

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и международной деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет»,
доктор технических наук, профессор
Алексей Николаевич Бескопильный

« 09 » 06 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» о диссертации **Трещевой Ольги Витальевны** «Разработка метода расчета обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых с применением защитных экранов из труб», 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. В представленной работе рассматриваются теоретические аспекты, связанные с изучением влияния опережающего крепления в виде предварительно установленных по контуру выработки труб защитных экранов на обделки тоннелей неглубокого заложения, сооружаемых закрытым способом в слабых грунтах, изначально предназначенных для обеспечения устойчивости вмещающего массива и уменьшения осадок поверхности земной поверхности.

Выполненный автором анализ состояния вопроса исследования показывает, что в настоящее время аналитических методов оценки влияния труб защитных экранов на напряженное состояние обделок тоннелей и массива грунта не имеется. Использование пакетов специализированных компьютерных программ, получивших достаточно широкое применение в практике проектирования подземных сооружений, не всегда позволяет достичь поставленных целей, т.к. они в большей степени применимы для оценки деформаций дневной поверхности.

Необходимо отметить, что в работах представителей Тульской школы геомехаников - Фотиевой Н.Н., Булычева Н.С., Анциферова С.В., Саммалая А.С., Деева П.В. и др. - были сформулированы основные подходы и положения, которые применимы для получения решений соответствующих задач геомеханики и могут быть основой разрабатываемого нового метода расчета обделок тоннелей.

Учитывая изложенное выше, автором диссертационной работы поставлена и успешно решена актуальная научно-техническая задача разработки нового метода в рамках развития теории аналитических методов расчета конструкций подземных сооружений, позволяющего определять напряженное состояние обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных вблизи земной поверхности под защитой экранов из труб, размещенных вокруг контура выработки параллельно или под некоторым углом к ее продольной оси. Как показал диссертант, применение разработанного метода позволило уточнить известные и установить новые закономерности формирования напряженного состояния обделок тоннелей и вмещающего массива грунта.

Теоретической основой представленного диссертационного исследования являются результаты математического моделирования взаимодействия обделки тоннеля и вмещающего массива грунта при наличии вокруг контура выработки произвольно расположенных труб защитного экрана с возможным заполнением, базирующегося на полученных новых аналитических решениях сформулированных в работе задач геомеханики.

Применение теоретических положений геомеханики и механики подземных сооружений о взаимодействии вмещающего массива и конструкций подземных сооружений, а в рассматриваемом случае – грунта, труб защитного экрана и обделки тоннеля, сооружаемого вблизи земной поверхности, как элементов единой деформируемой системы позволяет для разработки метода расчета использовать апробированный математический аппарат решения соответствующих задач механики сплошных сред. Автором обоснована возможность достаточно адекватного учета в разработанной математической модели влияния геометрических и физико-механических параметров геомеханической системы на напряженное состояние обделок протяженных участков тоннелей с использованием расчетных схем плоских задач теории упругости.

Разработанная Трещевой О.В. в итоге математическая модель позволяет комплексно учитывать влияние на напряжённое состояние обделок тоннелей кругового поперечного сечения и массива грунта таких факторов, как глубину расположения тоннеля относительно земной поверхности; произвольное конечное число используемых труб защитного экрана, расположенных в грунте на достаточно близких расстояниях от контура выработки; размеры поперечных сечений выработки, используемой обделки и труб экрана; физико-механические и деформационные характеристики массива грунта, материалов обделки и труб с возможным заполнением; поле начальных напряжений в массиве грунта, обусловленных гравитационными силами (его собственным весом).

Учитывая, что до настоящего времени строгих решений подобных задач геомеханики, равно как и соответствующих методов расчета не имелось, диссертация Трещевой О.В., посвященная развитию теории и методов определения напряженного состояния подземных конструкций, а именно - разработке анали-

тического метода расчета обделок тоннелей неглубокого заложения, сооруженных с применением опережающего крепления в виде защитных экранов из труб, является актуальной и имеющей научное и практическое значение.

Содержание диссертации. Структура диссертации состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 167 страниц текста, включая 74 рисунка, 7 таблиц и список литературы.

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

В **первом разделе** приведен подробный анализ научных публикаций, посвященных практике применения защитных экранов из труб как одного из видов опережающего крепления. Автором подчеркивается, что методики, рекомендуемые действующими нормативными документами для обоснования параметров защитных экранов, позволяют выполнить расчет только величин прогибов труб защитного экрана и осадок земной поверхности с использованием подходов строительной механики. Как известно, эти методики не в полной мере учитывают собственную несущую способность грунта, они принципиально не способны оценить напряженное состояние как временной, так и постоянной обделки сооружаемого тоннеля при различном расположении труб защитного экрана. Рассмотрены примеры применения специализированных программных комплексов, реализующих численные методы при определении напряженно-деформированного состояния массива грунта, вмещающего тоннель.

Автором на основе выполненного анализа научных публикаций, посвященных применению защитных экранов из труб при строительстве тоннелей, содержащих результаты расчетов подобных объектов, полученных теми или иными способами, отмечается, что строгого аналитического метода определения напряженного состояния обделок тоннелей до настоящего времени не имелось, равно как и отсутствовали соответствующие решения задач геомеханики.

Во **втором разделе** диссертации приведены основные теоретические положения, использованные при разработке математической модели формирования напряженного состояния обделок тоннелей, сооруженных закрытым способом вблизи земной поверхности с применением защитных экранов различных форм, позволяющей учитывать влияние основных факторов.

В реализованной автором модели исследуемой геомеханической системы возможно использование достаточно произвольных схем расположения труб экрана – плоских над контуром выработки, расположенных по части и всему контуру, П-образных, с перекрытием и др. Использование расчетных схем соответствующих плоских задач теории упругости и общего алгоритма их решения делает возможным получение результатов для других вариантов располо-

жения элементов системы, что свидетельствует об определенной универсальности предлагаемого метода.

Расчетные схемы, постановка и решение плоской задачи теории упругости о напряженно-деформированном состоянии весомой линейно деформируемой полубесконечной среды, содержащей подкрепленное концентрическим кольцом круговое отверстие, вблизи которого расположены круговые шайбы из материалов с отличающимися деформационными характеристиками, при граничных условиях, отражающих действие ее собственного веса, служат основой для разработки соответствующего аналитического метода расчета.

Необходимо отметить, что использование современных представлений геомеханики и механики подземных сооружений о совместной работе массива грунта, обделки тоннеля и труб защитного экрана как элементов единой деформируемой системы позволяют в более полной мере учитывать собственную несущую способность грунта, оказывающую влияние на напряженное состояние подземных конструкций.

В **третьем разделе** работы выполнен переход от поставленной задачи теории упругости к соответствующей краевой задаче теории функций комплексного переменного (ТФКП), приведены соответствующие граничные условия, записанные с использованием комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили, отвечающих за напряженно-деформированное состояние соответствующих областей, моделирующих массив грунта, сечения обделки и труб с возможным заполнением. Решение краевой задачи ТФКП потребовало применения комплексных рядов Лорана, выполнения аналитического продолжения комплексных потенциалов через границу полуплоскости с использованием свойств интегралов типа Коши.

Особенностью представленного решения является применение автором сходящегося итерационного процесса, на каждом шаге которого находится решение задачи о полной плоскости, содержащей либо подкрепленное отверстие, либо сплошную шайбу, с граничными условиями с дополнительными членами, обусловленными наличием границы полуплоскости и оставшихся концентраторов напряжений, уточняемыми в каждом приближении.

В **четвертом разделе** приведен полный алгоритм расчета обделок тоннелей, реализованный в виде компьютерной программы, предназначенной для оценки напряженного состояния обделок тоннелей, сооружаемых под защитой экранов из труб. Применение программы возможно как при практическом проектировании, так и в научных целях при необходимости установления закономерностей формирования напряженного состояния подземных конструкций.

По результатам оценки точности удовлетворения граничных условий при различных сочетаниях основных параметров, влияющих на сходимость итерационного процесса, автором установлена погрешность их удовлетворения, не превышающая 5% при удержании не более 20 членов в используемых рядах Лорана, и практически полное совпадение результатов применения аналитиче-

ских методов для частных случаев, разработанных ранее другими авторами. Это свидетельствуют о корректности разработанного в диссертации метода расчета.

Разработанный метод, как указывает автор, позволяет с использованием численных методик выполнять учет последовательности проходки тоннеля по отношению к сооружению защитного экрана, отставание возведения обделки от забоя выработки, а также реологические свойства массива грунта.

В пятом разделе диссертационной работы содержатся разнообразные примеры расчета обделок тоннелей, демонстрирующие возможности разработанной программы при различном расположении труб защитного экрана и сочетаниях основных влияющих факторов. Результаты расчетов представлены в виде соответствующих эпюр напряжений или их разверток.

На основе анализа результатов компьютерного моделирования с использованием разработанной программы автором установлены закономерности формирования напряженного состояния обделок тоннелей при изменении основных влияющих факторов для различных форм экрана и их сравнительный анализ.

Результаты выполненных многовариантных расчетов позволили уточнить закономерности возникновения напряжений в точках поперечного сечения контура массива грунта незакрепленной выработки, а также напряжений, возникающих в точках наружного и внутреннего контуров обделки. Установленные зависимости, имеющие научную новизну, подтверждают возможность использования математической модели взаимодействия массива грунта с обделкой тоннеля мелкого заложения кругового поперечного сечения при наличии труб защитных экранов различных форм, базирующейся на аналитических решениях соответствующих плоских задач теории упругости, для определения напряжённого состояния обделок тоннелей с учетом влияния основных факторов.

Автором установлено, что защитные экраны различных форм, их расположение вокруг выработки, деформационные характеристики грунта, материалов обделки и труб с возможным заполнением могут оказывать существенное влияние на формирование напряжённого состояния как грунта, так и обделки тоннеля, приводя к снижению растягивающих нормальных напряжений в массиве грунта на поверхности выработки в 1,5 раза, сжимающих - на 17% по сравнению с напряжениями на контуре выработки без опережающего крепления. Уменьшение расстояния от труб защитного экрана до контура выработки, вызванное, например, наклонным расположением труб экрана к ее продольной оси, может приводить к увеличению максимальных значений как растягивающих, так и сжимающих нормальных тангенциальных напряжений в обделке тоннеля.

Научная новизна исследования, несомненно, заключается в предложенной математической модели взаимодействия обделки тоннеля, массива грунта и труб защитного экрана; разработанном методе расчета обделок тоннелей;

установленных новых закономерностях формирования напряженного состояния элементов исследуемой геомеханической системы.

Текст автореферата полностью отражает содержание выполненной диссертационной работы.

Автором достигнута цель исследования – разработан метод расчета обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых с применением защитных экранов из труб, позволяющий получить новые знания о формировании напряженного состояния элементов геомеханической системы «массив грунта – трубы защитного экрана - обделка тоннеля».

Соответствие специальности 2.8.6. Автором на основе математического моделирования взаимодействия грунта и подземных конструкций как элементов единой деформируемой системы разработан новый аналитический метод расчета, позволяющий выявлять закономерности формирования напряженного состояния обделок при действии гравитационных сил в массиве.

Результаты, получаемые с использованием разработанного метода, могут быть использованы при геомеханическом обосновании принимаемых инженерных решений, направленных на предотвращение опасных горно-геологических явлений при строительстве новых или реконструкции имеющихся тоннелей.

Содержание диссертации полностью соответствует п.п. 1, 2, 4, 5 паспорта научной специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

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, полученными другими авторами.

Личный вклад автора заключается в выполнении анализа научных публикаций по теме исследования; разработке математической модели, включающей обоснование расчётных схем, постановку и получение решения соответствующей задачи теории упругости; разработке алгоритма и метода расчета, реализованных в виде программного обеспечения; установлении на основе результатов компьютерного моделирования закономерностей формирования напряженного состояния обделок и массива грунта при различных сочетаниях влияющих факторов.

Научная и практическая ценность работы заключается в развитии теории аналитических методов расчета конструкций подземных сооружений и предложенном методе расчета обделок тоннелей, сооруженных под защитой экрана из труб, учитывающем влияние глубины заложения тоннеля; геометрии

ческих размеров поперечных сечений выработки и обделки; количества, диаметров и расположения труб защитного экрана; физико-механических характеристик грунта, материалов труб и обделки.

Апробация и публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 2 — в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Результаты исследований были доложены и обсуждены на представительных национальных и международных научных конференциях.

Замечания по диссертации:

1. Разработанная математическая модель взаимодействия элементов исследуемой геомеханической системы не предусматривает наличия нагрузок, обусловленных весом объектов на поверхности, а также близко расположенных других подземных сооружений.

2. В работе не приведены результаты расчета, иллюстрирующие влияние технологических этапов сооружения тоннеля на напряженное состояние его обделки, а также влияние реологических свойств грунта и материала (бетона) обделки.

3. В работе отсутствует сравнение результатов, полученных с использованием разработанного метода расчета, с данными мониторинга напряженно-деформированного состояния массива грунта при сооружении тоннелей под защитой экрана из труб.

4. Не ясно, позволяет ли разработанная модель использование труб защитного экрана некругового сечения, а также возможное наличие замковых соединений различной конструкции.

В качестве пожелания следует указать на необходимость развития метода расчета в направлении учета формы поперечного сечения тоннеля, отличной от круговой, а также 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 нового аналитического метода расчета обделок тоннелей, сооружаемых закрытым способом вблизи земной поверхности с применением защитных экранов из труб, позволяющего установить новые закономерности формирования напряженного состояния обделок тоннелей, что будет способствовать принятию обоснованных конструктивных или технологических решений, обеспечивающих прочность и надежность подземных сооружений различного назначения.

Применение разработанного метода на этапе проектирования подземных сооружений в сложных условиях будет способствовать принятию обоснованных рациональных конструктивных и технологических решений, обеспечива-

ющих прочность обделок тоннелей и предотвращающих возникновение опасных горно-геологических процессов.

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 аналитических методов расчета конструкций подземных сооружений. Работа соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Трещева Ольга Витальевна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6. «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен на заседании «Инженерная геология, основания и фундаменты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» «07» мая 2025 года. Протокол заседания № 11 от «07» мая 2025 г.

Заведующий кафедрой «Инженерная геология, основания и фундаменты»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет»,
доктор технических наук, профессор,
Почетный работник высшего профессионального образования РФ

Прокопов Альберт Юрьевич

Адрес: 344000, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1.
E-mail: reception@donstu.ru
Сайт: <https://donstu.ru/>
Тел.: +7 (863) 273-85-25

Подпись проф. А.Ю. Прокопова заверяю

Ученый секретарь ученого совета ДГТУ

В.Н. Анисимов

