

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «Ленметрогипротранс»

— В.А. Маслак

2024 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» на
диссертационную работу

ФЕКЛИНА Артёма Александровича

«Разработка метода расчета обделок параллельных тоннелей, сооружаемых
вблизи наклонной земной поверхности в технологически неоднородных
породах», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных
пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Актуальность темы. Сооружение закрытым способом комплексов компактно расположенных подземных объектов различного назначения в малосвязных неустойчивых, трещиноватых или обводненных породах требует применения специальных способов строительства. Особенно это важно при проходке тоннелей вблизи земной поверхности на территориях, отличающихся сложным рельефом.

Специальные способы уменьшают степень негативного влияния подземного строительства на близко расположенные наземные и подземные объекты и коммуникации, способствуют сохранению целостности окружающего массива пород, повышают его однородность и изотропность, ограничивают водопиток в выработки и т.д.

Результаты натурных исследований и лабораторных испытаний свидетельствуют о том, что возникновение вокруг выработок локальных зон

технологически неоднородных пород с отличающимися физико-механическими свойствами, в том числе - деформационными характеристиками, может оказывать влияние на формирование напряженно-деформированного состояния подземных конструкций, влияя на прочность и несущую способность подземных объектов в целом.

Учитывая изложенное выше, автором диссертационной работы ставится задача разработки аналитического метода расчета обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности, применение которого позволит установить новые закономерности формирования напряженного состояния обделок тоннелей и окружающего массива пород, а также уточнить известные.

Теоретической основой диссертационной работы Феклина А.А. является математическое моделирование процессов взаимодействия подземных сооружений и окружающего их породного массива при наличии вокруг выработок зон пород с отличающимися деформационными характеристиками, включающее выполнение постановки и получение нового аналитического решения новой достаточно сложной задачи геомеханики о напряженном состоянии элементов единой деформируемой системы "массив пород с наклонной земной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделка параллельных тоннелей".

Разработанная Феклиным А.А. математическая модель позволяет комплексно учитывать влияние на напряжённое состояние обделок тоннелей кругового поперечного сечения и массива пород таких факторов, как расположение комплекса тоннелей вблизи наклонной земной поверхности; произвольное достаточно близкое расположение параллельных тоннелей; размеры поперечных сечений выработок и зон технологически неоднородных пород вокруг них, а также поперечных сечений обделок; физико-механические и деформационные характеристики массива пород в естественном и в измененном состояниях, деформационные характеристики материалов обделок; поле начальных напряже-

ний в массиве пород, обусловленных гравитационными силами; последовательность проходки тоннелей по отношению к возникновению зон технологически неоднородных пород (предварительное или последующее укрепление пород) и отставание возведения обделок от забоя выработки; реологические свойства массива пород.

Учитывая, что до настоящего времени строгих решений подобных задач геомеханики, равно как и соответствующих методов расчета не имелось, диссертация Феклина А.А., посвященная развитию теории и методов определения напряженного состояния подземных конструкций, а именно - разработке аналитического метода расчета обделок тоннелей мелкого заложения, сооруженных в технологически неоднородных породах, является актуальной и имеющая научное и практическое значение.

Содержание диссертации. Структура диссертации состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 198 страниц текста, включая 35 рисунков и 18 таблиц.

Во **введении** автором обосновывается актуальность поставленной задачи; изложены цель и идея работы; приводится перечень использованных методов исследований. Автором формулируются основные научные положения, выносимые на защиту; раскрывается новизна полученных научных и практических результатов.

В **первом разделе** приведен подробный анализ научных публикаций, посвященных изучению влияния специальных способов строительства на вмещающий выработки породный массив, включая форму, размеры и степень изменения деформационных характеристик зон технологически неоднородных пород. Приводятся результаты исследований, позволяющих утверждать, что поперечные сечения зон технологически измененных пород вокруг выработок круглого сечения могут быть представлены концентрическими кольцами; даются оценки толщины этих зон при буровзрывных работах, после выполнения мероприятий по инъекционному укреплению на основе различных вяжущих;

приводятся данные о диапазонах изменения деформационных характеристик пород после технологических воздействий.

Автором на основе выполненного обзора научных публикаций, посвященных разработке методов определения напряженного состояния обделок тоннелей или горных выработок, сооружаемых в технологически неоднородных породах, содержащих результаты расчетов подобных объектов, отмечается, что хотя и накоплен определенный опыт разработки и применения аналитических методов расчета конструкций подземных сооружений как глубокого, так и мелкого заложения, в том числе - с учетом влияния зон укрепленных или ослабленных пород, тем не менее, строгого аналитического метода определения напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, пройденных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности, до настоящего времени не имелось.

Второй раздел посвящен разработке математической модели формирования напряженного состояния обделок комплекса параллельных тоннелей, сооруженных закрытым способом вблизи склона, при наличии вокруг выработок концентрических зон пород с отличающимися деформационными характеристиками, позволяющей выполнить учет влияния основных факторов.

В основу модели положено теоретическое представление о совместной работе элементов геомеханической системы "массив пород с наклонной земной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделки параллельных тоннелей". Выбранная расчетная схема, постановка и решение плоской задачи теории упругости о равновесии весомой линейно деформируемой полубесконечной среды с наклонной границей, ослабленной конечным числом подкрепленных круговых отверстий, вокруг которых выделены концентрические области из материалов с отличающимися деформационными характеристиками, при соответствующих граничных условиях служат основой для разработки соответствующего аналитического метода расчета.

Следует отметить, что использование современных представлений геомеханики и механики подземных сооружений о совместной работе массива пород

в естественном и измененном состояниях и обделок тоннелей как элементов единой деформируемой системы позволяют в более полной мере учитывать собственную несущую способность пород, оказывающую влияние на напряженное состояние обделок тоннелей.

В третьем разделе работы приведено достаточно подробное решение поставленной задачи теории упругости, полученное после перехода к соответствующей краевой задаче теории аналитических функций комплексного переменного (ТФКП) с применением метода комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили – аналитического продолжения комплексных потенциалов через границу полуплоскости, свойств интегралов типа Коши, комплексных рядов Лорана. Особенностью представленного решения является применение автором хорошо сходящегося итерационного процесса, на каждом шаге которого находится решение задачи о полной плоскости, ослабленной одним подкрепленным отверстием, вокруг которого выделена область материала с отличающимися деформационными характеристиками, с граничными условиями, содержащими уточняемые в каждом приближении члены, обусловленные наличием наклонной границы полуплоскости и соседних подкрепленных отверстий.

В четвертом разделе приведен полный алгоритм расчета обделок комплекса тоннелей, реализованный в виде компьютерной программы, предназначенной для оценки напряженного состояния подземных конструкций при практическом проектировании, а также в научных целях.

Диссертантом произведена оценка точности удовлетворения граничных условий решаемой задачи при различных сочетаниях основных параметров, влияющих на сходимость итерационного процесса. Высокая точность удовлетворения граничных условий, не превышающая 3%, и практически полное совпадение результатов, получаемых в частных случаях, с соответствующими аналитическими решениями других авторов свидетельствуют о корректности разработанного в диссертации метода расчета.

Автором приводятся примеры, демонстрирующие возможности разработанной программы производить расчеты обделок параллельных тоннелей раз-

личной компоновки с учетом влияния основных факторов, предусмотренных разработанной математической моделью. В разделе автором выполнен анализ процесса формирования напряженного состояния массива пород и обделок реальных автодорожных тоннелей, сооруженных последовательно в горных условиях. Дополнительно приведен пример определения напряженного состояния обделок при варианте компоновки тоннелей, отличающемся от проектного. Результаты расчетов представлены в виде таблиц и эпюр напряжений, возникающих на контурах поперечных сечений обделок тоннелей на основных этапах строительства.

В пятом разделе представлены установленные автором на основе компьютерного моделирования на примере двух параллельных тоннелей зависимости формирования напряженного состояния обделок при изменении основных влияющих факторов. Результаты выполненных многовариантных расчетов позволили уточнить известные закономерности для максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, возникающих в обделках, и установить новые зависимости, представляющие научную новизну:

- увеличение модуля деформации массива пород приводит к уменьшению значений максимальных напряжений по абсолютной величине. Наиболее интенсивное уменьшение экстремальных напряжений в обделках, вызванное наличием зон технологически неоднородных пород и увеличением их размеров, наблюдается в слабых породах;

- увеличение толщины обделок тоннелей приводит к снижению значений максимальных сжимающих и растягивающих напряжений, вплоть до полного исчезновения последних; наиболее существенное влияние толщин обделок на их напряжённое состояние проявляется в породах слабых и породах средней прочности;

- установлено, что в обделках из бетона с более высокими деформационными характеристиками наблюдается увеличение расчетных значений экстремальных напряжений; подтверждено, что применение обделок из бетона высоких классов наиболее эффективно в слабых породах;

- для тоннелей, центры которых расположены на горизонтальной прямой вблизи склона, выявлен различный характер изменения максимальных напряжений при увеличении расстояния между границами зон технологически неоднородных пород. В тоннеле, расположенном на большей глубине, с ростом расстояния экстремальные напряжения увеличиваются. В обделке тоннеля, расположенного ближе к склону, с увеличением угла наклона земной поверхности максимальные растягивающие напряжения увеличиваются, а изменение максимальных сжимающих напряжений от угла наклона земной поверхности не имеет монотонного характера и т.д.

Судя по содержанию и изложению материала в тексте диссертации и ее автореферате, автором достигнута цель исследования – разработан аналитический метода расчета обделок параллельных тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности, позволяющий получить новые знания о формировании напряженного состояния элементов геомеханической системы «массив пород - технологически неоднородные породы - обделки параллельных тоннелей».

Соответствие специальности 2.8.6. На основе математического моделирования взаимодействия массива пород в естественном состоянии, зон технологически неоднородных пород и обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения как элементов единой деформируемой системы разработан новый аналитический метод расчета, позволяющий выявлять закономерности формирования напряженного состояния элементов геомеханической системы при действии гравитационных сил в массиве. Получаемые с использованием разработанного метода результаты имеют существенное значение при геомеханическом обосновании принимаемых инженерных решений, направленных на предотвращение опасных горно-геологических явлений при строительстве новых или реконструкции имеющихся тоннельных комплексов.

Тема диссертации соответствует формуле специальности и пунктам 1, 3, 4 и 5 области исследования, регламентированной паспортом специальности 2.8.6.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректной постановкой задачи исследования; использованием фундаментальных теоретических положений геомеханики, механики сплошной среды и механики подземных сооружений; применением адекватной математической модели, включающей постановку и решение соответствующей задачи теории упругости; использованием апробированного математического аппарата ТФКП; достижением высокой точности выполнения граничных условий задачи теории упругости; практически полным совпадением результатов с данными аналитических решений частных задач и удовлетворительным качественным и количественным согласованием результатов с известными решениями аналогичных задач численными методами, полученными другими авторами.

Личный вклад автора заключается в разработке математической модели взаимодействия обделок параллельных тоннелей, сооруженных закрытым способом вблизи наклонной земной поверхности в технологически неоднородном массиве пород; в постановке и решении соответствующей задачи теории упругости; в составлении алгоритма и программного обеспечения метода расчета; в установлении на основе результатов компьютерного моделирования новых закономерностей формирования напряженного состояния обделок тоннелей и окружающего их массива пород.

Ценность для науки и практики заключается в разработке алгоритма определения напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности, при действии гравитационных сил, а также в создании программного обеспечения, позволяющего производить многовариантные расчеты конструкций подземных сооружений.

Апробация и публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 3 – в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Результаты исследований были доложены и обсуждены на целом ряде научных конференций различного уровня, включая международные и национальные.

Замечания по диссертации:

1. Следовало бы уменьшить объемы первого и второго разделов в части, касающейся обзора состояния вопроса по теме исследования.

2. В математической модели принято равенство величин удельного веса пород и коэффициентов бокового давления в естественном и технологически измененном состояниях, а также пренебрегается собственным весом обделок, что не соответствует действительности.

3. Перечень основных влияющих факторов, учет которых возможен разработанной математической моделью, содержит реологические свойства пород. Но в тексте диссертационной работы отсутствуют примеры расчета, иллюстрирующие влияние изменения деформационных характеристик пород во времени на напряженное состояние обделок.

4. При выполнении исследований напряженного состояния обделок параллельных тоннелей не изучен вопрос о влиянии коэффициента Пуассона пород.

5. В работе отсутствуют результаты сравнения с данными мониторинга напряженно-деформированного состояния обделок существующих тоннелей.

6. В тексте диссертационной работы следовало бы привести более подробное обоснование четвертого научного положения.

В качестве пожелания следует указать на необходимость учета действия веса близко расположенных зданий или сооружений на поверхности.

Отмеченные замечания не снижают научной новизны и практической значимости выполненных в диссертации исследований.

Соответствие диссертации требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, при выполнении которой получено решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке аналитического метода расчета обделок параллельных тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности. Разработка данного метода имеет важное научное и практическое значение, по-

сколькx его применение позволяет получить новые закономерности формирования напряженного состояния массива пород и обделок тоннелей при различных вариантах компоновки и сочетаниях основных влияющих факторов.

Применение разработанного метода на этапе проектирования подземных сооружений в сложных условиях будет способствовать принятию обоснованных рациональных конструктивных и технологических решений, обеспечивающих прочность обделок тоннелей, тем самым предотвращающих опасные горно-геологические процессы и явления.

Текст работы написан единолично, содержит совокупность выносимых автором на защиту новых научных результатов и положений. Основные научные результаты диссертации опубликованы в соответствии с требованиями ВАК РФ. Заимствованного материала без ссылок на авторов и первоисточники не обнаружено.

Изложенный в диссертации материал имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в теорию расчета подземных сооружений. Работа соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Феклин Артём Александрович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Отзыв обсужден на заседании Ученого совета ОАО «Ленметрогипротранс»
протокол № 27/02/2024 от «27» февраля 2024 г.

Заместитель генерального директора
ОАО «Ленметрогипротранс» по
научно-исследовательской работе



Лебедев М.О.

191002, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, дом 2
тел. +7 (812) 316-20-22, факс +7 (812) 712-52-52

e-mail: mail@lmgt.ru