненты:

Саммаль Андрей Сергеевич,

доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тулский государственный университет», кафедра «Механика материалов».

Коньков Александр Николаевич,

кандидат технических наук, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), кафедра «Тоннели и метрополитены».

Ведущая организация – открытое акционерное общество «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс» (ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 30 сентября 2019 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.06 по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан отделом делопроизводства Горного университета 26 июля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ДЕМЕНКОВ
Петр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Геологические изыскания, проведённые рядом исследователей, свидетельствуют о структурно-механической неоднородности массива по трассе подземных линейных сооружений Санкт-Петербургского метрополитена. Зафиксированная нарушенность имеет различное происхождение и является как следствием биохимического выветривания и активной жизнедеятельности природной и привнесённой микробиоты, так и причиной разуплотнения, размягчения глин при увеличивающейся влажности. Анализ возникших чрезвычайных ситуаций показывает, что зачастую причинами некорректной прогнозной оценки степени устойчивости грунтов являлся недостаток информации о инженерно-геологических условиях впереди лба забоя. Современные технологии косвенного прогнозирования горно-геологических условий впереди проходческого забоя позволяют выявлять гипотетические зоны нарушенности, что выдвигает требования к методикам их учета при прогнозе устойчивости грунтовых обнажений.

В качестве временной крепи грунтов проходческого забоя при разработке горной породы вручную применяются различные способы повышения устойчивости. Спектр конструктивных решений крепления пород призабойной зоны, используемых при строительстве С.-Петербургского метрополитена, включает анкерное крепление, опережающие проходку конструкции из труб, химическое закрепление грунтов, крепление пород забоя распорными конструкциями и др. Подбор способа осуществляется проектированием: либо по сопоставимому опыту строительства, либо – расчетом конструкций аналитическими или численными методами. Существующее разнообразие аналитических методов оценки имеет общий недостаток – упрощенный подход к учету особенностей строения слагающего породного массива и истории формирования напряженного состояния. Использование численных методов позволяет моделировать проведение тоннеля при различных граничных условиях и совместно учитывать структурно-механические особенности строения вмещающего породного массива, историю формирования напряженного состояния, гидрогеологический режим. Необходимость совместного учета выделенных автором факторов влияния предопределила выбор в качестве метода исследования конечно-элементное численное моделирование.

В связи с вышеизложенным, можно отметить актуальность разработки методики прогноза устойчивости грунтовых обнажений, пройденных в зоне влияния нарушенности с использованием численных методов и математических моделей, основанных на системе «грунтовый массив – нарушенность – тоннель».

Степень разработанности исследуемого направления: изучению инженерно-геологических условий впереди лба забоя тоннеля метрополитена С. - Петербурга косвенными геофизическими методами посвящена работа К.П. Безродного, М.О. Лебедева. В работах Б.Г. Дверницкого, Л.Г. Кабакова, Е.Г. Козина, А.А. Коробко, Е.К. Мельникова, а также в геологическом атласе С. - Петербурга отражены исследования, свидетельствующие о наличии участков разломов в кристаллическом фундаменте, которые пролонгируются в породах осадочной дочетвертичной толщи. Исследования, проведенные Р.Э. Дашко, отражают снижение физико-механических параметров, испытанных образцов глинистых пород, отобранных с участков разломов кристаллического фундамента относительно свойств образцов, отобранных вне зон разломов. Исследования М.А. Карасева показывают выраженную анизотропию деформационных и прочностных свойств.

Вопросам оценки устойчивости грунтового массива призабойного пространства, а также расчету нагрузок на конструкции крепления посвящены работы П.А. Деменкова, А.Г. Протосени, А.С. Саммаля, Ю.А. Филонова, Н.Н. Фотиевой, А.Н. Шокова, Е.В. Щекудова, W. Broere, D. Dias, S. Domínguez, L. Dormieux, J.-P. Janin, M. Kavvadas, E. Leca, P. Lunardi, G. Mollon, D. Piela, G. Prountzopoulos, C. Shi, P.A. Vermeer и др. При этом оценке устойчивости грунтов проходческого забоя в зоне нарушенных и неоднородных грунтов посвящены единичные исследования О.В. Афанасовой, G. Anagnostou, D. Dias, A. Eshraghi, M. Huang, и др. Одним из методов подбора параметров крепления грунтов проходческого забоя является метод оценки величины эквивалентного давления на лоб забоя. Такой метод используется в работах Н.А. Белякова, Р. Oreste и др., а также в рамках рассматриваемой диссертационной работы.

Для прогнозирования механизма разрушения грунтов призабойной зоны и разработки аналитических подходов проводятся физиче-

ское моделирование, основанное на методе эквивалентных материалов. Значимые результаты представлены в работах А.Н. Конькова, Ф.С. Фролова, М. Ahmed, М. Hisatake, А. Kirsch, W. Liu и др. Натурные исследования деформирования грунтов проходческого забоя и описания опыта применения креплений приведены в работах Н.И. Кулагина, А.П. Ледяева, В.А. Маслака, Р. Lunardi и др. Разработке критериев устойчивости грунтов проходческого забоя посвящены работы О.В. Трофимова, В.В. Broms & Н. Bennermark, G. Prountzopoulos, P.A. Vermeer и др.

Аналитические методы основаны, как правило, на теории предельного равновесия и рассматриваются в работах L. Dormieux, М. Horn, E. Leca, R.L. Michalowski, G. Mollon, J. Zhang и др.

На основании анализа степени разработанности можно утверждать, что совершенствование методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния грунтовых обнажений, проводимых в нарушенном неоднородном массиве является актуальной научной задачей.

Цель работы: разработка метода прогноза устойчивости грунтовых обнажений проходческого забоя тоннеля, проводимого в зоне влияния нарушенности грунтового массива.

Идея работы. Подбор способа обеспечения устойчивости грунтовых обнажений в зоне нарушенности массива должен основываться на оценке необходимой величины эквивалентного давления на грунты проходческого забоя с использованием численной модели, отражающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений.

Основные задачи исследования:

1. Выполнение анализа существующих методов оценки устойчивости грунтовых обнажений, а также горно-геологических условий ведения подземных горных работ на объектах Санкт-Петербургского метрополитена;

2. Подбор параметров модели, отражающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений на основании проведенных лабораторных испытаний и верификация модели через виртуальный эксперимент;

3. Построение численных моделей формирования напряженно-деформированного состояния массива, включающего элемент неоднородности – нарушенность, при различных вариантах пересечения проходкой тоннеля;

4. Выявление зависимости деформирования глин в призабойной зоне от заданного режима деформирования нарушенности под нагрузкой – дренированном и недренированном;

5. Разработка рекомендаций по оценке устойчивости грунтов проходческого забоя, находящегося в зоне влияния нарушенных грунтов численными методами и подбору параметров временного крепления, учитывающего нарушенность массива.

Объектом исследования в диссертационной работе является грунтовый массив, содержащий структурно-механическую неоднородность – нарушенность. **Предметом** исследования является устойчивость грунтов проходческих забоев подземных сооружений и находящихся в зоне влияния нарушенного массива.

Методология и методы исследования. При выполнении исследования использовался комплексный подход, включающий в себя: анализ работ отечественных и зарубежных авторов в вопросах прогноза устойчивости; анализ литературных источников и исследований слагающего массива для строительства подземных сооружений в условиях г. Санкт-Петербурга: результатов лабораторных экспериментов и материалов геологической разведки специализированных организаций; численное конечно-элементное моделирование процессов потери устойчивости, позволяющее в явном виде учесть нарушенность массива призабойной зоны, анизотропию свойств, а также режим деформирования нарушенности под нагрузкой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Прогноз устойчивости грунтовых обнажений проходческого забоя тоннеля, проводимого в зоне влияния нарушенности массива, необходимо выполнять на основании численного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния массива с использованием численной модели, отражающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений и предварительной верификацией принятой модели механического поведения.

2. Наибольший коэффициент запаса устойчивости грунтовых обнажений проходческого забоя тоннеля, проводимого в зоне влияния нарушенности, достигается при величине эквивалентного давления $(0,3...0,6) \cdot \gamma H$ и зависит от: пространственной ориентации зоны нарушенности, рассматриваемого режима деформирования материала под нагрузкой.

3. Подбор параметров крепления грунтов проходческого забоя в зоне влияния нарушенности нужно производить на основании разработанного метода оценки необходимого эквивалентного давления на грунтовое обнажение проходческого забоя с использованием пространственной модели «грунтовый массив – нарушенность – проводимый тоннель» и учитывающей режим деформирования материала под нагрузкой.

Научная новизна проведенного диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Установлена зависимость деформирования грунтов проходческого забоя при вхождении в зону влияния нарушенности, заключающейся в увеличении величины деформаций относительно ненарушенного массива;

2. Получены зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости от величины эквивалентного давления на грунтовое обнажение при различных вариантах пространственной ориентации нарушения и режимах деформирования: установлен факт наличия максимума функции коэффициента запаса устойчивости от эквивалентного давления;

3. Выявлена степень влияния ориентации зоны нарушенных грунтов на коэффициент запаса устойчивости – при прочих равных граничных условиях вариация коэффициента запаса устойчивости может быть значительной.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (пп. 1, 2, 4, 5, 11, 13).

Практическая значимость исследования:

1. Разработана методика оценки устойчивости грунтов проходческого забоя в зоне влияния нарушенных грунтов, позволяющая рассматривать зону нарушенных грунтов как сухой и влагонасыщенный расчетный элемент.

2. Разработаны рекомендации по определению эквивалентного давления на грунтовое обнажение проходческого забоя, основанные на коэффициенте запаса устойчивости.

Достоверность и обоснованность научных выводов, положений и рекомендаций подтверждается удовлетворительной схожимостью полученных в лабораторных испытаниях кривых деформирования образцов с результатами виртуальных экспериментов принятой модели, учитывающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений; современными методами механики сплошных сред, а также методов математического анализа для выполнения геомеханических расчетов прогноза устойчивости.

Личный вклад автора исследовательской работы заключается в постановке целей и задач исследования, определении геомеханических параметров модели грунта, отражающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений, построении моделей и проведении численных экспериментов методом конечных элементов, выполнении обработки и анализе результатов моделирования. Автором выявлена степень влияния совокупности факторов на коэффициент запаса устойчивости, на основании учета которых разработана методика численного моделирования устойчивости породных обнажений, проводимых в нарушенном массиве; получены закономерности изменения коэффициента запаса устойчивости грунтов проходческого забоя для различных сочетаний факторов влияния; разработаны рекомендации по подбору способа крепления грунтов лба забоя в зависимости от коэффициента запаса устойчивости.

Апробация выполненного исследования. Основные положения и результаты исследований были представлены на научных конференциях в 2015-2019 гг.: международной научно-практической конференции «Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов» (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 2017 г.), симпозиум молодых ученых 68th Berg- und Hüttenmännischer TAG «12 Freiberg – St. Petersburg Colloquium of young scientists» (Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Гер-

мания, 2017 г.), XXVII Международный научный симпозиум «Неделя горняка - 2019» (Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, 2019 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России - 3 статьи, в том числе 2 – в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа изложена на 155 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 142 источников, содержит 87 рисунков, 6 таблиц, 3 приложения на 18 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность, основная цель и идея, научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** проведён анализ грунтового массива С.-Петербурга, являющегося средой для строительства подземных сооружений (кембрийские и протерозойские глины); проведена оценка горно-геологических условий строительства подземных сооружений С.-Петербурга; выделены факторы, являющиеся причинами неоднородности и локальной нарушенности грунтового массива; проведен анализ нормативного обеспечения вопроса оценки устойчивости грунтового массива и способов его поддержания.

Во **второй главе** выполнен анализ применяемых методов оценки устойчивости породных обнажений подземных сооружений; обоснован выбор конечно-элементного метода численного моделирования и моделей механического поведения материала, на основании которых разработана собственная методика оценки устойчивости грунтов проходческого забоя с применением средств численного моделирования.

В **третьей главе** на основании сопоставления виртуального эксперимента и лабораторных исследований проведен подбор параметров модели, отражающей зависимость деформационных характеристик массива от достигнутого уровня напряжений и проведена верификация принятой модели механического поведения; на основании данных о деформировании образцов протерозойской глины вдоль и

поперек слоистости подобраны параметры ортотропной упругой модели, на основании которой проводится оценка влияния анизотропии деформационных свойств; формулируются положения методики численного прогноза устойчивости грунтового массива в зоне влияния нарушенности.

Четвертая глава посвящена изучению влияния величины эквивалентного давления на коэффициент запаса устойчивости грунтов проходческого забоя и разработке методики подбора способа обеспечения устойчивости с учетом выделенных ранее факторов.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Защищаемые научные положения:

1. Прогноз устойчивости грунтовых обнажений проходческого забоя тоннеля, проводимого в зоне влияния нарушенности массива, необходимо выполнять на основании численного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния массива с использованием численной модели, отражающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений и предварительной верификацией принятой модели механического поведения.

В процессе диссертационного исследования были рассмотрены последствия пересечения тоннелем участка массива, обладающего пониженными физико-механическими свойствами. Рассматривались горно-геологические условия, характерные для зон нарушенности грунтов. Построение численной модели массива, содержащего элемент неоднородности – нарушение, производилось в следующей последовательности: выделялись гипотетические пространственные ориентации элемента нарушения и возможные кинематические и гидрогеологические граничные условия элемента ослабления; на основании проведенных данных лабораторных испытаний нарушенного и ненарушенного массива производилось построение геологической модели; в построенной модели, методом снижения жесткости моделировалось проведение тоннеля: зона влияния нарушенности выделялась на основании превышения деформаций относительно средних.

Подбор параметров модели, отражающей зависимость деформационных характеристик массива от достигнутого уровня напряжений, проводился на основании результатов лабораторных испытаний

протерозойской глины, отраженных в докторской диссертации М.А. Карасева. Образцы для испытаний были отобраны из забоя станции «Бухарестская», а также забоя станции «Проспект Славы»: результаты испытаний показали взаимосвязь между величиной модуля начальных деформаций и величиной минимальных эффективных напряжений (рис. 1, б).

В связи с этим, в работе предложено выразить модуль начальных деформаций E_0 через секущий модуль общих деформаций E_{50} и, совместно выражая начальный и секущий модуль E_{50} , подбирать эффективные параметры прочности, параметры нелинейности m и коэффициент разрушения R_f :

$$E_0 = \frac{2E_{50} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma_3 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{ref} \sin \varphi'} \right)^m}{2 - R_f} \quad (1)$$

где c' – эффективное сцепление, МПа; φ' – эффективный угол внутреннего трения, град; p^{ref} – величина опорного давления, МПа.

Принятая моделью материала соотношение (1), отражающее зависимость деформационных характеристик массива от достигнутого уровня напряжений, позволило выразить начальный модуль деформаций через секущий (рис. 1, а), описать линейной зависимостью изменение секущего модуля общих деформаций E_{50} от бокового напряжения σ_3 (рис. 1, в) и адаптировать принятую модель к проведенным лабораторным испытаниям образцов (рис. 1: б, г).

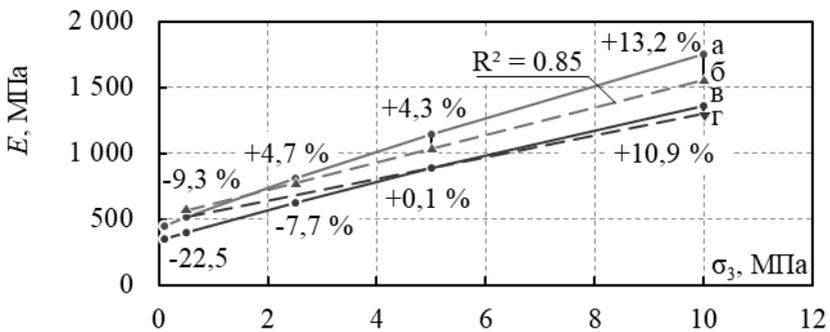


Рисунок 1 – Результат подбора параметров модели, отражающей изменение деформационных характеристик при изменении уровня напряжений

Конечный результат подбора параметров – кривая деформирования, определенная по результатам серии виртуальных экспериментов на всестороннее сжатие при различной величине бокового давления имеет удовлетворительную сходимость с кривыми деформирования, полученными по результатам экспериментов, проведенных в лабораторных условиях.

Для проведения виртуальных экспериментов лабораторных испытаний была выбрана программа PLAXIS SoilTest. Сходимость кривых позволяет говорить о корректном описании подобранными параметрами модели грунтового массива в определенном диапазоне бокового давления. Данный способ удобен тем, что при заданных прочностных и деформационных характеристиках имеется возможность при помощи двух управляемых параметров подобрать аутентичные кривые зависимости реальных лабораторных испытаний и виртуальных, проведенных в программном комплексе PLAXIS.

Выраженные по формуле (1) соответствующие модули деформаций E_{50} и E_0 , полученные при различных величинах бокового давления, отличаются от соответствующих линейных аппроксимирующих зависимостей, полученных в лабораторных испытаниях, на величины, отраженные на рис. 1, где: (а) – кривая, описывающая выраженный по формуле (1) E_0 ; (б) – линейная аппроксимирующая функции E_0 (σ_3), полученная в лабораторных испытаниях; (в) – кривая, описывающая зависимость E_{50} (σ_3) при подобранных параметрах; (г) – линейная аппроксимирующая функции E_{50} (σ_3), полученная в лабораторных испытаниях. При этом, погрешности принимают максимальные значения в граничных уровнях бокового напряжения. В свою очередь, задачи, связанные с уменьшением бокового давления (например, проходка тоннеля), могут понизить значение текущего модуля деформации на 22,5 %, а значит, завязать величину деформаций, что является существенным, однако пойдет «в запас». Поэтому, увеличение уровня бокового давления в рамках имеющихся данных будет способствовать уменьшению величины погрешности между численным решением и лабораторными испытаниями и рационально использование метода подбора параметров крепления, основанного на определении эквивалентного давления на поверхность проходческого забоя.

На рисунке 2 представлены результаты подбора управляемых параметров: коэффициента разрушения и показателя нелинейности для получения формы кривых зависимости девиаторных напряжений

от относительных деформаций, соответствующей форме кривых, полученных при лабораторных испытаниях протерозойской глины при изменяемом боковом давлении.

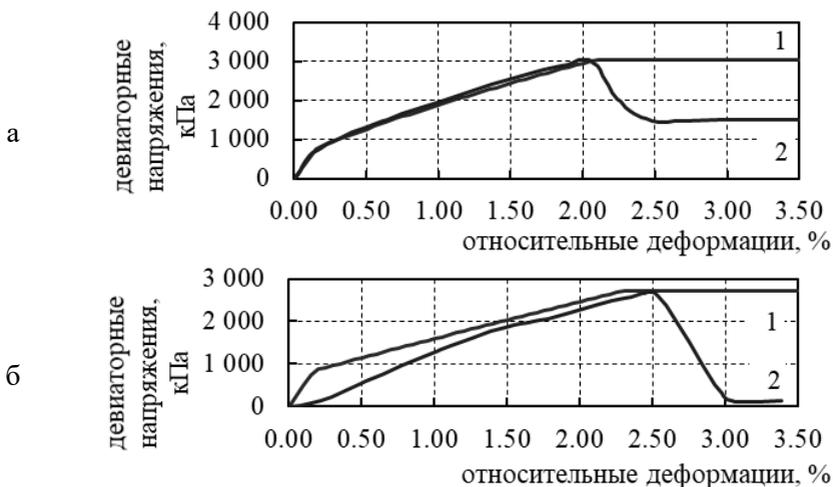


Рисунок 2 – Совмещенный график зависимости напряжений от деформаций, полученный по результатам виртуального эксперимента (1), с графиком, полученным по результатам лабораторного эксперимента (2) при боковом давлении:

а – 100 кПа, б – 250 кПа

2. Наибольший коэффициент запаса устойчивости грунтовых обнажений проходческого забоя тоннеля, проводимого в зоне влияния нарушенности, достигается при величине эквивалентного давления $(0,3...0,6) \cdot \gamma H$ и зависит от: пространственной ориентации зоны нарушенности, рассматриваемого режима деформирования материала под нагрузкой.

В целях оценки влияния зоны нарушенных грунтов было проведено численное моделирование геомеханических процессов, проходящих в тоннелях, имеющих незакрепленный лоб забоя. Оценка проводилась при вариации деформационных и прочностных параметров модели массива. Зона влияния нарушенности формируется по мере проведения тоннеля.

При дренированном режиме деформирования материала под нагрузкой и задании уровня грунтовых вод входение тоннеля в зону влияния нарушенности может провоцировать деформации грунтового обнажения, превышающие фоновые в 9 раз (рис. 3 – 1). В случае недренированного режима поведения материала под нагрузкой входение тоннеля в зону влияния нарушенности может провоцировать деформации грунтового обнажения, превышающие фоновые на 60 % (рис. 3 – 2).

Оценку устойчивости при малой водопроницаемости материала и при прогнозировании кратковременной реакции грунта рекомендуется производить при недренированном режиме деформирования.

Дренированный режим деформирования рекомендуется для оценки длительной реакции, сухих грунтов, а также для грунтов с высокой водопроницаемостью.

При рассмотрении нарушенного массива как анизотропной среды выявлено, что деформирование поверхности забоя окажется меньше изотропной, а значит может пойти «в запас».

Коэффициент запаса устойчивости в рамках данной работы определяется как:

$$SF = \frac{\text{прочность, введенная в модель}}{\text{прочность при разрушении}} \quad (2)$$

где SF – коэффициент запаса устойчивости, определяемый исходя из итерационных процедур численными методами.

С заданным шагом снижая значение прочностных параметров, в модель вводятся неуровновешенные силы. Дисбаланс сил приводит к деформациям. Стабилизация значения коэффициента запаса устойчивости обеспечивается тогда, когда последующее изменение прочностных параметров на величину их приращения приводит контрольную точку к пластическому течению. Таким образом, картина приращения деформаций качественно прогнозирует вероятную

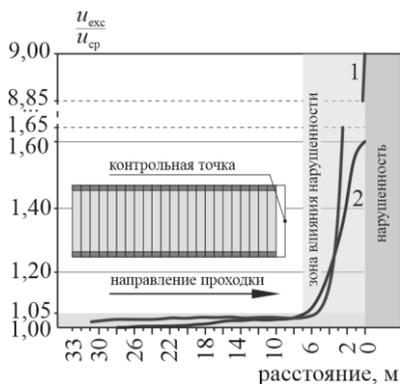


Рисунок 3 – К оценке зоны влияния нарушенности:

- 1 – дренированный режим деформирования нарушенности;
- 2 – недренированный режим деформирования

форму потери устойчивости при превышении критерия прочности Кулона-Мора.

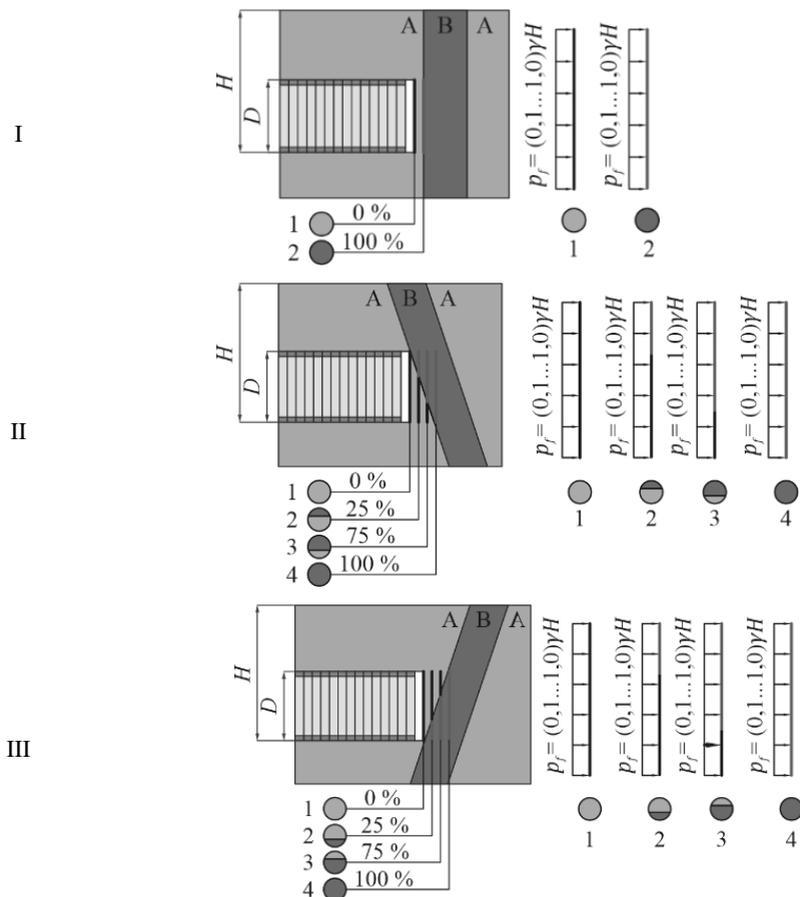


Рисунок 4 – Принципиальная расчетная схема:

H – глубина заложения тоннеля; D – диаметр тоннеля; А – ненарушенные грунты; В – нарушенные грунты; p_f – эквивалентное давление; (1 – 4) – этапы проведения тоннеля в зоне влияния нарушения; (I – III) – пространственная ориентация зоны нарушения

При решении задачи о влиянии величины эквивалентного давления было проведено многовариативное моделирование, заключающееся в варьировании величины одного из параметров и фиксации остальных параметров модели.

Таким образом, на основании исследования более 40 численных моделей, выявлены следующие закономерности: значительное влияние на величину коэффициента запаса устойчивости оказывала глубина заложения тоннеля. Чем меньше глубина заложения тоннеля, тем значимее отражается на коэффициенте запаса устойчивости увеличение величины эквивалентного давления на грунты проходческого забоя. Также, угол падения нарушенности влияет на коэффициент запаса устойчивости: наименее благоприятна оказывается разработка тоннеля в направлении, образующем угол менее 90 градусов с линией падения нарушенности (рис. 4, II).

Случаям, соответствующим максимальной величине коэффициента запаса устойчивости, соответствует значение эквивалентного давления, находящегося в диапазоне от (0,3...0,6) γH .

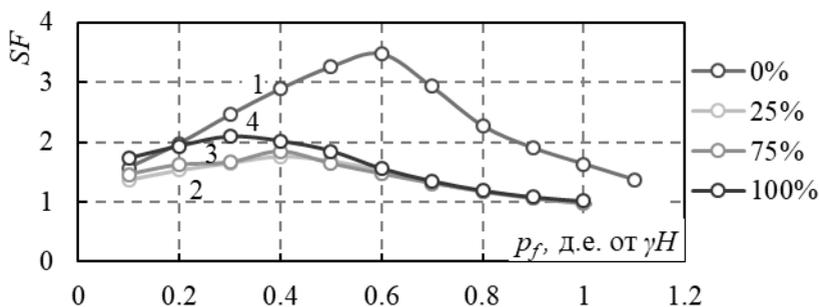


Рисунок 5 – При учете зоны нарушенности как влагонасыщенного элемента и соотношении нарушенных грунтов в сечении лба забоя: 1 – 0%; 2 – 25%; 3 – 75%; 4 – 100%.

Распределение коэффициента запаса устойчивости по зависимости, представленной на рис. 5, объясняется следующими причинами: запас устойчивости ненарушенных грунтов закономерно больше вне зоны нарушенности (по причине превышающих параметров прочности). По мере увеличения величины эквивалентного давления на грунтовое обнажение проходческого забоя происходит увеличение коэффициента запаса устойчивости, а вместе с этим, уменьшение величины деформирования поверхности проходческого забоя. При этом для каждого процентного соотношения нарушенных грунтов в сечении тоннеля (рис. 5: от 1 до 4) существует максимальное значение коэффициента запаса устойчивости. Дальнейшее увеличение эквивалентного давления провоцирует снижение коэффициента запаса

устойчивости, которое сопровождается вовлечением большего количества узлов к знакопеременному деформированию: т.е. происходит процесс «вдавливания» грунтов проходческого забоя в массив. Такое явление согласуется с положениями методик анализа предельного равновесия.

3. Подбор параметров крепления грунтов проходческого забоя в зоне влияния нарушенности нужно производить на основании разработанного метода оценки необходимого эквивалентного давления на грунтовое обнажение проходческого забоя с использованием пространственной модели «грунтовый массив – нарушенность – проводимый тоннель» и учитывающей режим деформирования материала под нагрузкой.

Основными факторами изменения коэффициента запаса устойчивости грунтов проходческого забоя в зоне нарушенных грунтов, при оценке устойчивости численными методами, являются: пространственная ориентация нарушенных грунтов; величина зоны влияния нарушения; степень обводнённости и время консолидации; мощность нарушенных грунтов; глубина заложения тоннеля; параметры прочности и деформируемости. Оценка устойчивости при таком режиме деформирования рекомендуется для целей прогнозирования долгосрочной реакции грунта. Разработанная методика оценки устойчивости грунтов проходческого забоя позволяет вычислять коэффициент запаса устойчивости с учетом одновременного воздействия совокупности влияющих факторов.

При вычислении коэффициента запаса устойчивости разработанная методика численного моделирования позволяет определять точки интегрирования, в которых наблюдается превышение предела принятого критерия прочности и предела прочности на растяжение. Такие точки могут являться полезными для инженера в вопросе рационального подбора временного крепления грунтов проходческого забоя (рис. 6).

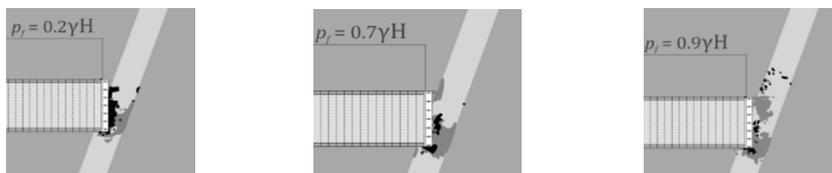


Рисунок 6 – Визуализация точек, в которых превышен критерий прочности Кулона-Мора и предел прочности на растяжение

Детализированная геомеханическая модель проведения тоннеля через зону нарушенных грунтов позволяет определять необходимую величину эквивалентного давления на лоб проходческого забоя для целей дальнейшего проектирования либо упрочняющих, либо ограждающих креплений грунтов проходческого забоя.

Прогноз устойчивости грунтовых обнажений по разработанной методике позволяет подробно рассматривать процесс деформирования и формирования предельного состояния для грунтовых обнажений проходческого забоя, проводимого в сложных горно-геологических условиях с повышенными требованиями к безопасности (рис. 7).

Проектирование упрочняющих креплений рекомендуется производить на основании анализа изменения коэффициента запаса устойчивости по мере проведения тоннеля, ориентируясь на значение эквивалентного давления, соответствующего наибольшему коэффициенту запаса устойчивости, а расчет параметров крепления – в соответствии с формулой (3), предложенной Н.А. Беляковым:

$$N = \frac{p_f S}{[\sigma]} \cdot k \quad (3)$$

где N – количество анкеров в опережающей крепи, шт.; p_f – эквивалентное давление на грунты проходческого забоя, МПа; $[\sigma]$ – несущая способность одного анкера, МПа; S – площадь сечения грунтового обнажения поверхности забоя, м²; $k = 1,2$ – коэффициент запаса.

Проектирование ограждающих креплений рекомендуется производить при значительных величинах коэффициента запаса устойчивости независимо от эквивалентного давления, а упрочняющих креплений – при величинах коэффициента запаса близких к единице.

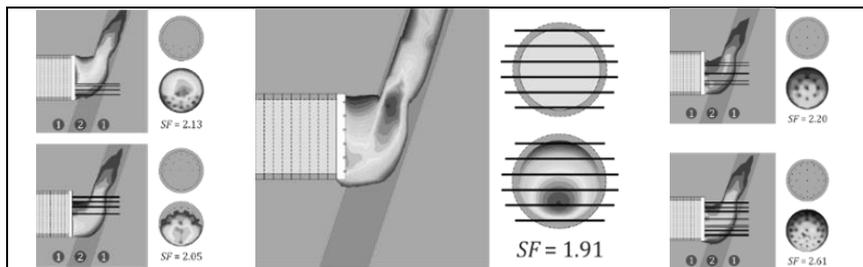


Рисунок 7 – Пример оценки коэффициента запаса устойчивости при различных вариантах крепления грунтового обнажения в зоне нарушенности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований представляют собой законченную научно-квалификационную работу, в которой дано решение актуальной задачи - разработке методики оценки устойчивости грунтов проходческих забоев, пройденных в зоне нарушенных грунтов.

Основные научные и практические результаты:

Выполненные в диссертационной работе исследования посвящены разработке методики определения величины эквивалентного давления на лоб проходческого забоя и выбора типа временного крепления грунтов подземного сооружения, пройденного в зоне влияния нарушенности. Разработанная методика позволяет учесть влияние фактора обводнения зоны нарушенности, понижения деформационных и прочностных свойств нарушенного массива, пространственной ориентации нарушенности массива.

Основные результаты выполненных исследований:

1. Рассмотрено состояние вопроса оценки устойчивости грунтов проходческого забоя в зоне нарушенных грунтов. Установлено, что на современном этапе отсутствуют обоснованная методика, позволяющая прогнозировать устойчивость и деформирование грунтов проходческого забоя, проводимого через зону нарушенных грунтов. Выполнен анализ геомеханических процессов в массиве нарушенных грунтов. Получены закономерности деформирования контрольной точки проходческого забоя в зависимости от параметров зоны нарушенных грунтов. Произведена оценка зоны влияния структурно-механической неоднородности - нарушенности на устойчивость грунтов лба проходческого забоя.

2. Проанализированы методы прогноза устойчивости грунтов проходческого забоя и предложена методика, базирующаяся на численном моделировании с применением верификации модели по данным о деформировании, полученным в лабораторных испытаниях. При использовании модели поведения материала, отражающей изменение деформационных характеристик массива при изменении уровня напряжений, наблюдается удовлетворительная сходимость результатов виртуального эксперимента с натурными данными.

3. Установлено, что определяющими факторами деформируемости и устойчивости грунтов проходческого забоя в зоне влияния нарушенности являются: анизотропия свойств материала; принятый режим деформирования материала под нагрузкой; время консолида-

ции; пространственная ориентация зоны нарушенности; эффективные параметры прочности и величина эквивалентного давления на грунты проходческого забоя.

4. Численная геомеханическая модель нарушенного грунтового массива, представленного сплошной средой, содержащей элементы, описывающие механическое поведение нарушенных грунтов, позволяет моделировать проведение подземного сооружения в анизотропном массиве через зону нарушенных перемятых глин и получать изополя пластических деформаций, а значит – прогнозировать зону возможного обрушения.

5. Разработана методика оценки устойчивости грунтов проходческого забоя в зоне влияния нарушенных грунтов, позволяющая рассматривать зону нарушенных грунтов как сухой, обводненный и водопроводящий расчетный элемент.

6. Разработаны рекомендации по определению эквивалентного давления на лоб проходческого забоя, основанные на коэффициенте запаса устойчивости, времени консолидации и позволяющие дифференцировать способы крепления грунтов проходческого забоя на ограждающие, упрочняющие и специальные.

7. По результатам численных экспериментов возможно выявление закономерностей деформирования поверхности проходческого забоя по мере его приближения к зоне нарушенных грунтов.

8. По результатам численных экспериментов выявлена степень влияния ориентации зоны нарушенных грунтов на коэффициент запаса устойчивости – при прочих равных граничных условиях вариация может быть значительна, а учет ее имеет практическое важное значение для обеспечения безопасных условий эксплуатации подземных сооружений.

По теме диссертационного исследования опубликовано 7 работ, в том числе 3 работы в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в том числе 2 – в издании, индексируемом в международной базе Scopus:

1. **Алексеев, А.В.** Деформации лба забоя при проходке тоннеля в зоне структурно-механической неоднородности /А.В. Алексеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 48–56.

2. **Алексеев, А.В.** Численное моделирование устойчивости лба забоя в зоне неоднородности при недренированной модели массива / А.В. Алексеев, П.Э. Вербило // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 53 (1). – С. 80–87.

3. **Алексеев, А.В.** Адаптация модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга / А.В. Алексеев, Г.А. Иовлев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 75–87.

4. **Алексеев, А.В.** Влияние неоднородности массива на устойчивость проходческого забоя при строительстве метрополитена / А.В. Алексеев, Г.А. Иовлев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 8 (62). – С. 6–14.

5. **Алексеев, А.В.** Применение защитных экранов в подземном строительстве / А.В. Алексеев, Д.Т. Головин // Academy. – 2016. – С. 2–6.

6. **Alekseev, A.** The influence of tectonic dislocations on stability of tunnel face during the construction Saint-Petersburg underground / A. Alekseev // Scientific reports on resource issues 2017: Proc. of Freiberg – St. Petersburg Colloquium of young scientists. – 2017. – P. 38–44.

7. **Алексеев, А.В.** Влияние нарушенности массива призабойной зоны на устойчивость проходческого забоя выработки метрополитена, сооружаемой методом сплошного забоя / А.В. Алексеев // Современные проблемы геомеханики при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства мегаполисов: Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию кафедры «Строительство горных предприятий и подземных сооружений». – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. – С. 28-29.