

На правах рукописи

Нгуен Тай Тиен



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ОБДЕЛКИ ПРОТЯЖЕННЫХ
ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ КРИВОЛИНЕЙНОГО
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

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

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

Санкт–Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Карасев Максим Анатольевич

Официальные оппоненты:

Панкратенко Александр Никитович,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра строительства подземных сооружений и горных предприятий, заведующий кафедрой;

Коньков Александр Николаевич
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Тоннели и метрополитены», доцент.

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

Защита диссертации состоится 21 июня 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наметилась тенденция к увеличению размеров поперечного сечения тоннелей. Круговая форма поперечного сечения тоннеля является наиболее распространённой в системе городского подземного метрополитена. Однако, тоннели некругового очертания в сравнении с круговыми имеют несколько преимуществ: коэффициент использования сечения повышается; объем разрабатываемого грунта снижается. Некруговая форма сечения характеризуется также наличием углов, в которых наблюдается концентрация напряжений. При традиционно применяемой технологии строительства тоннелей некругового очертания для их сооружения требуется больше ресурсов, чем для тоннелей кругового очертания. Однако, в последнее время в практику строительства тоннелей внедряются тоннелепроходческие механизированные комплексы (ТПМК), обеспечивающие возможность сооружения произвольной формы поперечного сечения в различных геологических условиях. Несомненно, тоннели криволинейного очертания получат широкое распространение в будущем. Несмотря на это, в настоящее время исследования по выбору оптимальных параметров таких тоннелей немногочисленны и необобщены.

Таким образом, разработка методического подхода к оценке влияния параметров формы поперечного сечения подземного сооружения криволинейного очертания, учитывающего технологические возможности существующего проходческого оборудования, позволит рассчитать напряженное состояние обделки при заданном диапазоне изменения параметров сечения тоннеля, снизить концентрации напряжений в угловых участках и материалоемкость обделки, повысить коэффициент использования сечения и безопасность работ, что, безусловно, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899). Ее направленность соответствует Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года

(Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части технологий поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту научной специальности по 1, 4 и 5 пунктам.

Цель работы заключается в разработке теоретических положений прогноза напряженного состояния обделки тоннелей криволинейного поперечного сечения при заданном диапазоне изменения параметров сечения тоннелей, располагаемых в различных геологических условиях, что позволит снизить объем строительных работ, материалоемкость обделки и повысить эксплуатационную надежность.

Идея работы: обоснование формы тоннеля криволинейного очертания выполняется на основании введения в расчетную модель контролирующих геометрических параметров сечения тоннеля, и поиска оптимального сочетания их значений по фактору оценки напряженного состояния обделки с учетом особенностей формирования нагрузки и отпора породного массива.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ предыдущих исследований по заявленной тематике.
2. Развитие теоретических положений метода гиперстатических реакций опор (Hyperstatic Reaction, HRM) для прогноза напряженно-деформированного состояния массива вокруг тоннелей арочного с обратным сводом и квази-прямоугольного поперечного сечения.
3. Разработка алгоритма оценки влияния параметров формы поперечного сечения тоннеля криволинейного очертания на напряженное состояние обделки.
4. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния обделок тоннелей арочного с обратным сводом и квази-прямоугольного поперечных сечений при различных инженерно-геологических и геомеханических условиях.
5. Исследование влияния контролирующих геометрических параметров сечения тоннелей криволинейного очертания на

характер формирования интегральных показателей напряженного состояния обделки.

6. Разработка практических рекомендаций по выбору оптимальных параметров сечения тоннелей в зависимости от условий их строительства.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является разработка новых теоретических положений расчета напряженного состояния обделок тоннелей криволинейного очертания на основании применения многовариантного анализа, учитывающего изменчивость механических характеристик грунтового массива и контролирующих параметров расчетной модели.

Объект исследования: тоннель криволинейного поперечного сечения, строительство которого осуществляется в слабых грунтах.

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм оценки влияния параметров тоннелей криволинейного очертания на напряженное состояние обделки, основанный на проведении многофакторного анализа при различных значениях предварительно выбранных контролирующих параметров расчетной модели.

2. Выполнено развитие методики расчета напряженного состояния обделки для тоннелей арочного с обратным сводом и квази-прямоугольных поперечных сечений с учетом нелинейного характера изменения величин отпора породного массива.

3. Установлены новые закономерности формирования напряженного состояния обделки и предложены аналитические выражения для определения его интегральных показателей для широкого диапазона инженерно-геологических и геомеханических условий.

4. Установлены граничные значения контролирующих параметров формы криволинейного поперечного сечения тоннелей, при достижении которых наблюдается резкое изменение напряженного состояния обделки.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложены новые зависимости для учета нелинейного деформирования грунтового массива при расчете величины его отпора смещению обделки тоннеля.

2. Разработаны алгоритмы многовариантного итерационного расчета напряженного состояния обделки для тоннелей арочного с обратным сводом и квази-прямоугольного поперечных сечений.

3. Получены закономерности формирования напряженного состояния обделки тоннеля для типовых условий строительства, форм поперечного сечения тоннелей и величин контролирующих параметров формы сечения тоннеля.

4. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс (акт внедрения от 15.12.2021) Санкт-Петербургского горного университета для специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» специализация «Строительство подземных сооружений» в рамках дисциплин «Технология строительства подземных сооружений специальными способами», «Подземные сооружения и конструкции», «Конструкции и расчет крепей и обделок». В рамках практических занятий разработано новое расчетно-графическое задание по расчету напряженного состояния обделок методом HRM.

Методология и методы исследований. При выполнении научных исследований применены обоснованные общепринятые и новые методы математического описания механических процессов деформирования слабых грунтов; решение задач прогноза геомеханических процессов в окрестности тоннелей выполнено с применением численных методов анализа.

Основные защищаемые положения:

1. Расчет напряженного состояния обделки тоннелей квази-прямоугольного и арочного с обратным сводом поперечных сечений допускается выполнять на основании метода гиперстатических реакций, учитывающего формирование нелинейного отпора грунтового массива при взаимодействии с обделкой, а также характер формирования нагрузки на крепь для тоннелей различного очертания.

2. Оценка влияния параметров криволинейного сечения тоннелей должна выполняться на основании многовариантного итерационного расчета, регулирующими параметрами которого являются уравнения кривых, определяющих итоговую форму криволинейного сечения.

3. Оценку влияния контролирующих параметров формы сечения на напряженное состояние обделки тоннелей криволинейного очертания необходимо выполнять с учетом естественного напряженного состояния породного массива, а также его деформационно-прочностных свойств.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается согласованностью результатов расчетов, выполненных на основании разработанного решения в программном комплексе Matlab, реализующего теоретические положения, представленные в диссертации, с данными расчетов в рамках метода конечных элементов, выполненных в программном комплексе Plaxis, а также данными других исследователей.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях в 2018-2021 г.г.:

1. Международная конференция по геотехнике для устойчивого развития инфраструктуры (GEOTEC HANOI 2019), г. Ханой, Вьетнам, 2019 г.

2. 12-я Российско-Германская сырьевая конференция, семинар молодых ученых, «Современные технологии исследования, изучения и разработки минеральных ресурсов» Санкт-Петербургский горный университет, г. СПб, 2019 г.

3. III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», Санкт-Петербургский горный университет, г. СПб, 2020 г.

4. XVI Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербургский горный университет, г. СПб, 2020 г.

5. XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербургский горный университет, г. СПб, 2021 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования и нормативных методик, в анализе натуральных данных деформирования

грунта вокруг тоннелей, в разработке расчетных конечно-элементных моделей, в проведении численных экспериментов и интерпретации полученных результатов.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus/Web of Science). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 131 наименование. Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 137 рисунков и 31 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ факторов, влияющих на выбор формы поперечного сечения подземных сооружений. Выполнено обобщение типов нагрузок и воздействий, действующих на подземные сооружения, а также выполнен анализ методов расчета обделок подземных сооружений. Уделено внимание вопросам расчета и проектирования подземных сооружений криволинейного поперечного очертания.

Во второй главе представлены теоретические исследования, выполнена разработка программы многовариантных расчетов напряженного состояния обделки тоннелей криволинейного поперечного сечения в рамках метода HRM. Представлена апробация разработанного метода расчета и сравнение с результатами, полученными при выполнении численного моделирования в программном комплексе Plaxis 2D.

В третьей главе представлены результаты расчетов влияния различных факторов (глубина заложения, форма поперечного сечения тоннеля, геологические условия и т.д.) на напряженное состояние обделки тоннеля. Рассмотрены две типовые формы поперечного сечения, соответствующие выбранному габариту приближения строений двухпутного железнодорожного тоннеля по техническим стандартам Вьетнама. Выполнен анализ влияния параметров поперечного сечения тоннелей выбранных форм на формирование напряженного состояния обделки.

В четвертой главе представлены результаты прогноза оседания земной поверхности при строительстве тоннелей квази-прямоугольной формы в инженерно-геологических условиях г. Ханой. Рассмотрены вопросы развития сети метрополитена, а также представлены особенности геологического строения грунтового массива. Выполнено сравнение характера развития деформаций земной поверхности при строительстве двух однопутных тоннелей кругового очертания и одного двухпутного тоннеля криволинейного очертания. Расчеты выполнены в программном комплексе Plaxis2D, в качестве модели деформирования среды принята модель геоматериала Hardening soil.

В заключении приведены основные выводы и рекомендации, полученные по результатам проведенных исследований.

В приложении к автореферату представлены основные результаты численных расчетов.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Расчет напряженного состояния обделки тоннелей квази-прямоугольного и арочного с обратным сводом поперечных сечений допускается выполнять на основании метода гиперстатических реакций, учитывающего формирование нелинейного отпора грунтового массива при взаимодействии с обделкой, а также характер формирования нагрузки на крепь для тоннелей различного очертания.

Метод гиперстатических реакции (HRM) относится к классу численных методов анализа, в которых напряженное состояние обделки подземных сооружений, представляемой в виде

одномерных стержневых элементов, может быть определено в виде набора интегральных показателей напряженного состояния. Взаимодействие между обделкой подземного сооружения и окружающим породным массивом формируется через набор пружин, ориентированных в нормальном и касательном направлениях, которые соединяются со стержневыми элементами через узловые точки (рисунок 1). Механическое поведение породного массива в допредельной стадии деформирования моделируется на основании линейного закона деформирования, в то время как достижение предельного состояния сопровождается идеально-пластическим течением.

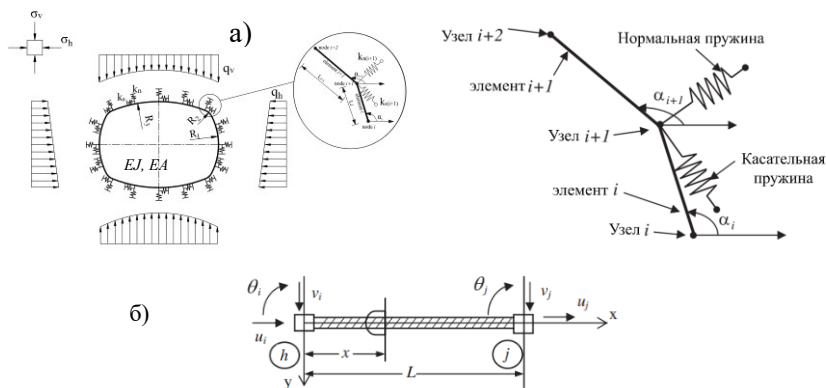


Рисунок 1 – Расчётная схема обделки тоннеля для гиперстатического метода (а) и расчетная схема элемента балочного типа с привязкой к локальным декартовым координатам (б): σ_v – вертикальная нагрузка, σ_h – горизонтальная нагрузка; k_n – нормальная жесткость пружин; k_s – касательная жесткость пружин; R_i – радиус части i тоннеля; EJ и EA – изгибная и нормальная жесткость крепи. h – начальный узел; j – конечный узел; u – продольное смещение; v – поперечное смещение; θ – вращение; x и y – локальные декартовы координаты

Для учета нелинейного деформирования грунтового массива в процессе его совместного деформирования с обделкой тоннеля связь между отпором грунта p и смещением крепи δ реализуется через следующую нелинейную (гиперболическую) взаимосвязь (формула 1):

$$p = p_{lim} \left(1 - \frac{p_{lim}}{p_{lim} + \eta_0 \delta} \right), \quad (1)$$

где p_{lim} – максимальная величина отпора грунта; η_0 – начальная жесткость грунта (для значений δ , близких к 0).

Для тоннеля некругового очертания в упругом грунте при осесимметричном нагружении величина отпора грунта зависит от радиуса i -ой части тоннеля и параметров, определяющих нелинейное деформирование грунта. В этом случае для определения начальной нормальной и касательной жесткости грунта может применяться следующая эмпирическая формула (формулы 2,3):

$$\eta_n = \beta \frac{1}{1 + \nu_s} \frac{E_s}{R_i}; \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{1}{3} \eta_n, \quad (3)$$

где ν_s – коэффициент Пуассона грунта; E_s – модуль Юнга грунта; β – безразмерный коэффициент. R_i – радиус i -ой части тоннеля.

Величину максимального нормального отпора грунта $p_{n,lim}$ можно оценить с учетом величин сцепления и угла внутреннего трения грунта (формулы 4,5):

$$p_{n,lim} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \Delta \sigma_{conf}; \quad (4)$$

$$\Delta \sigma_{conf} = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \cdot \frac{\nu_s}{1 - \nu_s}, \quad (5)$$

где $\Delta \sigma_{conf}$ – всестороннее давление по периметру крепи.

Значение максимального сдвигового отпора грунта $p_{s,lim}$ (формула 6)

$$p_{s,lim} = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (6)$$

где σ_v и σ_h – вертикальное и горизонтальное давление грунта соответственно.

Жесткости $k_{n,i}$ и $k_{s,i}$ каждой пружины определяются как (формулы 7, 8):

$$k_{n,i} = \eta_{n,i}^* \left[\frac{(L_{i-1} + L_i)}{2} \cdot 1 \right] = \frac{p_{\text{lim}}}{\delta_{n,i}} \left(1 - \frac{p_{n,\text{lim}}}{p_{n,\text{lim}} + \eta_{n,0} \cdot \delta_{n,i}} \right) \cdot \frac{(L_{i-1} + L_i)}{2}; \quad (7)$$

$$k_{s,i} = \eta_{s,i}^* \left[\frac{(L_{i-1} + L_i)}{2} \cdot 1 \right] = \frac{p_{s,\text{lim}}}{\delta_{s,i}} \left(1 - \frac{p_{s,\text{lim}}}{p_{s,\text{lim}} + \eta_{s,0} \cdot \delta_{s,i}} \right) \cdot \frac{(L_{i-1} + L_i)}{2}. \quad (8)$$

Активная вертикальная нагрузка σ_v может быть оценена согласно теории Терцаги. Величина нагрузки помимо прочих факторов (глубина заложения, механические характеристики среды, напряженное состояние породного массива) зависит и от формы поперечного сечения тоннеля, задаваемой через эквивалентную его ширину B_1 (рисунок 2).

Получены формулы для расчета эквивалентной ширины тоннеля B_1 квази-прямоугольного поперечного сечения (формулы 9,10):

$$B_1 = \frac{B}{2} + H_t \cot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right), \quad (9)$$

и арочной формы с обратным сводом:

$$B_1 = R_c \cot \left(\frac{\left(\frac{\pi}{4} \right) + \left(\frac{\phi}{2} \right)}{2} \right), \quad (10)$$

где R_c – полуширина тоннеля, B и H_t – ширина и высота подземного сооружения.

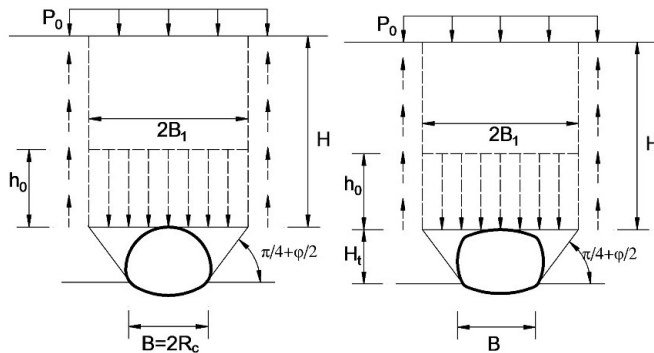


Рисунок 2 – Расчетная схема для расчета вертикальной нагрузки на обделку

Одним из основных преимуществ метода HRM является то, что он является не требовательным к вычислительным ресурсам. Следовательно, его можно расширить для выполнения многовариантных расчетов, требующих большого количества вычислений.

Оценка эффективности метода HRM для расчета напряженного состояния обделки квази-прямоугольных, арочных с обратным сводом и круговых тоннелей выполняется на основании сравнения с расчетами, выполненными методом конечных элементов в Plaxis2D. Входные параметры модели сведены в таблицы 1, 2 и представлены на рисунке 3. Результаты (таблица 3 и рисунок 4) показывают, что для всех трех форм модель HRM имеет хорошую качественную и количественную сходимость значений изгибающих моментов, нормальных и перерезывающих сил с результатами численного моделирования. Видно, что разница между результатами, полученными на основе численных моделей HRM и Plaxis2D невелика (менее 10 %).

2. Оценка влияния параметров криволинейного сечения тоннелей должна выполняться на основании многовариантного итерационного расчета, регулирующими параметрами которого являются уравнения кривых, определяющих итоговую форму криволинейного сечения.

Алгоритм многовариантного расчета (рисунки 5, 6) напряженного состояния обделки тоннеля квази-прямоугольной формы заключается в разбивке сечения тоннеля на отдельные сегменты, параметры которых (положение центра сегмента и радиус) контролируются через опорные точки. В первую очередь определяется фиксированная площадь сечения тоннеля, определяемая по габариту приближения строений. Внутренние поверхности обделки тоннеля квази-прямоугольной формы должны как минимум перекрывать фиксированную зону. Принимая во внимание это требование, предложен ряд математических функций для оценки влияния контролирующих параметров формы сечения тоннеля на внутренние силы, возникающие в обделке тоннеля.

Адаптация метода HRM для тоннеля криволинейного поперечного сечения выполнена в программном комплексе Matlab.

Алгоритм многовариантного расчета, определяющий взаимосвязь между контролирующими параметрами формы поперечного сечения тоннеля (рисунок 5) и его геометрией, также является элементом общего программного кода для выполнения расчета напряженного состояния обделки.

Результаты расчетов согласно разработанному алгоритму (рисунок 8), позволили установить степень влияния каждого из контролирующих параметров формы сечения на напряженное состояние обделки арочной формы с обратным сводом. Видно, что изменение координаты y_3 оказывает более существенное влияние на радиус R_1 , чем на радиус R_3 (рисунок 7). Максимальные изгибающие моменты (M_{max}) во всех случаях наблюдаются на участке обратного свода тоннеля арочной формы с радиусом R_1 .

Анализ представленных данных позволяет заключить, что:

- увеличение радиуса обратного свода R_1 вызывает увеличение величин максимальных изгибающих моментов. Влияние радиуса R_1 на максимальные изгибающие моменты значительно;

- чем больше радиус обратного свода R_1 , тем больше максимальные поперечные силы N . Изменение радиуса R_1 оказывает значительно меньшее влияние на распределение поперечных сил, чем на распределение максимальных изгибающих моментов.

На основании обобщения результатов расчетов получено уравнение регрессии, связывающее радиус R_1 и максимальный изгибающий момент M_{max} в обделке (формула 11):

$$M_{max} = 0,5777 \ln(R_1) - 0,0385. \quad (11)$$

Анализ результатов оценки влияния контролирующих параметров (радиусов) формы сечения на напряженно-деформированное состояние обделки тоннеля квази-прямоугольной формы поперечного сечения позволил установить, что радиус свода R_2 оказывает существенное влияние на величину максимального изгибающего момента в обделке. Между тем, влияние радиусов R_4 и R_5 на величину максимального изгибающего момента пренебрежимо мало.

На рисунке 9 видно, что с увеличением радиуса свода максимальный изгибающий момент увеличивается, а максимальная продольная сила и максимальная деформация изменяются незначительно. Можно сделать вывод, что форма тоннеля сильно влияет на изгибающий момент и незначительно влияет на продольную силу в обделке тоннеля.

На основании обобщения результатов расчетов получено уравнение зависимости максимального изгибающего момента от геометрических параметров формы тоннеля (формула 12):

$$M_{max} = 0,61039 - 0,00059 \exp(R_5) + 0,28773 \ln(R_2) - 0,02505 \ln(R_4). \quad (12)$$

3. Оценку влияния контролирующих параметров формы сечения на напряженное состояние обделки тоннелей криволинейного очертания необходимо выполнять с учетом естественного напряженного состояния породного массива, а также его деформационно-прочностных свойств.

Обобщение результатов расчетов напряженного состояния обделки тоннеля *арочного поперечного сечения с обратным сводом* показало, что для принятых значений деформации грунта увеличение радиуса обратного свода R_1 вызывает увеличение величин максимальных изгибающих моментов, продольных сил и нормальных смещений (рисунок 10). Влияние радиуса R_1 на максимальные изгибающие моменты значительно. При радиусе R_1 менее 10 м, увеличение радиуса R_1 значительно повышает максимальные изгибающие моменты в обделке тоннеля.

Для исследования влияния коэффициента бокового давления грунта K_0 на поведение обделки тоннеля его значение варьировалось в диапазоне от 0,25 до 1,5 (рисунок 11). Получено, что для любого значения K_0 , меньшего единицы, увеличение радиуса обратного свода R_1 приводит к увеличению максимальных изгибающих моментов и максимальных продольных сил. При $K_0 > 1$ наблюдается увеличение максимальных продольных сил (рисунок 11, б). Увеличение радиуса R_1 приводит к выполаживанию обратного свода, что обуславливает меньшие горизонтальные нагрузки, передаваемые с боковых стенок к обратному своду части и

наоборот. Кроме того, больший радиус обратного свода обеспечивает увеличение активной нагрузки от грунта, и, следовательно, увеличение изгибающих моментов в обратном своде и уменьшение их в боковых стенках (рисунок 11, а). Когда радиус обратного свода R_1 больше, чем указанные выше значения, максимальные изгибающие моменты возникают в центре обратного свода.

Оценка влияния глубины заложения тоннеля на напряженное состояние обделки выполнялась в диапазоне глубин от 1 до $10 B_0$ (B_0 – ширина тоннеля в черне) (рисунок 12). Получено, что с увеличением глубины заложения тоннеля наблюдается увеличение внутренних усилий в обделке от радиуса обратного свода R_1 . При $R_1 < 10$ м его увеличение значительно повышает максимальные изгибающие моменты в обделке. Этот эффект усиливается с глубиной. Для тоннелей, расположенных на глубине менее $2B_0$, влияние радиуса R_1 на величину продольных сил незначительное. Однако с последующим ростом глубины заложения тоннеля формируется все большая взаимосвязь между радиусом R_1 и глубиной заложения тоннеля.

Результаты напряженного состояния обделки тоннелей *квази-прямоугольной формы поперечного сечения* проанализированы для более, чем 956 000 расчетных случаев. При выполнении расчетов варьировались как показатели, характеризующие инженерно-геологические и геомеханические условия строительства и эксплуатации тоннеля, так и параметры, характеризующие форму поперечного сечения тоннеля.

Влияние модуля деформации на напряженное состояние обделки проанализировано на основании рассмотрения 22 778 случаев, модуль деформации изменялся от 5 до 200 МПа. На основании анализа результатов расчетов (рисунок 13) установлено, что при сохранении значения E_s постоянным, увеличение радиуса свода квази-прямоугольного тоннеля R_2 или радиуса обратного свода приводит к увеличению изгибающего момента и продольной силы. Радиус R_2 оказывает значительно большее влияние на максимальное значение изгибающего момента, возникающего в

обделке тоннеля. При изменении радиуса R_2 до величины меньшей 10 м данный эффект усиливается.

Оценка влияния напряженного состояния грунтового массива на напряженное состояние обделки тоннеля выполнялось за счет варьирования показателя K_0 от 0,4 до 1,0. Проанализировано 22 778 расчетных случаев (рисунок 14). Зависимость максимального изгибающего момента от радиуса свода квази-прямоугольных тоннелей показана на рисунке 14. Чем выше значение K_0 , тем больше зависимость изгибающего момента в обделке от радиуса свода R_2 . Интенсивность влияния радиуса на напряженное состояния увеличивается при достижении граничной величины радиуса R_2 , равной 10 м.

Глубина заложения тоннеля в данном исследовании варьировалась от 5,0 до 50,0 м. Проанализировано 19 524 случаев. Увеличение глубины тоннеля H сопровождается формированием больших по величине изгибающих моментов (рисунок 15, а), и больших продольных сил (рисунок 15, б)

На основании выполненных исследований получена новая закономерность изменения величин изгибающего момента от контролирующих параметров (R_2, R_4, R_5), от глубины заложения H , показателя напряженного состояния породного массива K_0 и механических характеристик грунтового массива E_s (формула 13):

$$\begin{aligned} M_{max} = & 1,106078 - 0,267588 \ln E_s - 1,06703K \\ & + 0,030978 \cdot H - 0,01048 \ln R_4 \\ & + 0,00395 \exp R_5 + 0,5010356 \ln R_2. \end{aligned} \quad (13)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – прогноз напряженного состояния обделки тоннелей криволинейного очертания, учитывающий влияние контролирующих параметров сечения тоннеля, инженерно-геологические и инженерно-технические условия. По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Разработаны алгоритмы оценки влияния геометрических параметров поперечного сечения тоннеля на напряженное состояние обделки для тоннелей квази-прямоугольной и арочной с обратным сводом форм поперечных сечений. Выполнена их реализация в виде программного решения, разработанного в среде программирования Matlab.

2. Выполнено расширение области применения метода гиперстатических реакций для расчета напряженного состояния обделок тоннелей квази-прямоугольной и арочной с обратным сводом форм поперечных сечений. Получены новые зависимости для расчета отпора крепи с учетом нелинейного деформирования грунтового массива.

3. Установлено, что геометрические параметры поперечного сечения тоннеля оказывают значительное влияние на внутренние усилия в обделке тоннеля как для тоннелей арочной формы с обратным сводом так и для квази-прямоугольной формы. При этом геометрические параметры оказывают большее влияние на изгибающий момент, но меньшее на величины нормальных сил. В частности, чем больше радиус свода и обратного свода тоннеля, тем больше изгибающий момент. Поэтому при проектировании поперечного сечения тоннеля необходимо оптимизировать радиусы сводов.

4. Установлены закономерности влияния характеристик вмещающего массива – модуля деформации, коэффициента бокового давления, глубины заложения тоннеля и толщины обделки, – на напряженное состояние обделки тоннеля квази-прямоугольной и арочной форм поперечного сечения.

5. Получена зависимость, показывающая взаимосвязь между геометрическими параметрами квази-прямоугольного тоннеля, модулем деформации грунта, коэффициентом бокового давления, глубиной тоннеля с изгибающим моментом.

6. При сравнительном расчете влияния двух параллельных тоннелей кругового очертания и одного тоннеля квази-прямоугольного очертания аналогичной площади поперечного сечения, выявлено, что внутренние усилия в обделке квази-

прямоугольного тоннеля выше, а оседания, вызванные его строительством – ниже.

7. Последующие исследования будут направлены на разработку алгоритмов оптимизации формы поперечного сечения тоннелей арочной и квазипрямоугольной формы с учетом предложенных критериев (по прочности, минимизации/заданной площади поперечного сечения и т.д.), а также на расширение функционала метода HRM для расчета напряженного состояния обделки для более широкого диапазона инженерно-геологических условий и геометрических форм поперечного сечения тоннеля.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Карасев М.А. Прогноз напряжённо-деформированного состояния сборной обделки тоннелей метрополитена криволинейного поперечного сечения / Карасев М.А., **Нгуен Т.Т.**, Вильнер М.А. // Известия Уральского государственного горного университета. - 2019. - Вып. 4(56). - С. 90-97.

2. **Нгуен Т.Т.** Расчет оптимальных геометрических параметров тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания по силовому фактору / **Нгуен Т.Т.**, Карасев М.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). - 2021. - № 6. - С. 59-71. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. **Nguyen T.T.** Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel / **Nguyen T.T.**, Karasev M.A., Vilner M.A // Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Lecture Notes in Civil Engineering. - 2020. - Vol 62. - P. 383-388. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_49

4. Do N.A. Study on the behavior of squared and sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method // Do N.A., Dias D., Zhang Z., Huang X., **Nguyen T.T.**, Pham V.V., Nait-Rabah O. // Transportation Geotechnics. - 2020. - Vol. 22. - P. 1-12. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100321

5. **Nguyen T.T.** Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour / **Nguyen T.T.**, Do N.A., Karasev M.A., Dang V.K., Dias D. // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 174. – Issue 4. – P. 355-371. DOI: 10.1680/jgeen.20.00057

Публикации в прочих изданиях:

6. **Nguyen T.T.** Study of the tunnel lining behavior with the differential cross-sectional shape / **Nguyen T.T.**, Karasev M.A., Vilner M.A // Abstracts book XII Russian-German Raw Materials Forum: Youth Day – 2019. – P. 47-48.

7. **Нгуен Т.Т.** Анализ способов строительства транспортных тоннелей криволинейного очертания // Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции 05-06 марта 2020г. Санкт-Петербургский горный университет. СПб, – 2020. – С. 1592-1598.

8. **Nguyen T.T.** A study of the horseshoe-shaped tunnel / **Nguyen T.T.**, Karasev M.A // XVI international forum-contest of students and young researchers “Topical issues of rational use of natural resources” - Scientific conference abstracts – 2020. – Vol.1 – P. 366-368.

9. **Nguyen T.T.** A procedure for determining the optimal cross-section of sub-rectangular tunnel / **Nguyen T.T.**, Karasev M.A. // Topical issues of rational use of natural resources XVII international forum-contest of students and young researchers. – 2021. – Vol.1 – P. 213-215.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2020666405. Программа для построения криволинейного поперечного сечения тоннеля метрополитена [Текст] / **Нгуен Т.Т.**, Карасев М.А., правообладатель: Санкт-Петербургский горный университет. – № 2020665710; опубли. 09.12.2020, Бюллетень № 12.

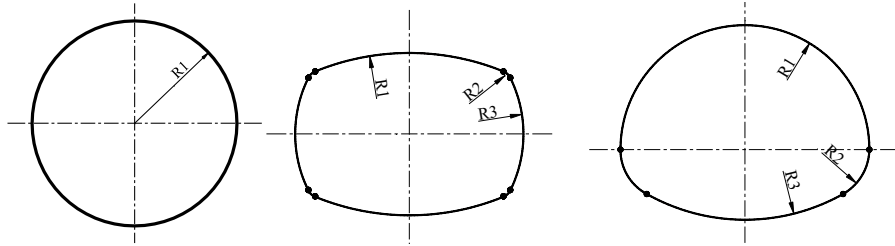


Рисунок 3 – Определение радиуса кривизны в тоннелях круговой, квази-прямоугольной и арочной формы поперечного сечения

Таблица 1 – Геометрические параметры форм поперечного сечения тоннеля

Ширина тоннеля В, м	Высота тоннеля Н, м	В/Н, м	R1, м	R2, м	R3, м	Площадь, м ²	Форма сечения
9,78	9,78	1,000	4,89	-	-	75,122	Круговая
9,70	7,20	1,347	9,95	1,00	5,35	59,786	Квази-прямоугольная
10,48	8,43	1,244	5,24	2,45	8,11	69,651	Арочная

Таблица 2 – Исходные параметры для моделирования

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Свойства вмещающего массива			
Удельный вес	γ_s	18	кН/м ³
Модуль деформации	E_s	3,6	МПа
Коэффициент поперечной деформации	ν_s	0,495	-
Эффективный угол внутреннего трения	φ	16,5	град.
Эффективное сцепление	c	0,0256	МПа
Коэффициент бокового давления грунта	K_0	0,6	-
Глубина заложения	H	10	м
Свойства обделки тоннеля			
Тип материала	Упругий; изотропный		
Модуль упругости бетона	E	35.000	МПа
Нормальная жёсткость	EA	17,50	ГН/м
Изгибная жёсткость	EI	364,6	МН/м ² /м
Коэффициент Пуассона	ν	0,15	-
Эквивалентная толщина	m	0,5	м
Удельный вес конструкции	w	12	кН/м/м

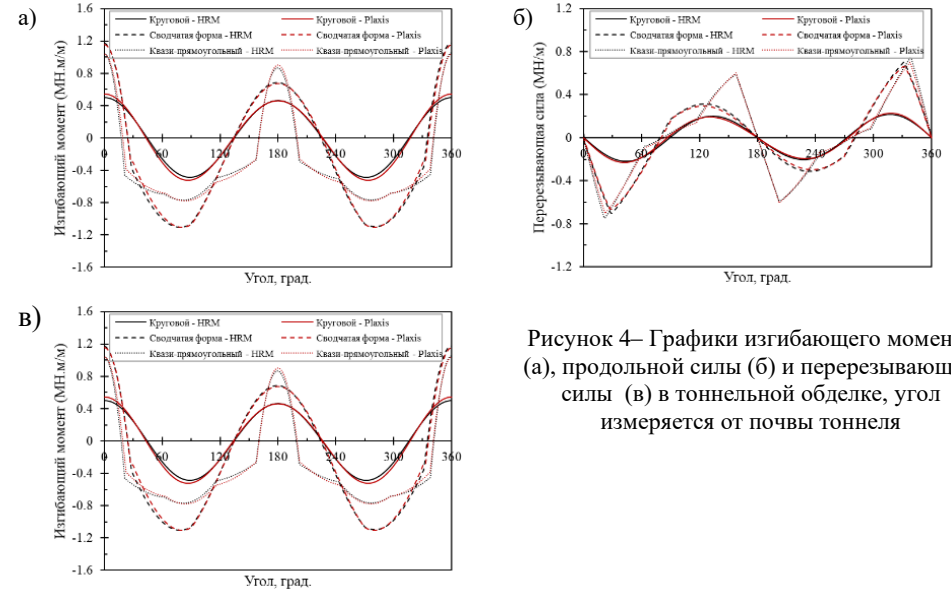


Рисунок 4– Графики изгибающего момента (а), продольной силы (б) и поперечной силы (в) в тоннельной обделке, угол измеряется от почвы тоннеля

Таблица 3 – Сравнение величин усилий, рассчитанных методом HRM и Plaxis 2D

Внутренние усилия		Арочная	Квази-прямоугольная	Круговая
Макс. изгибающие моменты (МН.м/м)	HRM	1,179	1,050	0,500
	Plaxis	1,156	1,038	0,546
Разница макс. изгибающих моментов (%)		2,009	1,152	-8,392
Мин. изгибающие моменты (МН.м/м)	HRM	-1,103	-0,766	-0,484
	Plaxis	-1,106	-0,776	-0,519
Разница мин. изгибающие моменты (%)		-0,26	-1,32	-6,68
Макс. продольные силы (МН/м)	HRM	1,306	1,132	1,228
	Plaxis	1,386	1,196	1,306
Разница макс. продольных сил (%)		-5,80	-5,40	-6,00
Мин. продольные силы (МН/м)	HRM	0,635	0,485	0,737
	Plaxis	0,601	0,456	0,676
Разница мин. продольных сил (%)		5,79	6,42	8,95
Макс. поперечные силы (МН/м)	HRM	0,699	0,744	0,216
	Plaxis	0,663	0,704	0,228
Разница макс. поперечных сил (%)		5,51	5,73	-5,06
Мин. поперечные силы (МН/м)	HRM	-0,700	-0,746	-0,216
	Plaxis	-0,663	-0,704	-0,228
Разница минимальных поперечных сил (%)		5,57	6,42	-5,15

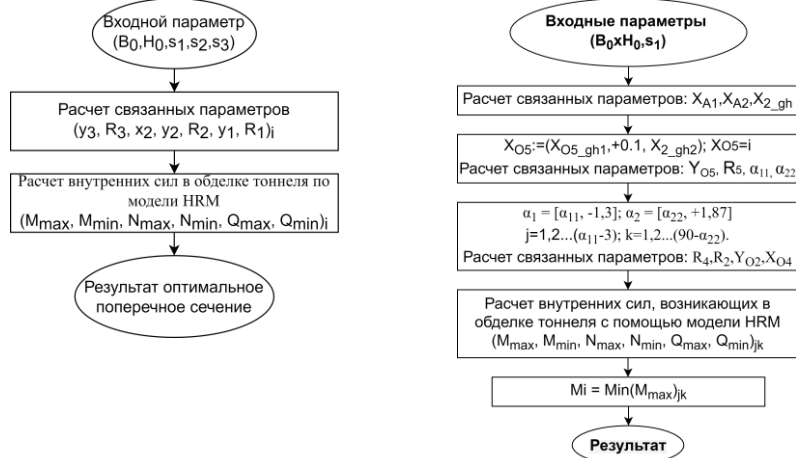


Рисунок 5 – Алгоритм поиска оптимальной формы квази-прямоугольного и арочной тоннеля

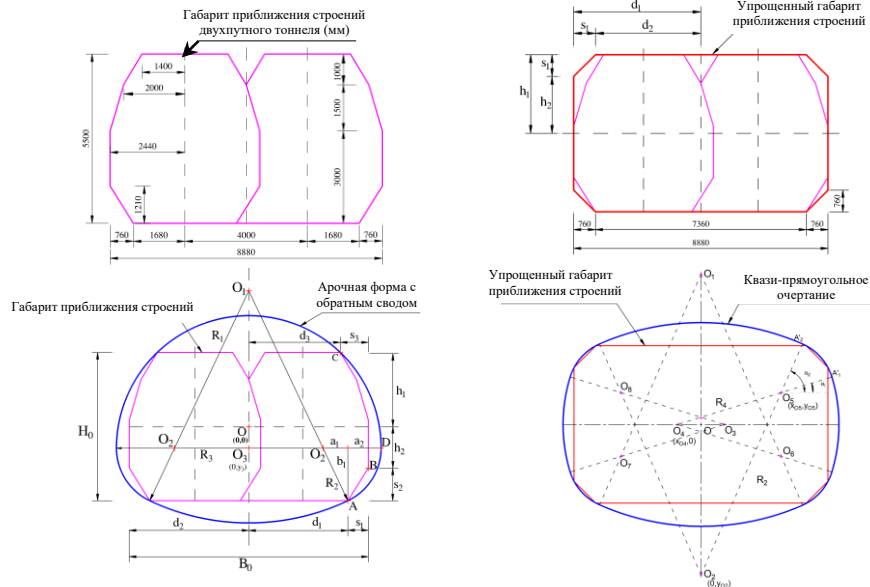


Рисунок 6 – Принципиальная схема определяющих параметров поперечного сечения тоннеля арочной формы (а) и квази-прямоугольной формы (б)

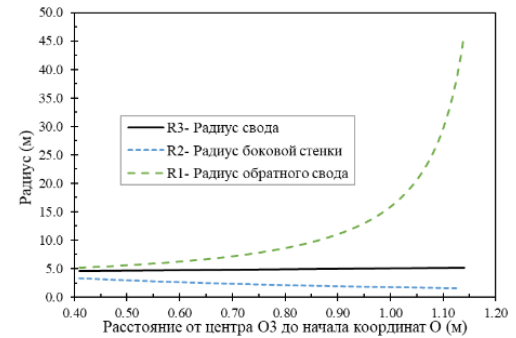


Рисунок 7 – Зависимость радиусов R_1, R_2, R_3 от расположения центра O_3

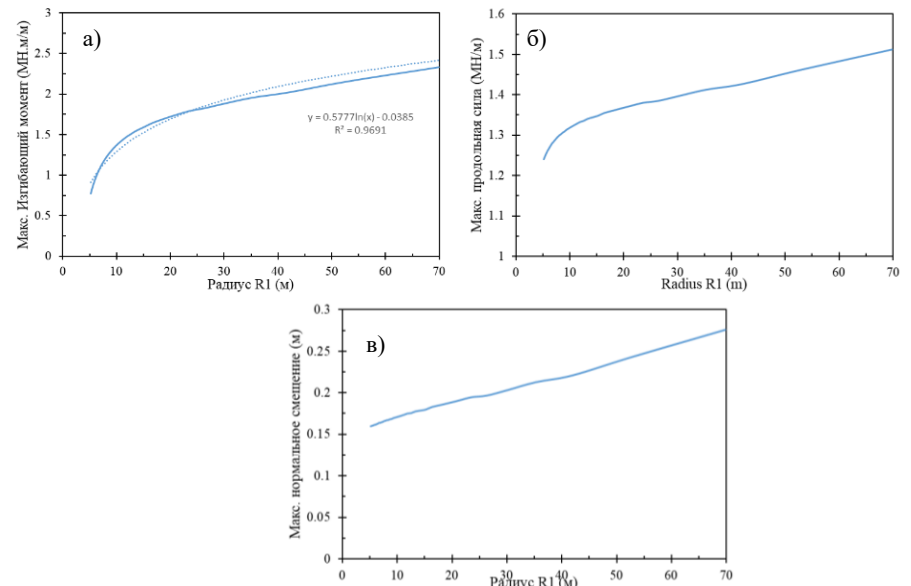


Рисунок 8 – Внутренние силы и нормальные смещения, возникающие в обделке тоннелей: а – макс. изгибающий момент; б – макс. нормальная сила; в – макс. нормальное смещение

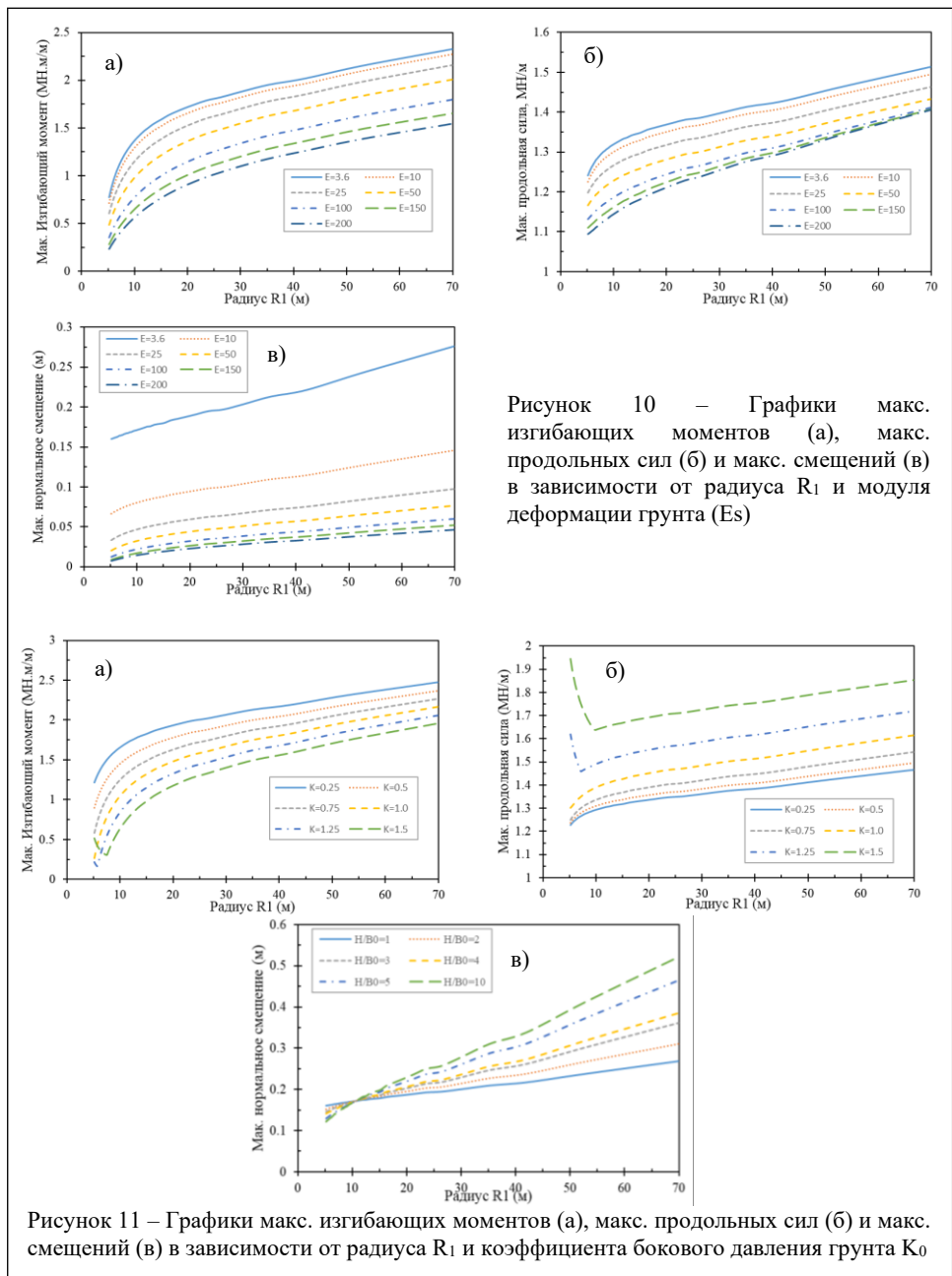
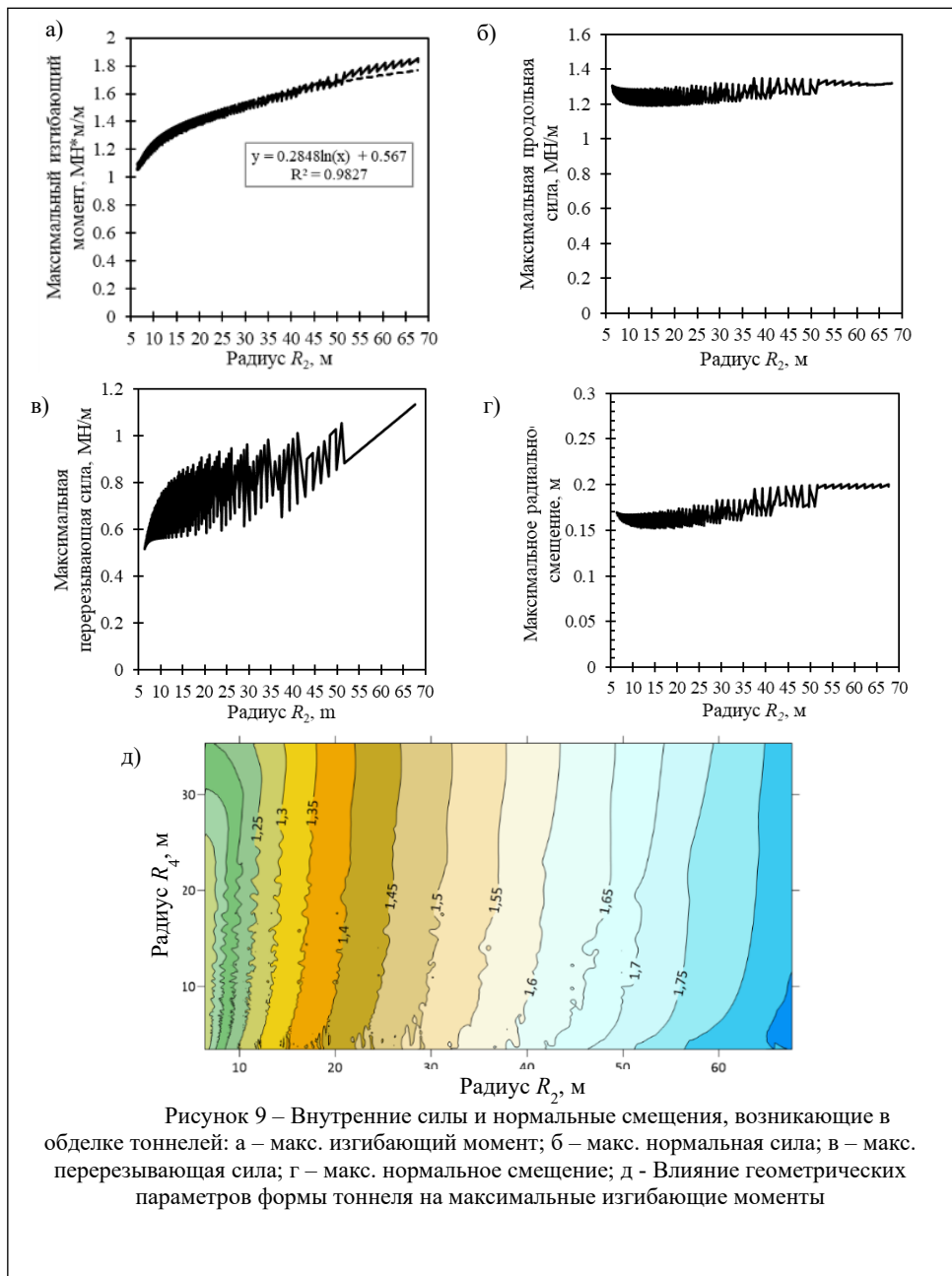


Рисунок 11 – Графики макс. изгибающих моментов (а), макс. продольных сил (б) и макс. смещений (в) в зависимости от радиуса R_1 и коэффициента бокового давления грунта K_0

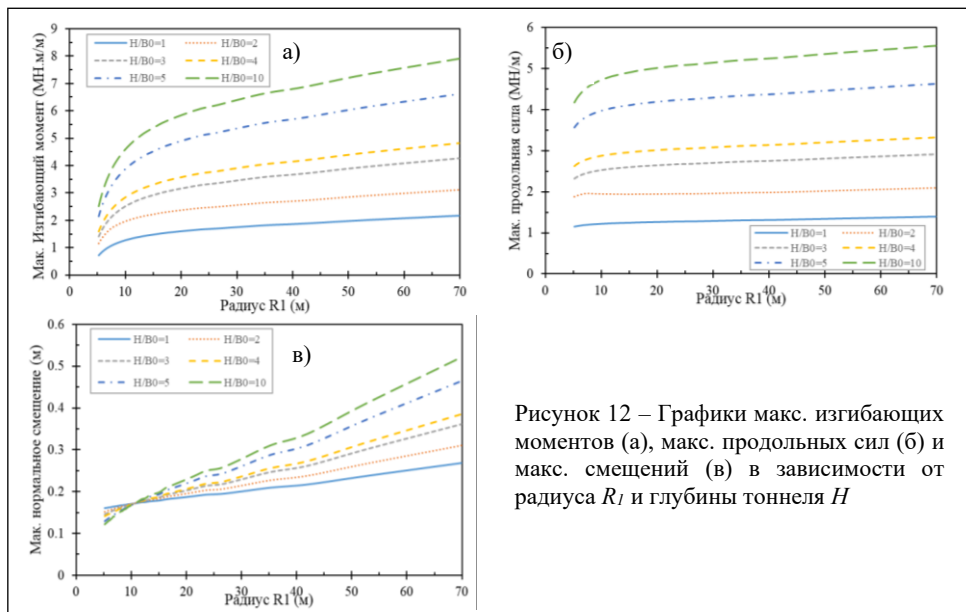


Рисунок 12 – Графики макс. изгибающих моментов (а), макс. продольных сил (б) и макс. смещений (в) в зависимости от радиуса R_1 и глубины тоннеля H

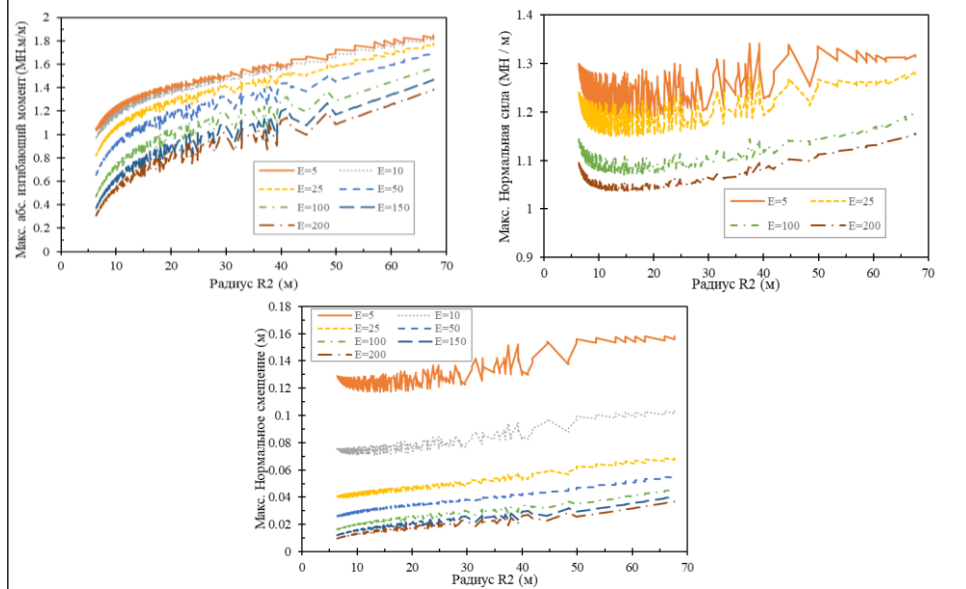


Рисунок 13 – Графики зависимости внутренних сил и смещений от модуля деформации (E_s) при радиусе R_2

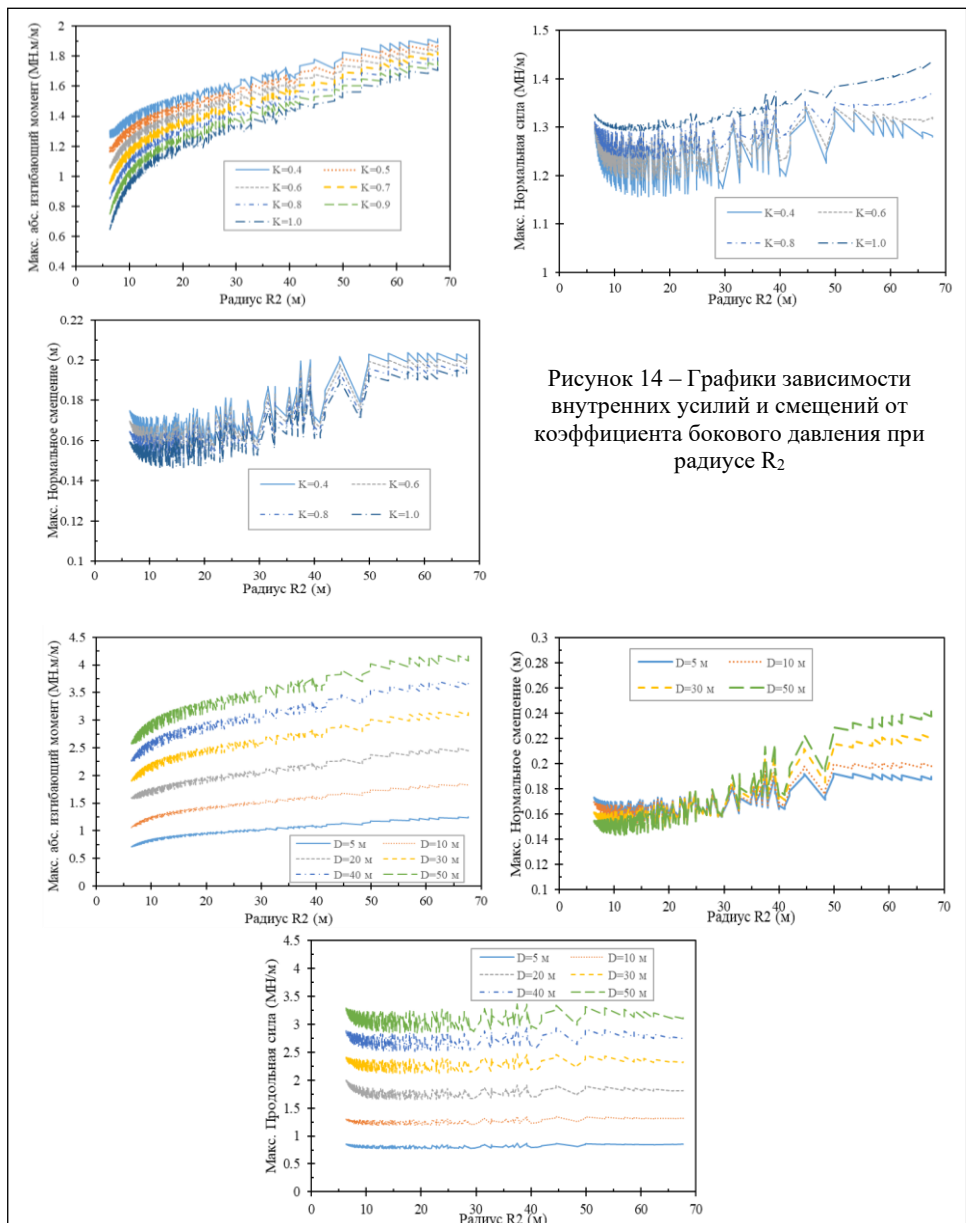


Рисунок 14 – Графики зависимости внутренних усилий и смещений от коэффициента бокового давления при радиусе R_2

Рисунок 15 – Графики зависимости внутренних усилий и смещений от глубины тоннеля и радиуса R_2