

На правах рукописи



ТРЕЩЕВА Ольга Витальевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ
КРУГОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ, СООРУЖАЕМЫХ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ИЗ ТРУБ**

Специальность: 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ), г. Тула.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
АНЦИФЕРОВ Сергей Владимирович
Официальные оппоненты:

ПАНКРАТЕНКО Александр Никитович, доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой строительства подземных сооружений и шахт, НИТУ МИСиС, г. Москва

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тоннели и метрополитены», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.

Защита диссертации состоится «02» июля 2025 г. в 14 час 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.417.05 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 90, 6-й уч. корпус, ауд. 220. Тел/факс: (4872) 33–81–81.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета (г. Тула, просп. Ленина, 92) и на сайте: <http://www.tsu/tula.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, Ученый совет ТулГУ, факс: +7(4872) 35–81–81.

Автореферат разослан «12» мая 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стась Галина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При строительстве тоннелей закрытым способом в слабых грунтах применяются предварительно установленные по контуру сооружаемой выработки параллельно или под некоторым углом к ее продольной оси трубы защитных экранов, обеспечивающих устойчивость грунтового массива и уменьшающих осадки поверхности.

Нормативно-технические документы по проектированию подземных сооружений содержат методики по определению деформаций труб экрана, базирующиеся на подходах строительной механики, которые не дают возможности выполнить геомеханическое обоснование таких параметров защитных экранов, как его рациональная форма, количество труб и размеры их поперечного сечения; расстояние от контура выработки до экрана, необходимость заполнения труб бетоном или железобетоном, а также оценить влияние этих факторов на прочность обделок сооружаемых тоннелей.

Степень разработанности темы исследования. Результаты определения напряженно-деформированного состояния конструкций подземных сооружений, полученные с применением специализированных компьютерных программ, реализующих численные решения геомеханических задач, требуют дополнительной верификации путем сравнения с данными мониторинга состояния подземных конструкций, либо аналитических расчетов.

Аналитических методов, позволяющих оценить влияние защитных экранов на напряженное состояние массива грунта и обделок тоннелей, до настоящего времени не имелось, так же как и отсутствовали необходимые для их разработки решения задач геомеханики. Однако результаты исследований Фотиевой Н.Н., Булычева Н.С., Анциферова С.В., Саммалы А.С., Деева П.В. и др. могут быть положены в основу аналитического метода расчета обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитных экранов из труб.

Целью диссертационного исследования является разработка метода расчета обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных с применением экранов из труб, позволяющего установить закономерности формирования напряжённого состояния элементов геомеханической системы "массив грунта – трубы экрана – обделка тоннеля" и оценить прочность подземных конструкций.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Объект исследования – напряженное состояние массива грунта и обделок тоннелей, сооружаемых с применением опережающего крепления в виде защитных экранов из труб.

Предмет исследования – процессы взаимодействия обделки тоннеля с окружающим массивом грунта при наличии труб защитного экрана.

Идея работы заключается в возможности определения напряженного состояния грунта и обделок тоннелей, сооружаемых под защитой экрана из труб, с использованием предложенного метода расчета.

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

Методология и методы исследования включают анализ практики применения опережающего крепления при строительстве подземных сооружений в слабых грунтах; математическое моделирование взаимодействия элементов геомеханической системы "массив грунта – трубы защитного экрана – обделка тоннеля", постановку соответствующей задачи геомеханики и получение ее аналитического решения методами ТФКП; разработку соответствующего компьютерного программного обеспечения; оценку достоверности получаемых результатов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель взаимодействия массива грунта с обделкой тоннеля мелкого заложения кругового поперечного сечения при наличии труб защитных экранов различных форм, базирующаяся на аналитическом решении соответствующей плоской задачи теории упругости, позволяет определять напряжённое состояние элементов исследуемой геомеханической системы с учетом влияния основных факторов;

- защитные экраны различных форм, их расположение вокруг выработки, деформационные характеристики грунта, материалов обделки и труб с возможным заполнением оказывают 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, например, при наклонном расположении труб экрана к ее продольной оси, может приводить к увеличению максимальных значений как растягивающих, так и сжимающих нормальных тангенциальных напряжений.

Научная новизна исследования заключается в предложенной

математической модели взаимодействия обделки тоннеля, массива грунта и защитного экрана; разработанном методе расчета; установленных новых закономерностях формирования напряженного состояния элементов исследуемой геомеханической системы.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций подтверждается использованием теоретических положений геомеханики, аппарата математической теории упругости и ТФКП, выполнением строгого аналитического решения задачи теории упругости и достижением высокой точности удовлетворения ее граничных условий; согласованием результатов расчётов с данными, полученными другими авторами.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (Тула, 2018 – 2024); Межрегиональных научных сессиях молодых исследователей "Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи" (Тула, 2020–2023); XVI Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Проблемы недропользования" (Екатеринбург, 2022); Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики "Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики" (Тула, 2022–2023); XII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов "Опыт прошлого – взгляд в будущее" (Тула, 2022); 25-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Тула, 2024); Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка» (Москва, 2021–2023); Всероссийской научной конференции с международным участием "Геодинамика и напряженное состояние недр земли" (Новосибирск, 2023); XII Всероссийской конференции "Молодежная наука в развитии регионов" (Березники, 2022 – 2024) и др.

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 закономерностей формирования напряженного состояния обделок и массива грунта при различных сочетаниях влияющих факторов.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, из них 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК, 13 - в рецензируемых изданиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Применение защитных экранов из труб как одного из видов опережающего крепления особенно эффективно при строительстве тоннелей закрытым способом на небольшой глубине на застроенной городской территории, либо непосредственно под существующими транспортными магистралями, когда использование открытого способа затруднительно или невозможно. Совершенствованию практики строительства тоннелей различного назначения с применением опережающего крепления посвящены работы Безродного К.П., Власова С.Н., Гречухина В.А., Деменкова П.А., Дормана И.Я., Ильичева В.А., Кавказского В.Н., Карасева М.А., Колина Д.И., Лебедева М.О., Маковского Л.В., Маслака В.А., Меркина В.Е., Пастушкова Г.П., Протосени А.Г., Старчевской Л.Л., Фролова Ю.С., Шарифова С.А., Щекудова Е.В., Р. Lunardi (Италия), R.K. Goel (Индия), G.M. Volkman, W. Schubert (Австрия), E. Hoek (Зимбабве), N. Vlachopoulos, M. Diederichs (Канада), J.P. Janin (Франция), In Mo Lee (Южная Корея), Y. Nakoishi (Япония) и др.

Для обоснования параметров защитных экранов нормативными документами предусматривается использование методик, основанных на положениях строительной механики и эмпирических гипотезах сводообразования, а также специализированных программных комплексов, реализующих численные методы определения напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив». Возможности выполнения аналитической оценки напряженного состояния массива грунта и обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитных экранов из труб, до настоящего времени не имелось, хотя современный уровень развития теории расчета конструкций подземных объектов позволяет разработать соответствующий метод.

Предлагаемый аналитический метод расчета базируется на результатах теоретических исследований Арамановича И.Г., Булычева Н.С., Фотиевой Н.Н. и их учеников, развитие которых позволило выполнить математическое моделирование взаимодействия обделок тоннелей и окружающего массива грунта с учетом наличия труб защитного экрана как элементов единой деформируемой геомеханической системы.

При разработке метода поставлены и решены следующие задачи:

- определение внешних факторов, оказывающих существенное влияние на напряженное состояние массива грунта и обделок тоннелей;
- обоснование расчетных схем задачи геомеханики; постановка задачи теории упругости и получение ее строгого аналитического решения с использованием математического аппарата теории функций комплексного переменного (ТФКП);
- составление алгоритма и компьютерной программы, предназначен-

ной для выполнения многовариантных расчетов при проектировании;

- установление закономерностей формирования напряженного состояния грунта и обделок при различных сочетаниях влияющих факторов.

Метод расчета позволяет учесть влияние на напряженное состояние элементов рассматриваемой геомеханической системы неравнокомпонентного поля начальных напряжений в массиве, обусловленных гравитационными силами; близко расположенной земной поверхности; физико-механических характеристик массива грунта, материалов обделки и труб с возможным заполнением; размеров поперечных сечений обделки тоннеля и труб, их количества и взаимного расположения; последовательности сооружения экрана и тоннеля; отставания возведения обделки от забоя выработки. Формы поперечного сечения защитных экранов, различающиеся расположением труб относительно выработки, не ограничивая наличия других возможных, представлены на рисунке 1.

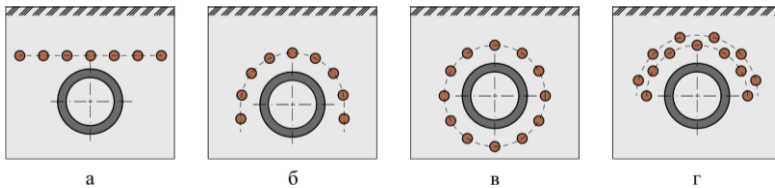


Рисунок 1 – Формы защитного экрана: а – плоский в сводовой части; б – по части контура; в – по замкнутому контуру; г – с перекрытием

Поскольку далее будут рассматриваться протяженные участки тоннелей, в основу математической модели положены решения плоских задач теории упругости, одна из расчетных схем которых приведена на рисунке 2.

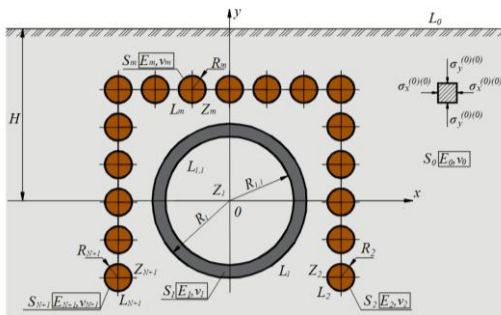


Рисунок 2 – Расчетная схема плоской задачи теории упругости

На схеме в полубесконечной весомой однородной линейно-деформируемой среде S_0 на расстоянии H от границы L_0 расположено отверстие с контуром L_1 радиусом R_1 , подкрепленное концентрическим кольцом S_1 с

внутренним контуром $L_{1,1}$ радиусом $R_{1,1}$, моделирующие массив грунта и поперечное сечение обделки тоннеля, расположенного вблизи земной поверхности. В среде имеется произвольное число N ($N \geq 1$) сплошных круговых шайб S_m с центрами z_m ($m=2, \dots, N+1$) и контурами L_m радиусами R_m , моделирующих поперечные сечения труб защитного экрана с возможным заполнением. Материал среды характеризуется коэффициентом бокового давления λ , а также усредненными величинами объемного веса γ . Модули деформации и коэффициенты Пуассона материалов: среды – E_0 , ν_0 ; кольца – E_1 , ν_1 ; шайб – приведенные E_m и ν_m ($m=2, \dots, N+1$) соответственно.

Полные напряжения в среде S_0 представляются в виде сумм

$$\sigma_x^{(0)*} = \sigma_x^{(0)(0)} + \sigma_x^{(0)}; \quad \sigma_y^{(0)*} = \sigma_y^{(0)(0)} + \sigma_y^{(0)}, \quad \tau_{xy}^{(0)*} = \tau_{xy}^{(0)(0)} + \tau_{xy}^{(0)}, \quad (1)$$

в которых $\sigma_x^{(0)}$, $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$ – искомые дополнительные напряжения, обусловленные наличием в среде подкрепленного отверстия и шайб; $\sigma_x^{(0)(0)}$, $\sigma_y^{(0)(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)(0)}$ – начальные напряжения, определяемые по формулам

$$\sigma_y^{(0)(0)} = -\gamma(H-y); \quad \sigma_x^{(0)(0)} = -\lambda\gamma(H-y); \quad \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0. \quad (2)$$

Дополнительные напряжения в областях S_m ($m=1, 2, \dots, N+1$) являются полными, т.к. начальными напряжениями пренебрегается. Смещения в точках всех областей рассматриваются только дополнительные.

Граничные условия поставленной задачи отражают действие гравитационных сил в области S_0 и условия полного контакта на границах раздела областей с различными деформационными характеристиками. Граница L_0 среды S_0 свободна от действия внешних сил, поэтому полные нормальные $\sigma_y^{(0)*}$ и касательные $\tau_{xy}^{(0)*}$ напряжения в точках этой линии отсутствуют:

$$\sigma_y^{(0)*} \Big|_{L_0} = 0, \quad \tau_{xy}^{(0)*} \Big|_{L_0} = 0. \quad (3)$$

На контурах L_m ($m=1, 2, \dots, N+1$) областей с различными деформационными характеристиками выполняются условия непрерывности векторов полных напряжений и дополнительных смещений:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(m)*} \Big|_{L_m} = \sigma_r^{(0)*} \Big|_{L_m}, & \tau_{r\theta}^{(m)*} \Big|_{L_m} = \tau_{r\theta}^{(0)*} \Big|_{L_m}, \\ u^{(m)} \Big|_{L_m} = u^{(0)} \Big|_{L_m}, & v^{(m)} \Big|_{L_m} = v^{(0)} \Big|_{L_m} \end{cases} \quad (m=1, 2, \dots, N+1); \quad (4)$$

внутренний контур $L_{1,1}$ кольца S_1 свободен от действия внешних сил:

$$\sigma_r^{(1)*} \Big|_{L_{1,1}} = 0, \quad \tau_{r\theta}^{(1)*} \Big|_{L_{1,1}} = 0. \quad (5)$$

В условиях (4), (5) $\sigma_r^{(m)*}$, $\tau_{r\theta}^{(m)*}$ – полные радиальные и касательные напряжения; $u^{(m)}$, $v^{(m)}$ – радиальные и окружные смещения точек границ областей S_m в полярных системах координат, полюса которых совмещены с центрами поперечных сечений областей S_m ($m=1, \dots, N+1$).

Для решения задачи теории упругости применяется математический аппарат, предусматривающий использование комплексных потенциалов $\tilde{\varphi}_m(z)$, $\tilde{\psi}_m(z)$, связанных с напряжениями и смещениями в точках областей S_m ($m=0, 1, 2, \dots, N+1$) известными формулами Колосова-Мусхелишвили и переход к соответствующей краевой задаче ТФКП для многосвязной кусочно-однородной области с граничными условиями:

- на линии L_0 ($t_0 = x + iH$)

$$\tilde{\varphi}_0(t_0) + \overline{t_0 \tilde{\varphi}_0'(t_0)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_0)} = 0; \quad (6)$$

- на контурах L_m ($t_m = z_m + R_m \sigma$, $\sigma = e^{i\theta}$, $m=1, 2, \dots, N+1$)

$$\begin{cases} \varphi_m(t_m) + \overline{t_m \varphi_m'(t_m)} + \overline{\psi_m(t_m)} = \tilde{\varphi}_0(t_m) + \overline{t_m \tilde{\varphi}_0'(t_m)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)} + f_m(t_m), \\ \mathfrak{A}_m \varphi_m(t_m) - \overline{t_m \varphi_m'(t_m)} - \overline{\psi_m(t_m)} = \frac{\mu_m}{\mu_0} \left[\mathfrak{A}_0 \tilde{\varphi}_0(t_m) - \overline{t_m \tilde{\varphi}_0'(t_m)} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_m)} \right]; \end{cases} \quad (7)$$

- на контуре $L_{1,1}$ ($t_{1,1} = R_{1,1} \sigma$, $\sigma = e^{i\theta}$)

$$\tilde{\varphi}_1(t_{1,1}) + \overline{t_{1,1} \tilde{\varphi}_1'(t_{1,1})} + \overline{\tilde{\psi}_1(t_{1,1})} = 0. \quad (8)$$

В соотношениях (6) – (8) приняты обозначения: i – мнимая единица ($i^2 = -1$); σ – аффикс точки окружности с единичным радиусом; θ – полярный угол, отсчитываемый от положительного направления оси Ox против хода часовой стрелки; $\mathfrak{A}_m = 3 - 4\nu_m$; $\mu_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$ ($m=0, 1, \dots, N+1$) – упругие константы материалов. Неравнокомпонентное поле начальных напряжений (2) в среде S_0 обуславливает наличие на контурах L_m главных векторов внешних усилий $X^{(0,m)} + iY^{(0,m)}$, определяемых формулами

$$X^{(0,m)} + iY^{(0,m)} = 2\pi i K_m, \quad K_m = \frac{\gamma R_m^2}{2} \quad (m=1, 2, \dots, N+1). \quad (9)$$

Функции $f_m(t_m)$ с учетом обозначения $H_m = H - y_m$ принимают вид

$$f_m(t_m) = -\frac{\gamma R_m^2}{2} \left(-i \frac{1-\lambda}{4} \cdot \sigma^{-2} + \frac{H_m}{R_m} (1-\lambda) \sigma^{-1} + (1+\lambda) \frac{H_m}{R_m} \sigma + i \frac{1+\lambda}{4} \sigma^2 - i \ln \sigma \right). \quad (10)$$

Потенциалы $\tilde{\varphi}_0(z)$, $\tilde{\psi}_0(z)$, $\tilde{\varphi}_m(z)$, $\tilde{\psi}_m(z)$ представляются в виде:

$$\tilde{\varphi}_0(z) = \sum_{j=1}^{N+1} \tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j), \quad \tilde{\psi}_0(z) = \sum_{j=1}^{N+1} \left[\tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j) - \overline{z_j} \tilde{\varphi}_{0,j}'(z-z_j) \right]; \quad (11)$$

$$\tilde{\varphi}_m(z) = \varphi_m(z-z_m), \quad \tilde{\psi}_m(z) = \psi_m(z-z_m) - \overline{z_m} \varphi_m'(z-z_m). \quad (12)$$

Функции $\varphi_m(z-z_m)$, $\psi_m(z-z_m)$ регулярны в областях S_m ($m=1, \dots, N+1$); $\tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j)$, $\tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j)$, являющиеся регулярными в области S_0 вне контуров L_j ($j=1, 2, \dots, N+1$), включая бесконечно удаленную точку, с учетом наличия границы L_0 полуплоскости и отличных от нуля главных векторов внешних усилий на контурах L_j представляются соотношениями

$$\tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j) = \varphi_{0,j}^*(z-z_j) - \frac{iK_j}{1+\alpha_0} \left[\ln(z-z_j) + \alpha_0 \ln(z-z_j-2iH_j) \right]; \quad (13)$$

$$\tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j) = \psi_{0,j}^*(z-z_j) - \frac{iK_j}{1+\alpha_0} \left[\alpha_0 \ln(z-z_j) + \ln(z-z_j-2iH_j) \right], \quad (14)$$

$\varphi_{0,j}^*(z-z_j)$, $\psi_{0,j}^*(z-z_j)$ являются регулярными в полуплоскости вне соответствующих контуров, включая бесконечно удаленную точку; $K_j = \frac{\gamma R_j^2}{2}$.

Для выполнения аналитического продолжения потенциалов $\varphi_{0,j}^*(z-z_j)$, $\psi_{0,j}^*(z-z_j)$ через границу L_0 вводятся функции

$$\varphi_{0,j}(z-z_j) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(0,j)} \left(\frac{z-z_j}{R_j} \right)^{-k}; \quad \psi_{0,j}(z-z_j) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(0,j)} \left(\frac{z-z_j}{R_j} \right)^{-k} \quad (15)$$

с неизвестными коэффициентами $c_k^{(1)(0,j)}$, $c_k^{(2)(0,j)}$ ($j=1, 2, \dots, N+1$), регулярные в полной плоскости вне отверстия и шайб соответственно.

Условия (6), представления (13), (14), свойства теоремы Сохоцкого-Племеля и интегралов типа Коши позволяют для потенциалов $\tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j)$, $\tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j)$ ($j=1, 2, \dots, N+1$) на контурах L_m получить соотношения

$$\tilde{\varphi}_{0,j}(t_m - z_j) = \lambda_{j,m} \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(0,m)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(3)(m,j)} \sigma^k - \lambda_{j,m} \frac{iK_m}{1 + \varepsilon_0} \ln \sigma; \quad (16)$$

$$\tilde{\psi}_{0,j}(t_m - z_j) = \lambda_{j,m} \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(2)(0,m)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(m,j)} \sigma^k - \lambda_{j,m} \frac{iK_m}{1 + \varepsilon_0} \varepsilon_0 \ln \sigma,$$

в которых опущены константы, не влияющие на напряженное состояние областей. В (16) принято $\lambda_{j,m}=1$ при $j=m$ и $\lambda_{j,m}=0$ при $j \neq m$. Коэффициенты $C_k^{(3)(m,j)}$; $C_k^{(4)(m,j)}$ последовательно уточняются в ходе предложенного итерационного процесса с использованием установленных соотношений.

Функции $\varphi_m(z - z_m)$, $\psi_m(z - z_m)$ ($m=1,2,\dots, N+1$) представляются в виде рядов Лорана с неизвестными коэффициентами

$$\begin{aligned} \varphi_m(z - z_m) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(m)} \left(\frac{z - z_m}{R_m} \right)^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} C_k^{(3)(m)} \left(\frac{z - z_m}{R_m} \right)^k, \\ \psi_m(z - z_m) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(m)} \left(\frac{z - z_m}{R_m} \right)^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(m)} \left(\frac{z - z_m}{R_m} \right)^k. \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициенты $c_k^{(l)(1)}$ и $c_k^{(p)(0,j)}$ ($l=1,\dots,4$; $p=1,2$; $j=1,2,\dots,N+1$; $k=1,2,\dots,\infty$) разложений потенциалов, характеризующих напряженно-деформированное состояние кольца S_1 и среды S_0 , связаны формулами

$$c_k^{(l)(1)} = \left(\frac{R_1}{R_{1,1}} \right)^{e(l,k)} \left[\sum_{p=1}^2 \sum_{\nu=1}^{\infty} \left(P_{k,\nu}^{(p,l)} c_{\nu}^{(p)(0,1)} + Q_{k,\nu}^{(p,l)} \overline{c_{\nu}^{(p)(0,1)}} \right) + N_k^{(l)} \right], \quad (18)$$

$e(l,k)=k$ при $l=1,2$; $e(l,k)=-k$ при $l=3,4$; $P_{k,\nu}^{(p,l)}$, $Q_{k,\nu}^{(p,l)}$, $N_k^{(l)}$ – установленные коэффициенты. Для определения величин $c_k^{(l)(0,1)}$ ($l=1,2$; $k=1,2,\dots,\infty$) получены разрешающие системы линейных алгебраических уравнений относительно их действительных и мнимых частей, а для $c_k^{(s)(0,m)}$ ($s=1,2$; $m=2,\dots, N+1$; $k=1,2,\dots,\infty$) – замкнутые формулы.

Особенностью предложенного решения является сходящийся итерационный процесс, на каждом шаге которого рассматриваются задачи для подкрепленного кольцом отверстия, либо одной шайбы в полной плоскости, дающий возможность определить коэффициенты разложений искомых комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили в ряды Лорана.

Полученное решение составляет основу метода расчета обделок круговых тоннелей мелкого заложения, сооружаемых закрытым способом с

применением защитного экрана из труб, расположенных за контуром сечения выработки, на действие собственного веса грунта. Данный метод с дополнительным применением известных методик позволяет учесть влияние последовательности сооружения тоннеля по отношению к предварительно установленному экрану из труб, а также отставание возведения обделки от забоя выработки на напряженное состояние обделок.

Проведенное в процессе разработки и отладки компьютерной программы сравнение результатов, полученных с применением предлагаемого метода, с данными аналитических расчетов других авторов (Фотиева Н.Н., Саммаль А.С., Анциферов С.В.) для частных случаев выявило их удовлетворительное согласование.

На рисунке 3 представлены расчетная схема (рис. 3 а), развертки эпюр радиальных σ_r в массиве грунта на контуре выработки (рис. 3 б), нормальных тангенциальных σ_θ напряжений в точках наружного (рис. 3 в) и внутреннего (рис. 3 г) контуров бетонной обделки тоннеля при различном расстоянии δ от центров труб защитного экрана до контура выработки. Исходные данные: $E_0 = 12 \text{ МПа}$ (супесь с гравием или галькой); $\nu_0 = 0,3$; $\gamma = 0,020 \text{ МН/м}^3$; $\lambda = 0,43$; $H = 10 \text{ м}$; $R_1 = 3,0 \text{ м}$; толщина обделки $\Delta = 0,2 \text{ м}$; модуль деформации бетона $E_1 = 27000 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,2$.

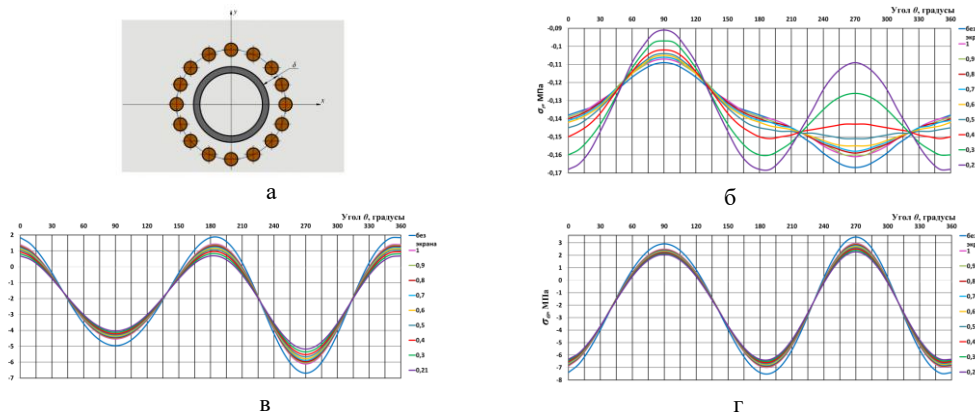


Рисунок 3 – Расчетная схема (а); развертки эпюр радиальных напряжений в грунте на контуре выработки (б); нормальных тангенциальных на наружном (в) и внутреннем (г) контурах обделки при $E_0 = 12 \text{ МПа}$

Экран состоит из 36 равномерно расположенных вокруг всего контура выработки заполненных бетоном стальных труб радиусами $R = 0,125 \text{ м}$ с

приведенным модулем деформации $E = 70000 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$.

Дополнительно представлены результаты расчетов для тоннеля, сооруженного без применения защитного экрана. Угол θ отсчитывается от горизонтали против хода часовой стрелки. Расчеты соответствуют наиболее неблагоприятному случаю – одновременному появлению подкрепленного отверстия и шайб, моделирующих сечение обделки и труб, устанавливаемых из забоя по всему контуру выработки под малым углом к продольной оси, что приводит к изменению расстояния δ от контура выработки до центров сечения труб в диапазоне от 0,21 м до 1 м в пределах одной заходки.

С уменьшением расстояния δ от 1,0 м до 0,21 м для радиальных напряжений σ_r (нагрузки на обделку) в грунте на контуре выработки в верхней ($\theta = 90^\circ$) и в нижней ($\theta = 270^\circ$) точках вертикального диаметра наблюдается их снижение, например, при $\delta = 0,21$ м на 16% и 35%, в сечениях при $\theta = 190^\circ$ и $\theta = 350^\circ$ уменьшение σ_r составляет 17%.

На наружном контуре обделки (рис. 3 в) сжимающие напряжения σ_θ с изменением δ от 1,0 м до 0,21 м уменьшаются по абсолютной величине в верхней и нижней точках вертикального диаметра на 11% и 18%; растягивающие σ_θ в точках вблизи горизонтального диаметра сечения обделки ($\theta = 190^\circ$ и $\theta = 350^\circ$) уменьшаются на 7%. В точках внутреннего контура обделки (рис. 3 г) установлено снижение напряжений σ_θ как растягивающих в своде и лотке на 23%, так и сжимающих в боках на 10%.

На рисунке 4 приведены фрагменты эпюр нормальных тангенциальных напряжений σ_θ в грунте на контуре незакрепленной выработки при $E_0 = 300 \text{ МПа}$, $\nu_0 = 0,3$, $\lambda = 0,43$ для различных форм защитных экранов (плоского, по всему контуру и П-образного) при $\delta = 0,4$ м.

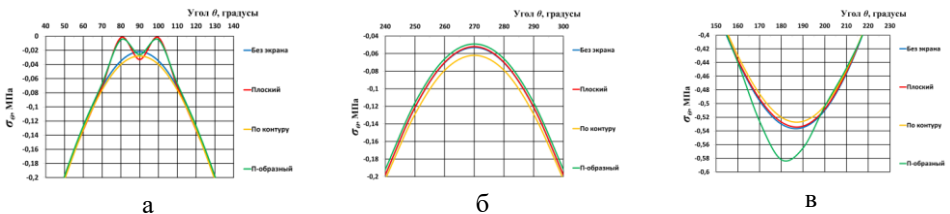


Рисунок 4 – Напряжения σ_θ в грунте на контуре выработки:

а – сводчатая часть; б – лоток; в – бока

Минимальные напряжения (сжимающие) возникают на контуре вблизи свода выработки (рис. 4 а): при отсутствии защитного экрана $-0,022 \text{ МПа}$; при использовании защитных экранов напряжения увеличиваются в 1,3...1,5 раз. В лотке выработки (рис. 4 б) влияние плоского экрана весьма незначительно; экран, расположенный по всему контуру выработки, увеличивает σ_θ на 18%; П-образный экран снижает их на 8%. В боках выработки (рис. 4 в) в сечениях при $\theta = 150^\circ \dots 225^\circ$ возникают максимальные значения σ_θ . Применение плоского или экрана по контуру выработки приводит к незначительному снижению σ_θ (не более 2%), а П-образного – к увеличению на 10% по сравнению с выработкой, пройденной без применения экрана.

На рисунках 5 – 7 представлены фрагменты эпюр напряжений σ_r в грунте на контуре выработки (рис. 5), напряжений σ_θ на наружном (рис. 6) и внутреннем (рис. 7) контурах обделок тоннелей, сооружаемых в относительно слабых $E_0 = 12 \text{ МПа}$ и прочных $E_0 = 300 \text{ МПа}$ грунтах, $\nu_0 = 0,3$, $\lambda = 0,43$ при отсутствии экрана и его различных формах ($\delta = 0,4 \text{ м}$).

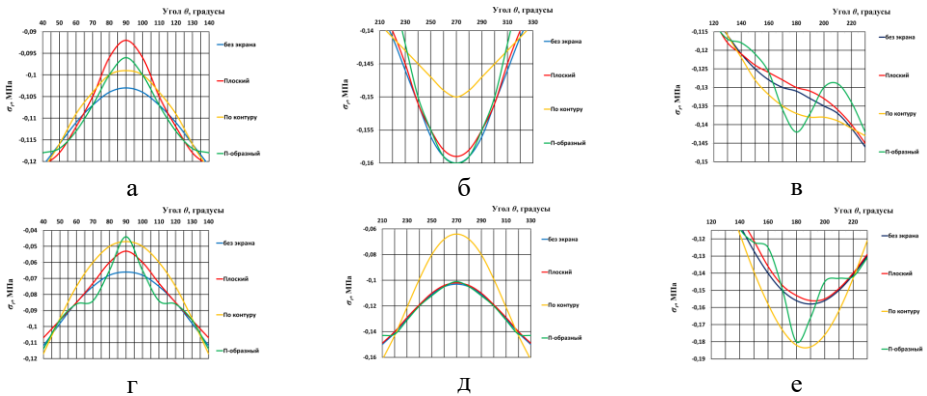


Рисунок 5 – Эпюры напряжений σ_r в грунте на контуре выработки:

а, б, в – при $E_0 = 12 \text{ МПа}$; г, д, е – при $E_0 = 300 \text{ МПа}$

Применение защитного экрана в слабых грунтах приводит к снижению напряжений σ_r в грунте вблизи свода выработки на 10% при плоском, на 7% при П-образном и на 5% для экрана, расположенного по контуру (рис. 5 а). Влияние экранов на указанные напряжения в нижней части контура (рис. 5 б) не существенно, за исключением экрана по контуру выработки – наблюдается их снижение на 6%. В боках выработки (рис. 5 в) П-

образный экран приводит к увеличению напряжений σ_r на 8%, влияние плоского или экрана, расположенного по всему контуру, незначительно.

В грунтах с $E_0 = 300 \text{ МПа}$ экран приводит к снижению напряжений σ_r в своде: на 20% при плоском; на 33% – при П-образном; на 29% – по контуру выработки (рис. 5 г). Радиальные напряжения в грунте в нижней и боковой частях выработки (рис. 5 д, е) весьма незначительны.

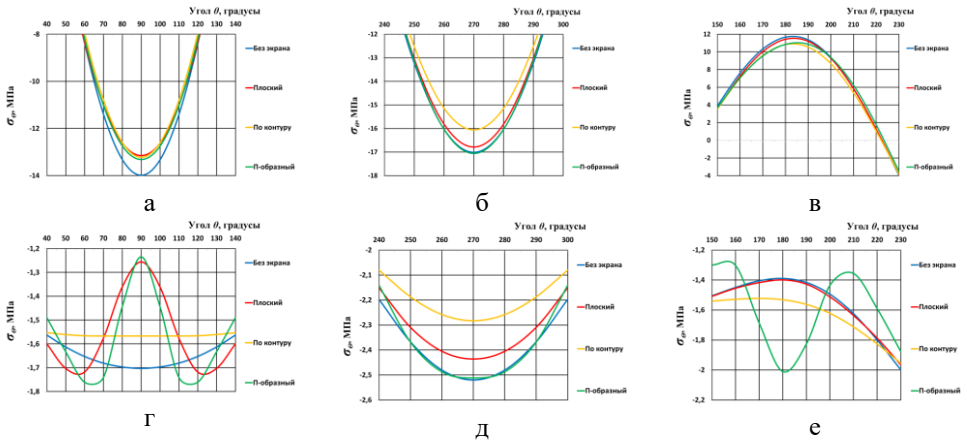


Рисунок 6 – Эпюры напряжений σ_θ на наружном контуре обделки:

а, б, в – при $E_0 = 12 \text{ МПа}$; г, д, е – при $E_0 = 300 \text{ МПа}$

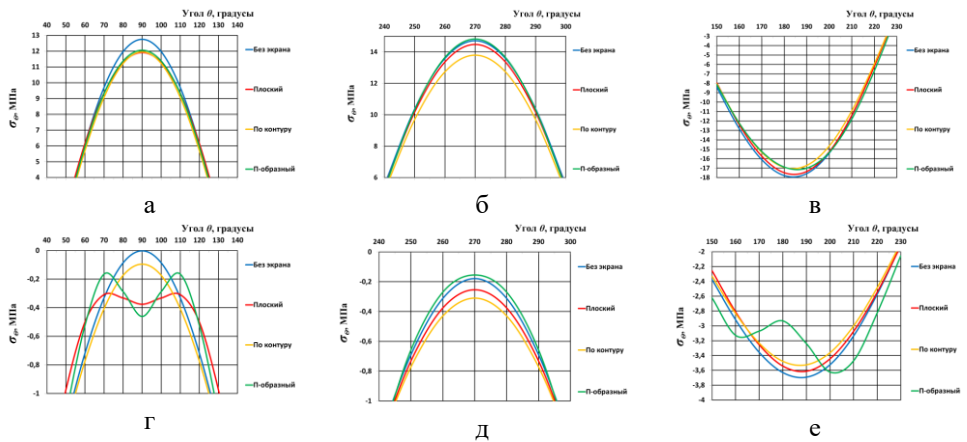


Рисунок 7 – Эпюры напряжений σ_θ на внутреннем контуре обделки:

а, б, в – при $E_0 = 12 \text{ МПа}$; г, д, е – при $E_0 = 300 \text{ МПа}$

На наружном контуре обделки при $E_0 = 12 \text{ МПа}$ снижение максимальных растягивающих напряжений в боках (рис. 6 в) составляет около 7% при применении экранов П-образного или по контуру выработки. Снижение сжимающих напряжений в своде (рис. 6 а) для всех форм экранов и в лотке (рис. 6 б) при использовании экрана по контуру не превышает 6%. На внутреннем контуре обделки снижение максимальных растягивающих напряжений в своде (рис. 7 а) составляет до 6,5% при применении всех экранов; в лотке (рис. 7 б) влияние плоского и П-образного экранов на напряжения весьма незначительно (до 1,6%), экран по контуру снижает напряжения на 6,2%. Снижение максимальных сжимающих напряжений σ_θ , возникающих в боках обделки (рис. 7 г), при наличии плоского экрана не превышает 1,7%; П-образного и по контуру выработки – до 5%.

При $E_0 = 300 \text{ МПа}$ (рис. 6 г, д, е и рис. 7 г, д, е) в обделке тоннеля возникают только сжимающие нормальные тангенциальные напряжения σ_θ . Установлено существенное различие во влиянии защитных экранов на напряжения на наружном и внутреннем контурах в своде и боках сечения обделки: на наружном контуре в своде экраны вызывают снижение напряжений σ_θ от 8% при экране по контуру до 28% при плоском или П-образном, на внутреннем – увеличение на 44% при П-образном, на 10% - по контуру, плоский экран влияния практически не оказывает. В лотке снижение напряжений σ_θ составляет 9,5% при экране по контуру, влияние плоского или П-образного не превышает 3%.

В своде обделки (рис. 7 г) применение экранов приводит к увеличению напряжений σ_θ по сравнению с вариантом тоннеля без его использования: до $-0,1 \text{ МПа}$ при экране, расположенном по всему контуру выработки, до $-0,38 \text{ МПа}$ при плоском и до $-0,46 \text{ МПа}$ при П-образном. При использовании экранов по контуру или П-образного в сечениях при $\theta = 70^\circ$ и $\theta = 100^\circ$ возникают локальные экстремумы – установлено уменьшение напряжений до $-0,17 \text{ МПа}$ для П-образного и до $-0,31 \text{ МПа}$ для плоского. В лотке обделки тоннеля П-образный экран снижает напряжения на 13,4%, плоский экран увеличивает напряжения σ_θ в 1,4 раза, по контуру выработки – в 1,7 по сравнению с отсутствием опережающего крепления.

Таким образом, применение защитных экранов приводит, как правило, к снижению величин нормальных тангенциальных напряжений в массиве грунта на поверхности незакрепленной выработки – растягивающих практически в 1,5 раза, сжимающих – на 17% по сравнению с соответствующими

напряжениями, возникающими на контуре выработки, пройденной без опережающего крепления. Установлено, что с ростом коэффициента бокового давления в массиве грунта растягивающие нормальные тангенциальные напряжения в грунте на поверхности выработки исчезают, максимальные значения сжимающих напряжений существенно уменьшаются. Уменьшение расстояния от труб защитного экрана до контура выработки, например, при наклонном расположении труб экрана к продольной оси выработки, в ряде случаев может приводить к увеличению максимальных значений как растягивающих, так и сжимающих нормальных тангенциальных напряжений. Влияние защитного экрана проявляется в большей мере в относительно слабых грунтах в точках контура выработки или обделки тоннеля, расположенных на минимальных расстояниях от труб экрана. Влияние экрана, расположенного в верхней (сводовой) части выработки, практически не влияет на напряженное состояние грунта или обделки тоннеля вблизи лотка. На контуре выработки в прочных грунтах радиальные напряжения принимают более высокие значения как для тоннеля, пройденного без экрана, так и для тоннеля, сооруженного под его защитой, по сравнению с тоннелем, сооруженным в относительно слабых грунтах. Нормальные тангенциальные напряжения, отвечающие за деформации растяжения и сжатия, в более прочных грунтах принимают меньшие значения, растягивающие напряжения зачастую исчезают. Применение плоского защитного экрана приводит к снижению абсолютных значений напряжений в массиве грунта и в обделке вблизи свода тоннеля. В грунтах с более высокими прочностными характеристиками влияние защитного экрана весьма незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научно-квалификационной работе выполнено 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.

Основные научные и практические результаты научно-квалификационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель взаимодействия массива грунта, труб защитного экрана и обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных закрытым способом вблизи наклонной земной поверхно-

сти, базирующаяся на теоретических положениях геомеханики и механики подземных сооружений.

2. Выполнена постановка соответствующей задачи геомеханики и с применением математического аппарата ТФКП получено аналитическое решение соответствующей задачи теории. Достоверность полученного решения подтверждается высокой точностью удовлетворения граничных условий, погрешность расчетов не превышает 5%.

3. Разработан аналитический метод расчета обделок тоннелей, сооруженных под защитой экрана из труб, при действии собственного веса грунта, базирующийся на полученном новом решении задачи теории упругости.

4. Составлены алгоритм и компьютерная программа, позволяющие производить многовариантные расчеты конструкций подземных сооружений по определению их напряженного состояния в различных геомеханических ситуациях.

5. Установлено удовлетворительное согласование результатов расчетов с данными, полученными другими аналитическими методами для частных случаев.

6. Уточнены известные и установлены новые закономерности формирования напряженного состояния массива грунта и обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитных экранов из труб, при различных сочетаниях основных влияющих факторов.

Основные положения научно-квалификационной работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Анциферов С.В., **Трещева О.В.** Математическое моделирование взаимодействия массива грунта и обделок тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых с применением защитного экрана из труб// Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 547 – 562.

2. Анциферов С.В., **Трещева О.В.** Исследование напряженного состояния массива грунта и обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитного экрана из труб// Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2024. – № 2. – С. 506 – 519.

в изданиях РИНЦ:

3. Анциферов С.В., **Трещева О.В.**, Феклин А.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния геомеханической системы "массив грунта – обделка тоннеля – защитный экран из труб". В сб.: Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений. Труды VI Международной конференции// Екатеринбург. УГ-ГУ. – 2019. – С. 68 – 74.

4. Анциферов С.В., **Трещева О.В.**, Феклин А.А. Напряженно-деформированное состояние системы "массив грунта – обделка тоннеля – защитный экран из труб"// Chronos: естественные и технические науки. – 2019. № 4 (26). – С. 15 – 21.

5. Анциферов С.В., **Трещева О.В.**, Феклин А.А., Кудрявцев М.А. Влияние защитного экрана из труб на напряженное состояние обделок тоннелей// В сб. 56-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием. Сб. докладов. Ч. 1. Тула, ТулГУ. – 2020. – С. 186 – 195.

6. Анциферов С.В., **Трещева О.В.**, Феклин А.А. Математическое моделирование напряженного состояния обделки тоннеля, сооружаемого с применением защитного экрана // В сб.: Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы 16-ой Междунар. конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, ТулГУ. – 2020. – С. 240 – 247.

7. **Трещева О.В.** Математическое моделирование взаимодействия обделки тоннеля, сооружаемого с применением защитного экрана, и массива грунта. В сб.: Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи. Тез. докл. II Межрегиональной научной конференции. Тула, ТулГУ. – 2020. – С. 51 – 52.

8. Анциферов С.В., Деев П.В., **Трещева О.В.** Разработка математической модели взаимодействия обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитного экрана из труб, с массивом грунта// В сб.: «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». Материалы 18-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. – Тула: изд-во ТулГУ. – 2022. – С. 109 – 116.

9. Анциферов С.В., **Трещева О.В.** Разработка математической модели формирования напряженного состояния массива грунта и обделки тоннеля, сооружаемого с применением защитного экрана из труб// В сб.: 59-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всерос. участием. Ч. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2023. – С. 214 – 220.

10. **Трещева О.В.** К расчету обделок тоннелей мелкого заложения, сооружаемых под защитой экрана из труб// В сб.: Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы. II Всероссийская молодежная научно-практическая конференция. Оренбург. – 2023. – С. 362 – 366.

11. Анциферов С.В., **Трещева О.В.** О влиянии защитного экрана из труб на напряженное состояние массива грунта вокруг выработки мелкого заложения// Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск, ИГД СО РАН. – 2023. Т. 10. № 3. – С. 3 – 10.

12. **Трещева О.В.**, Медведева М.М. Влияние формы защитного экрана из труб на напряженное состояние массива грунта на поверхности выработки мелкого заложения // В сборнике: Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи. Тезисы докладов Юбилейной 5-ой межрегиональной научной сессии молодых исследователей. – Тула: ТулГУ. – 2023. – С. 235 – 237.

13. **Трещева О.В.**, Трещева А.А., Анциферов С.В. Математическое моделирование взаимодействия обделки тоннеля, пройденного под защитой экрана из труб, с массивом грунта: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых // Молодежная наука в развитии регионов. Березники, 2023./ Пермь: Изд-во ПНИПУ. – 2023. – Т. 1. – С. 309 – 314.

14. **Трещева О.В.**, Анциферов С.В. Аналитический метод расчета обделок тоннелей, сооружаемых с применением защитного экрана из труб// Молодежная наука в развитии регионов. Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых (Березники, 24 апреля 2024 г.). – Пермь: Изд-во ПНИПУ. – 2024. – С. 295 – 299.

15. **Трещева О.В.**, Анциферов С.В. Напряженное состояние выработки, пройденной под защитой экрана из труб// В сб.: 60-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием. – Тула. – 2024. – Часть 2. – С. 236 – 241.

в прочих изданиях:

16. **Трещева О.В.**, Медведева М.М., Трещева А.А. О влиянии защитного экрана из труб на напряженное состояние обделок тоннелей, сооружаемых в слабых грунтах// 12 Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов "Опыт прошлого – взгляд в будущее". – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2022. – С. 93 – 97.

17. **Трещева О.В.**, Трещева А.А., Газаров А.Р., Анциферов С.В. Математическое моделирование взаимодействия массива грунта и обделок тоннелей, сооружаемых под защитой экрана из труб// Сб. научных трудов всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Строительство и техносферная безопасность», г. Антрацит, 15-17 февраля 2024 г. – Луганск. – 2024. – С. 99 – 103.

18. **Трещева О.В.**, Анциферов С.В., Медведева М.М. Исследование взаимодействия грунта и обделки тоннеля, сооруженного под защитой экрана из труб//Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: Сб. 25-ой Международной научно-технической конференции. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2024. – С. 146 – 154.