



На правах рукописи

Стахнёв Ярослав Олегович

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ
ОТ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ
ПРИ СВОДООБРАЗОВАНИИ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ**

Специальность 2.1.2 – Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена на кафедре «Геотехника, тоннели и метрополитены» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС)

Научный руководитель:

Королёв Константин Валерьевич

доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты:

Чанышев Анвар Исмагилович

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт горного дела им Н.А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук

Конюшков Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент, доцент высшей школы Гидротехнического и энергетического строительства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «__» _____ 2023 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 72.1.003.01, созданного на базе АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» по адресу: 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21.

Телефон: +7 (812) 535-54-45. E-mail: vniig@vniig.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и на сайте www.vniig.rushydro.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Татьяна Викторовна
Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Надёжная оценка устойчивости грунтового массива при проходке подземных выработок была и остается важнейшей задачей в подземном строительстве. С устойчивостью грунтового массива тесно связано понятие горного давления. Эти два фактора определяют и способ проходки, и конструкцию крепи подземных выработок.

История подземных сооружений различного назначения (тоннели, шахты, штольни и т.д.) насчитывает много веков. Все это время накапливался практический опыт, который формировал представления о поведении грунтов в процессе проходки подземных выработок и служил базой для дальнейшего развития подземного строительства. Системный характер теоретические и экспериментальные исследования в этой области приобрели примерно полтора столетия назад, оформившись в совокупность специальных инженерных дисциплин. Последние десятилетия к классическим методам исследования устойчивости выработок и горного давления добавился внушительный арсенал численных методов.

Вместе с тем, приходится признать, что, несмотря на весьма обширную научно-техническую литературу по данному вопросу, поиск теоретических решений этого класса задач ещё далек от завершения даже в отношении совсем простых схем – в частности, *«задача сводообразования остается нерешенной до настоящего времени»* (И.В. Баклашов, 2015).

Об этом же свидетельствует тот факт, что все основные, принятые в мире классификации грунтов (с точки зрения их устойчивости при проходке выработок) базируются на весьма условных эмпирических показателях, которые зачастую принимаются по визуальному описанию грунтов, например, BQ в КНР, RQD в США, Q в Норвегии, RMR в Польше.

На этом фоне теория сводообразования, предложенная в начале XX в. М.М. Протодьяконовым, принятая в отечественной практике тоннеле- и метростроения, выглядит гораздо более убедительно. Коэффициент крепости f , являясь центральным понятием этой теории, концептуально оформляет само явление потери устойчивости грунта вокруг выработки. Основной его недостаток – это отсутствие достоверных практических методов определения. Приближенные эмпирические зависимости, связывающие коэффициент f со стандартными характеристиками прочности грунта, имеют слабое обоснование и иногда приводят к противоречивым результатам.

Таким образом, дальнейшее развитие методов расчёта горного давления и устойчивости грунтов в рамках теории сводообразования является актуальной задачей.

Степень изученности темы. Несколько упрощая, можно предложить следующую классификацию работ, в которых приводятся результаты теоретических исследований устойчивости грунта вокруг выработок и горного давления:

- по расположению (глубокое заложение или вблизи поверхности, горизонтальная или вертикальная выработка, одиночная выработка или несколько близкорасположенных);
- по исследуемым механическим процессам (столб обрушения, свод обрушения, гипотеза плит, анализ развитий областей пластических и т.н. предельных деформаций, анализ полей перемещений в грунтовом массиве вблизи выработок или на поверхности);
- по модели грунта (упругая, упругопластическая, жёсткопластическая, вязко-упругопластическая и т.д.);
- по грунтовым условиям (скальный, дисперсный, мёрзлый).

Большинство работ последнего времени посвящено вопросам упругопластического и вязко-упругопластического деформирования грунтовых массивов, вмещающих разнообразные подземные сооружения. В то же время, направлению, заданному еще работами В. Риттера, М.М. Протодяконова и П.М. Цымбаревича, сегодня уделяется гораздо меньше внимания, хотя потенциал этих расчётных схем, на наш взгляд, далеко не исчерпан.

Цель работы заключалась в совершенствовании методов расчёта нагрузки от горного давления на подземные сооружения в рамках теории сводообразования с использованием стандартных параметров прочности скальных и дисперсных грунтов.

Задачи исследований.

1. Разработка общей схемы решения задачи устойчивости скального грунтового массива, вмещающего подземное сооружение, в рамках гипотезы сводообразования на основе паспорта прочности скальных и полускальных грунтов. Конкретизация этой схемы для пологих и подъемистых сводов.

2. Решение задачи о горном давлении в дисперсных грунтах строгим статическим методом теории предельного равновесия (ТПР) грунтов, а также приближенное решение задачи о равноустойчивом очертании выработки на базе решения ТПР о склоне с нависающим сводом.

3. Анализ численных решений задачи о горном давлении методом конечных элементов (МКЭ) и методом предельного анализа (МПА) для скальных и дисперсных грунтов.

4. Сопоставление результатов предложенных теоретических решений с известными экспериментальными данными.

5. Разработка практической методики расчёта устойчивости грунтов вокруг выработок и расчёта давления на конструкции подземных сооружений.

Объектом исследования является грунтовый массив, сложенный скальными и дисперсными грунтами, в момент потери устойчивости над подземной выработкой.

Предметом исследования является силовое взаимодействие области обрушения грунта над подземным сооружением и неподвижного грунтового массива, а также напряжённое состояние внутри области обрушения.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Получено новое решение о предельном равновесии свода обрушения с использованием паспорта прочности скального грунта.

2. Получено новое решение о предельном равновесии свода обрушения методом элементарного горизонтального слоя в полускальных грунтах.

3. Получено новое строгое статическое решение ТПР о горном давлении дисперсного грунта на крепь подземной выработки на базе аналогии с активным давлением грунта.

4. Предложено приближенное решение ТПР задачи о равноустойчивом очертании подземной выработки на базе решений В.В. Соколовского.

5. Раскрыты некоторые особенности определения нагрузки от горного давления на конструкции подземных сооружений численными методами.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в новых данных, полученных в результате решений задач об устойчивости свода обрушения в скальных и полускальных грунтах, в том числе методами ТПР о горном давлении в дисперсных грунтах, а также в разработанной практической методике расчёта нагрузки от горного давления на конструкции подземных сооружений.

1. Дан статический анализ задачи об определении нагрузки от горного давления с использованием стандартных характеристик прочности скальных и дисперсных грунтов.

2. Теоретически обоснован факт существования трёх схем работы грунтов над выработкой – столб обрушения, свод обрушения, полностью устойчивое состояние грунта над выработкой.

3. Предложено понятие о двух критических пролётах выработки, первый из которых отделяет устойчивое состояние грунтов над выработкой от обрушения по схеме свода, а второй отделяет схему свода обрушения от схемы столба обрушения.

4. Дан критический анализ и определена область применения численных методов для решения задач о вертикальной нагрузке от горного давления на подземные сооружения при сводообразовании.

5. Разработаны практические рекомендации для расчёта нагрузки от горного давления на конструкции подземных сооружений в скальных, полускальных и дисперсных грунтах.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовались:

- статический анализ системы сил, действующей на область обрушения грунта, с использованием стандартных характеристик прочности грунтов;

- метод характеристик ТПР грунтов;

- МКЭ в том виде, в каком он реализован в ПК *MIDAS GTS NX*;

- метод предельного анализа (МПА), основанный на применении методов линейного и нелинейного программирования для решения жесткопластических задач, в том виде, в каком он реализован в ПК *Optum G2*.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты решения задачи устойчивости скальных и полускальных грунтов над выработкой с использованием паспорта прочности в рамках теории сводообразования.

2. Теоретическое обоснование трёх различных схем потери устойчивости грунтов над выработкой в зависимости от ширины выработки.

3. Результаты решения задачи ТПР о горном давлении в дисперсных грунтах как аналог решения задачи о предельном давлении грунта на подпорные стенки.

4. Результаты решения задачи ТПР о равноустойчивом очертании подземной выработки в дисперсных грунтах.

5. Критический анализ результатов численного анализа устойчивости грунтов над выработкой, полученного МКЭ и методами линейного и нелинейного программирования.

6. Сопоставление величины нагрузки от горного давления, рассчитанного по предлагаемым решениям, с оценками, полученными в рамках других методов, а также с экспериментальными данными.

7. Практическая методика расчёта нагрузки от горного давления на конструкции подземных сооружений, тоннелей и метрополитенов.

Степень достоверности предлагаемых решений подтверждается применением строгих теоретических методов статического анализа системы сил, стандартных параметров прочности грунтов, строгого статического метода ТПР, верифицированных программных комплексов, реализующих МКЭ и МПА, а также выполненным сопоставлением с известными экспериментальными данными.

Личный вклад автора состоит в получении решения задачи об устойчивости скальных, полускальных и дисперсных грунтов над выработкой, в том числе методом характеристик ТПР, в выполнении численных расчётов МКЭ и МПА, а также в выполнении расчётов горного давления на реальном объекте.

Апробация работы. Материалы работы были представлены и докладывались на научно-технических конференциях и специализированных семинарах в АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (г. Санкт-Петербург), ФГБОУ ВО «ПГУПС» (г. Санкт-Петербург), ФГБУН «ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН» (г. Новосибирск), в ФГБОУ ВО «УТГУ» (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» (г. Санкт-Петербург), в ФГБОУ ВО «СГУПС» (г. Новосибирск).

Внедрение результатов работы. Результаты исследования внедрены на объектах ООО «ПИИ «БАМТОННЕЛЬПРОЕКТ» и АО «Мосинжпроект».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 работы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ. Кроме того, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Общий объём составляет 152 страницы, 75 рисунков, 9 таблиц, 4 приложения. Список литературы содержит 191 источник, в том числе 25 иностранных.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору публикаций, в которых рассматриваются вопросы определения горного давления. Большой вклад в развитие теории горного давления внесли отечественные и зарубежные ученые – Авершин С.Г., Баклашов И.В., Барон Л.И., Борисов А.А., Бренблатт Г.И., Бульчѐв Н.С., Васильев Л.М., Деев П.В., Динник А.Н., Ержанов Ж.С., Ершов Л.В., Заславский Ю.З., Зерцалов М.Г., Картозия Б.А., Кузнецов Г.Н., Кузнецов С.В., Курленя М.В., Лаббас А., Либерман Ю.Н., Литвинский Г.Г., Меркин В.Е., Миренков В.Е., Насонов Л. Н., Неверов С.А., Опарин В.Н., Панфилова Д.В., Покровский Н.М., Протодяконов М.М., Протодяконов-мл М.М., Протосеня А.Г., Ревуженко А.Ф., Ремезов А.В., Риттер В., Руппенейт К.В., Савин Г.Н., Саммаль А.С., Серяков В.М., Слесарѐв В.Д., Соколовский В.В., Стажевский С.Б., Фисенко Г.Л., Фотиева Н.Н., Фрейдин А.М., Фролов Ю.С., Хан Г.Н., Цимбаревич П.М., Чанышев А.И., Шашенко А.Н., Шемякин Е.И., Fenner R., Ketter F., Kommerel O., Lyamin A.V., Qian Q.H., Turner, Wang X.B., Wittke W., Yansen, Zhou X.P. и многие другие.

В работах перечисленных авторов рассматривается широкий круг вопросов, связанных с определением горного давления и процессов формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) вокруг горных выработок: статически определимые постановки и т.н. деформационные подходы; вероятностные подходы и применение механики дискретной среды; упругие решения с применением метода граничных элементов и теории функции комплексного переменного; решения с учетом сейсмики и совместной работы массива и временной (или постоянной) крепи и многое другое.

В практике отечественного тоннеле- и метростроения главной базой для расчета горного давления была и остается теория сводообразования М.М. Протодяконова. Основная проблема здесь – это отсутствие надежных лабораторных или практических методов определения коэффициента крепости f , который занимает центральное место в этой теории – значение f определяет и нагрузку на конструкции подземных сооружений, и даже способ проходки. Вместе с тем, назначение этого параметра осуществляется по эмпирическим зависимостям или просто по описанию грунта. Общепринятого теоретически обоснованного способа определения коэффициента крепости до сих пор нет.

Надо отметить, что в практике зарубежного подземного транспортно-го строительства ситуация обстоит схожим образом. Так, параметры BQ в Китае, RQD (*Rock Quality Designation*) в США, GSI (*Geological Strength Index*) и RMR (*Rock Massive Ratio*) в странах ЕС обладают тем же недостатком – это эмпирические параметры, которые не имеют под собой фундаментальной базы какого-либо физического закона или строгого теоретического решения.

Отдельно следует сказать о применении численных методов при решении задач определения горного давления. Как известно, за последние 20...25 лет, в связи с массовым внедрением в реальное проектирование различных компьютерных расчетных программ, численные методы получили широчайшее распространение и далеко вышли за рамки чисто научных исследований. Это происходит и у нас в стране, и за рубежом. А поскольку для исследуемой задачи пока нет общепризнанного решения, то это означает, что в настоящий момент идёт массовая практическая верификация численных расчётов, которая поневоле носит поисково-исследовательский характер. Следовательно, результаты, полученные численными методами, требуют и систематизации, и осмысления.

В этой ситуации методы определения горного давления, регламентированные в СП 120.13330 «Метрополитены» и СП 122.13330 «Тоннели железнодорожные и автодорожные» и основанные на теории сводообразования М.М. Протодяконова, остаются своего рода ориентиром, позволяющим избежать совсем грубых ошибок при проектировании тоннелей и других подземных сооружений.

Главное противоречие нормативной методики вытекает из применения эмпирической формулы (предложенной еще М.М. Протодяконовым), связывающей коэффициент крепости f и предел прочности на одноосное сжатие R_c , МПа: $f = R_c / 10$. Так, например, для скального грунта с $R_c = 7$ МПа коэффициент крепости $f = 0,7$ (без учета влияния трещиноватости), что согласно тем же нормам соответствует плотному маловлажному песку или супесчано-суглинистым грунтам (см. СП 120.13330, табл. 5.9).

Итак, первая проблема заключается в том, что отсутствует общепринятое теоретическое решение задачи о формировании свода обрушения в подземных выработках.

Вторая проблема заключается в отсутствии достоверных методов определения коэффициента крепости, который определяет геометрию

свода обрушения и, следовательно, величину нагрузки от горного давления на подземные сооружения.

Во второй главе приводятся решения задач о вертикальном давлении скальных и дисперсных грунтов на конструкции подземных сооружений.

Общая схема решения. На рисунке 1, а, представлена общая схема области обрушения грунта по Протодьяконову-Цымбаревичу, взятая за основу при построении решений. Эта же схема принята в СП 120 и в СП 122.

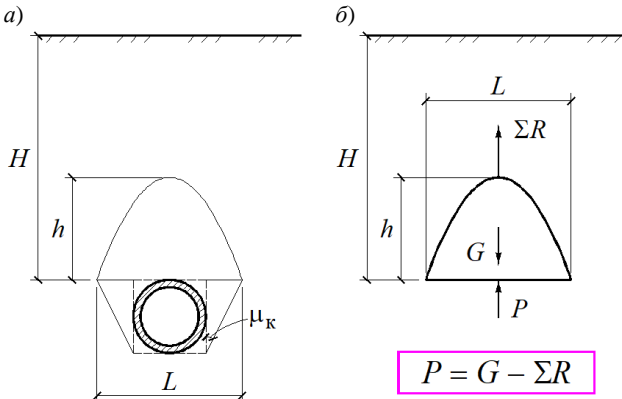


Рисунок 1 – Принципиальная схема свода обрушения: а – область обрушения (свод и призмы) вокруг подземного сооружения; б – силы, действующие на свод обрушения

Основная цель решения – статический анализ системы сил, действующих на свод обрушения. К ним относятся собственный вес G , суммарная сила ΣR сопротивления грунта по контуру свода и сила P горного давления p (рисунок 1, б). При этом ставится задача найти такую высоту h_{cr} свода обрушения,

при которой соотношение удерживающих и обрушающих сил будет самым неблагоприятным, т.е.

$$P(h_{cr}) = \max_h [G(h) - \Sigma R(h)]. \quad (1)$$

Силовое взаимодействие свода обрушения и неподвижного грунтового массива представлено на рисунке 2, а. В соответствии со схемой вес G свода обрушения и величина силы сопротивления ΣR составят (для правой половины симметричного свода обрушения):

$$\frac{1}{2}G(h) = \gamma ah - \int_0^a \gamma z(x) dx; \quad \frac{1}{2}\Sigma R(h) = \int_0^a (|\sigma_n| \cos \alpha + \tau_n \sin \alpha) \frac{dx}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

где a – полупролет свода обрушения: $a = L/2$.

Для дальнейшего решения введем несколько гипотез.

Гипотеза 1. Основываясь на работах В. Риттера и М.М. Протодьяконова, примем очертание свода обрушения в виде квадратной параболы:

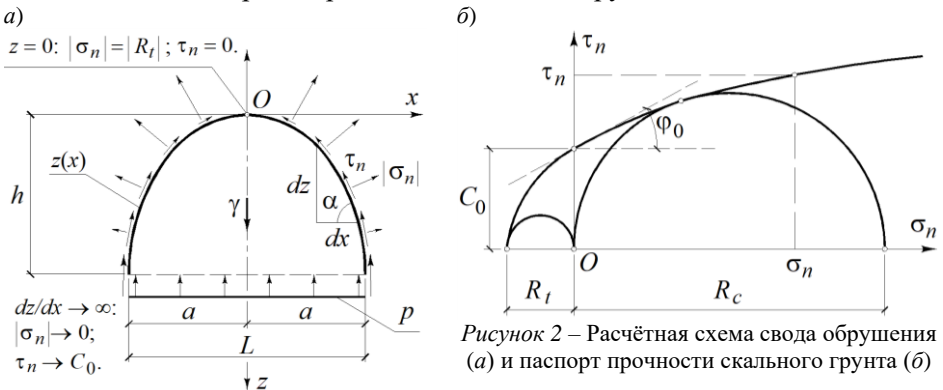
$$z(x) = h \cdot (x/a)^2. \quad (3)$$

Гипотеза 2. Касательные τ_n и нормальные σ_n напряжения по границе свода свяжем уравнением огибающей предельных кругов Мора (рисунок 2, б):

$$\tau_n = C_0 \left(1 - \frac{|\sigma_n|}{|R_t|} \right)^m. \quad (4)$$

где C_0 – предел прочности грунта на срез при $\sigma_n = 0$; m – показатель, регулирующий кривизну огибающей; R_t – предел прочности грунта на растяжение, причем здесь $R_t < 0$.

Построение предельных грунтов Мора по результатам испытаний скальных грунтов на одноосное сжатие R_c , одноосное растяжение R_t и объемное сжатие регламентируется ГОСТ 21153.8-88. Этот график обычно называют паспортом прочности скального грунта.



Гипотеза 3. Относительно распределения нормальных напряжений σ_n по контуру свода примем следующую гипотезу:

$$|\sigma_n| = |R_t| \cos \alpha. \quad (5)$$

Основное уравнение в скальных грунтах (пологий свод). Подставим (3)...(5) в равенства (2), а те, в свою очередь, – в уравнение (1):

$$\frac{1}{2} P(h_{cr}) = \max_h \left\{ \gamma a h - \int_0^a \left[\gamma h \frac{x^2}{a^2} + \frac{|R_t|}{\sqrt{1+z'^2}} + C_0 z' \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z'^2}} \right)^m \right] dx \right\}.$$

Здесь учтено, что $\operatorname{tg} \alpha = dz/dx \equiv z'$.

Анализ результатов решения для скальных грунтов. Расчёты выполнялись в относительных переменных: $\gamma = 1$ – единица объёмного веса, $a = 1$ – единица длины; соответственно, γa – единица напряжений. Для определенности примем следующие параметры огибающей (4) предельных кругов Мора: $R_t = -0,1R_c$, $C_0 = 0,25R_c$, $m = 0,44$.

На рисунке 3 представлены графики зависимости $p(h)$ для различных значений прочности грунта R_c на одноосное сжатие. Здесь p – среднее давление на участке $x \in [0, a]$, то есть $p = P/(L \times 1)$.

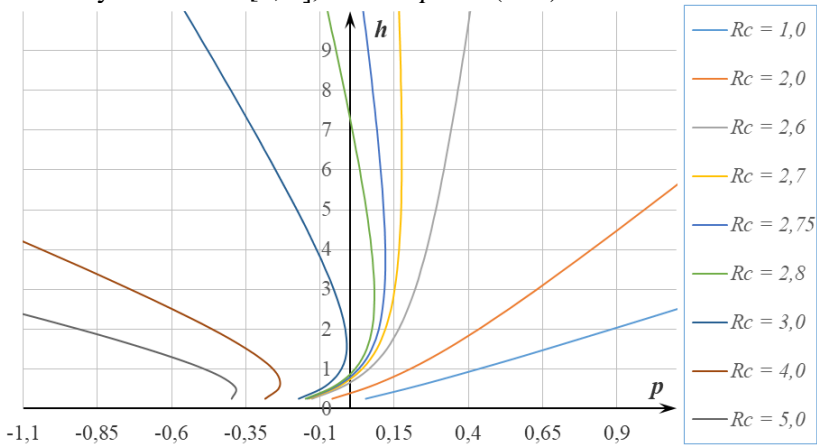


Рисунок 3 – Графики давления $p(h)$ в скальных грунтах для разных R_c

Анализ полученных результатов позволяет сделать принципиально важный вывод. При любой наперед заданной ширине свода обрушения в зависимости от прочности грунта возможны три вида напряженного состояния грунта над выработкой или подземным сооружением:

1) если $p(h) < 0$ при любом h , то потери устойчивости грунта не происходит, так как прочности грунта достаточно для удержания любого свода обрушения любой высоты (см. рисунок 3, кривые $R_c = 3,0 \dots 5,0$);

2) если $p(h) > 0$ на некотором интервале значений h , то формируется свод обрушения высотой h_{cr} , которая отвечает максимуму функции p на этом интервале (см. рисунок 3, кривые $R_c = 2,7 \dots 2,8$);

3) если $p(h) \rightarrow \infty$ при $h \rightarrow \infty$, то давление грунта на крепь тем больше, чем выше значение h , т.е. фактически это означает, что потеря устойчивости грунта над выработкой будет происходить по схеме столба обрушения (см. рисунок 3, кривые $R_c = 1,0 \dots 2,6$).

Понятие о двух критических пролетах. Задаваясь каким-либо значением $R_c = \text{const}$ и изменяя величину L , легко установить существование двух критических пролетов свода обрушения $L_{кр1}$ и $L_{кр2}$ таких, что

1) при $L < L_{кр1}$ грунт над выработкой будет устойчив, и крепления выработки не требуется;

2) при $L_{кр1} \leq L < L_{кр2}$ потеря устойчивости грунта над выработкой будет реализована по схеме свода обрушения, следовательно, необходимо крепление выработки, а давление грунта на крепь выработки (подземного сооружения) может быть принято равным весу свода обрушения;

3) при $L \geq L_{кр2}$ над выработкой образуется столб обрушения, и тогда на крепь будет действовать давление, равное бытовому давлению на этой глубине.

На величину $L_{кр2}$ следует обратить особое внимание, поскольку она определяет переход к схеме столба обрушения в ситуациях, непредусмотренных СП 120 и СП 122, и вполне может использоваться на практике.

Решение для полускальных грунтов. Необходимость отдельного решения для полускальных грунтов вызвана тем, что в предыдущем решении подразумевалось растяжение по всему контуру свода обрушения.

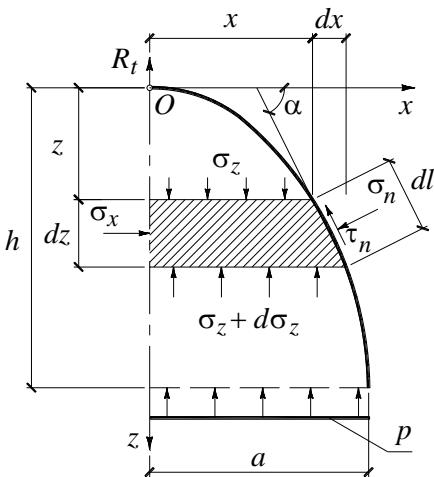


Рисунок 4 – Расчётная схема для полускальных грунтов (подъёмистый свод)

В менее прочных полускальных грунтах можно ожидать формирования более подъёмистых сводов. И если в вершине свода имеет место растяжение и отрыв, то ниже по контуру свода вполне вероятно появление сжимающих напряжений в результате распора.

Расчётная схема дана на рисунке 4. В теле свода обрушения действуют вертикальные напряжения σ_z и горизонтальные σ_x . По контуру свода действуют предельные нормальные σ_n и касательные τ_n . Касательными напряжениями τ_{xz} , допустим, можно пренебречь.

Итак, запишем уравнения равновесия всех сил, действующих на элементарный горизонтальный слой мощностью dz :

$$\sigma_x dz - \sigma_n dl \sin \alpha - \tau_n dl \cos \alpha = 0;$$

$$\sigma_z x - (\sigma_z + d\sigma_z)(x + dx) + \sigma_n dl \cdot \cos \alpha - \tau_n dl \cdot \sin \alpha + \gamma \cdot dV = 0.$$

Поскольку $dl = dx/\cos \alpha$, $dl = dz/\sin \alpha$ и $dV = (2x + dx)dz/2$, то, пренебрегая величинами высшего порядка малости, имеем:

$$\sigma_x = \tau_n x' + \sigma_n; \quad (6)$$

$$\sigma'_z + (\sigma_z - \sigma_n) \frac{x'}{x} + \tau_n \frac{1}{x} - \gamma = 0. \quad (7)$$

Здесь обозначено: $\sigma'_z \equiv d\sigma_z/dz$; $x' \equiv dx/dz = \operatorname{ctg} \alpha$.

Горизонтальные и вертикальные напряжения свяжем зависимостью

$$\sigma_x = K_0 \sigma_z,$$

где K_0 – коэффициент бокового давления (постоянный в пределах свода).

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$K_0 \sigma_z = \tau_n x' + \sigma_n. \quad (8)$$

Касательные τ_n и нормальные σ_n напряжения на границе свода будут связаны уравнением (4) огибающей предельных кругов Мора.

В результате имеем систему из дифференциального уравнения (7) и алгебраических ограничений (3), (4) и (8).

В отличие от решения для скальных грунтов здесь нет необходимости вводить гипотезу (5) относительно распределения нормальных напряжений по контуру свода. Это позволяет получать распор в нижней части свода, т.е. $\sigma_n > 0$. С другой стороны, в данном решении появляется новый параметр – коэффициент бокового давления K_0 .

Основным результатом решения будет значение вертикальных напряжений в теле свода обрушения в уровне $z = h$: $p = \sigma_z(h)$. Поставим задачу найти $p_{\max} = p(h_{cr})$.

Анализ результатов решения для полускальных грунтов. Поиск p_{\max} будем осуществлять в тех же относительных переменных, что и в решении для скальных грунтов: $a = 1$ и $\gamma = 1$.

Приведем некоторые результаты расчета для тех же исходных данных, что и ранее: $R_t = -0,1 \cdot R_c$; $C_0 = 0,25 \cdot R_c$; $m = 0,44$. На рисунке 5 даны графики функции $p(h)$ при различных значениях R_c и различных величинах коэффициента бокового давления K_0 .

Качественно решение для полускальных грунтов повторяет результаты для скальных грунтов. В частности, здесь также подтверждается основной вывод о существовании трёх видов напряженного состояния грунта над выработкой – полностью устойчивое состояние, свод обрушения и столб обрушения.

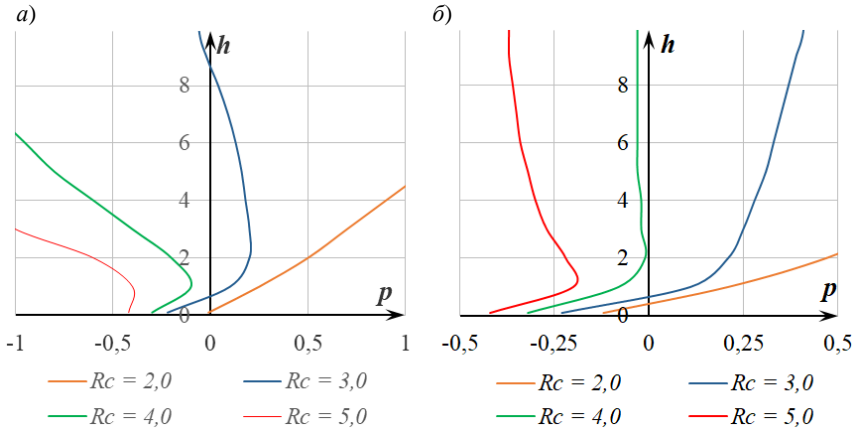


Рисунок 5 – Графики $p(h)$ в полускальных грунтах: а – при $K_0 = 0,01$; б – при $K_0 = 0,99$

Вместе с тем, здесь существенное влияние на величину горного давления оказывает значение коэффициента бокового давления K_0 . При $K_0 = 0,01$ получаются меньшие значения давления грунта на крепь, в то время как при $K_0 = 0,99$ – большие.

Еще одной особенностью данного решения является то, что в зависимости от исходных данных в нижней части свода может происходить смена знака нормальных напряжений σ_z внутри свода обрушения и σ_n по его контуру, т.е. моделируется явление распора в нижней части свода.

Решение для дисперсных грунтов. Устойчивость дисперсного грунта над выработкой требует отдельного рассмотрения. Это связано с тем, что дисперсные грунты практически не работают на растяжение, а их прочность описывается линейным графиком сдвига, т.е. условием прочности Кулона-Мора.

Предлагаемое далее решение базируется на классической задаче теории предельного равновесия (ТПР) об активном давлении. Аналогия между горным давлением на крепь выработки и активным давлением грунта на подпорные сооружения обсуждается в полном тексте диссертации. Здесь же отметим, что в скальных грунтах сам этот эффект давно известен и широко используется в практике тоннелестроения. В частности, на его использовании основан новоавстрийский метод проходки (*NATM*).

Итак, для решения задачи о горном давлении в дисперсных грунтах воспользуемся методом характеристик ТПР. Плоская задача ТПР грунтов формулируется как система из двух дифференциальных уравнений равно-

весия и условия прочности Кулона-Мора (ось Oz направлена вертикально вниз):

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma;$$

$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} = (\sigma_x + \sigma_z + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \sin \varphi,$$

где φ и c – угол внутреннего трения и удельное сцепление дисперсного грунта.

Эти уравнения приводят к каноническому виду по характеристикам:

$$dx = dz \operatorname{tg}(\alpha \pm \mu); \quad d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \cdot d\alpha = \gamma(dz \mp dx \operatorname{tg} \varphi),$$

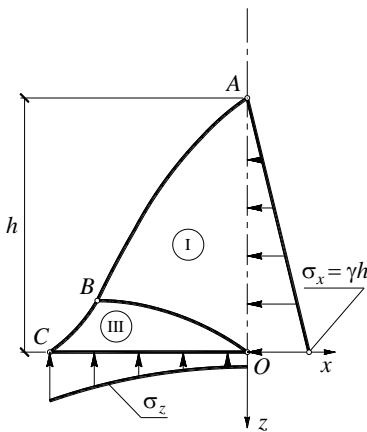
где σ – среднее приведенное напряжение, равное $\sigma = (\sigma_x + \sigma_z)/2 + c \operatorname{ctg} \varphi$; α – угол между осью Oz и направлением первого главного напряжения σ_1 .

Компоненты предельных напряжений даются формулами:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x \\ \sigma_z \end{array} \right\} = \sigma(1 \mp \sin \varphi \cos 2\alpha) - c \operatorname{ctg} \varphi, \quad \tau_{xz} = \sigma \sin \varphi \sin 2\alpha.$$

Расчётная схема задачи о горном давлении на горизонтальный элемент подземного сооружения показана на рисунке 6. Здесь рассмотрены два случая.

a)



б)

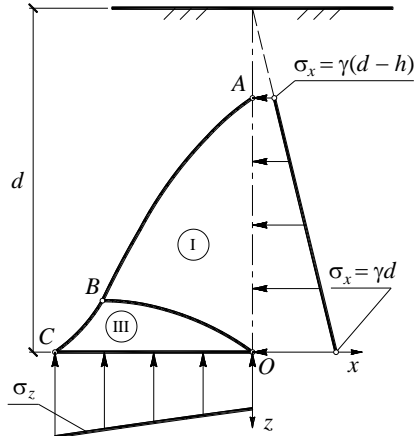


Рисунок 6 – Расчётные схемы к задаче о сводообразовании в дисперсных грунтах: а – схема ТПРГ-1 (давление не зависит от d); б – схема ТПРГ-2 (давление зависит от d)

На рисунке 6, а дана схема, которую далее будем обозначать как ТПРГ-1, где предполагается, что при наступлении предельного состояния

свод отходит от несмещающегося грунта в верхней точке, и, следовательно, в вершине свода давление будет равно нулю, а вдоль границы OA давление будет линейно возрастать.

На рисунке 6, б дана схема, обозначаемая в дальнейшем как ТПРГ-2. В этой схеме предполагается, что по границе OA напряженное состояние определяется как бытовое в состоянии покоя на глубине d .

Для обоих случаев коэффициент бокового давления принят равным 1, что идет запас прочности.

Последовательность краевых задач (их номера показаны цифрами на схемах) одинакова для обеих схем. Результатом решения является эпюра предельных вертикальных напряжений σ_z на границе OC , т.е. эпюра давления грунта на крепь.

Анализ результатов решения для дисперсных грунтов. Ниже даны результаты расчётов, выполненных в относительных переменных: $\gamma = 1$ и $a = 1$. Переменными величинами являются угол φ внутреннего трения и приведенное относительное значение удельного сцепления c .

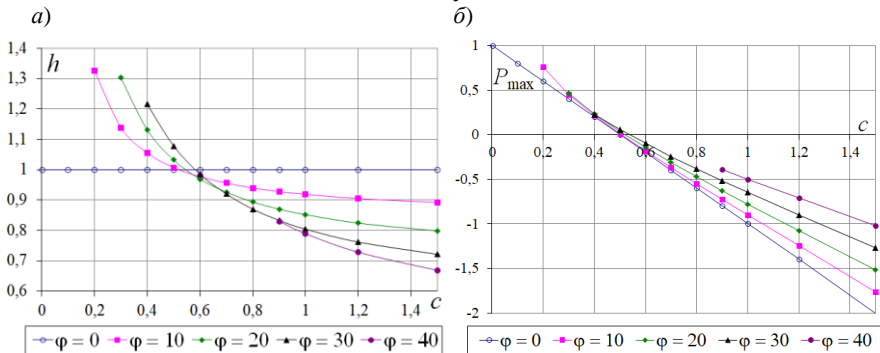


Рисунок 7 – Результаты расчёта по схеме ТПРГ-1:

а – зависимость $h(c)$; б – зависимость $P_{\max}(c)$

На рисунке 7 показаны графики зависимости высоты h области обрушения и результирующей P_{\max} давления грунта на крепь от удельного сцепления при различных значениях параметров прочности φ и c для схемы ТПРГ-1.

Аналогичные результаты получены и по схеме ТПРГ-2, которые приводятся в полном тексте диссертации.

Задача о равноустойчивом очертании калотты. Помимо задачи об определении предельной силы горного давления была рассмотрена ещё одна задача для дисперсных грунтов – об определении равноустойчивого

контура выработки (калотты). Данное решение базируется на известном решении В.В. Соколовского о равноустойчивом контуре откосов с нависающим сводом. Подробно описание решения приводится в полном тексте диссертации. В результате решения разработана методика определения полупролёта калотты l в зависимости от ее высоты h_k .

Третья глава посвящена численному моделированию задач о горном давлении. При моделировании были применены два программных комплекса *MIDAS GTS NX* и *Optum G2*, реализующих принципиально различные численные методы – метод конечных элементов (МКЭ) и метод предельного анализа (МПА).

MIDAS реализует метод конечных элементов (МКЭ) в классическом виде, в основу которого положено равенство работы узловых сил на узловых перемещениях и работы внутренних усилий на деформациях конечного элемента. В данном случае решалась идеально-упругопластическая задача.

Optum G2 реализует метод предельного анализа (МПА), суть которого в следующем. Для каждого конечного элемента записываются уравнения равновесия, затем – уравнения равновесия на границах между элементами и по контуру расчетной области. Величины напряжений ограничены условием текучести. Ставится задача поиска экстремального значения нагрузки на расчётную область в рамках указанных ограничений. Фактически это жесткопластическая задача, которая решается методами линейного и нелинейного программирования.

Расчёты по обоим методам выполнялись и для скальных грунтов (с условием прочности *Hoek-Brown*), и для дисперсных грунтов (с условием прочности Кулона-Мора). Расчётная схема решения задачи представлена на рисунке 8. В МКЭ внизу по центру расчётной области задавалось давление p , равное бытовому. Давление p в ходе ре-

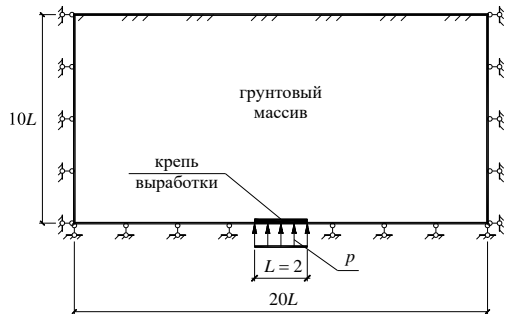


Рисунок 8 – Схема для расчётов по МКЭ и МПА

шения уменьшалось до тех пор, пока не произойдёт обрушение (искомое давление грунта на крепь), или пока p не дойдет до нуля (т.е. разрушения при данных условиях не произойдет). В МПА осуществлялся поиск ми-

нимума давления p , при котором еще возможно существование статически допустимого поля напряжений.

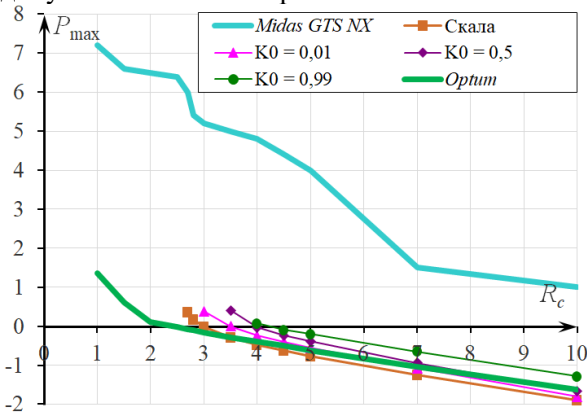


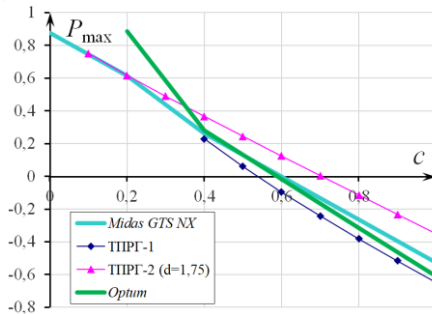
Рисунок 9 – Зависимости $P_{\max}(R_c)$

На рисунке 9 даны сопоставительные графики силы $P_{\max}(R_c)$ давления грунта на крепь по МКЭ (Midas) и по МПА (Optum), а также результаты теоретических решений для скальных (кривая – Скала) и для полускальных грунтов для трех значений коэффициента бокового давления (кривые – $K_0 = 0,01$; $K_0 = 0,5$; $K_0 = 0,99$).

Из графиков видно, что МПА дает оценки предельной нагрузки на крепь, достаточно близкие к теоретическим, в отличие от МКЭ, который показывает явно завышенные значения.

Аналогичное сопоставление для дисперсных грунтов (условие прочности Кулона-Мора) дано на рисунке 10 при различной высоте d расчетной области.

а)



б)

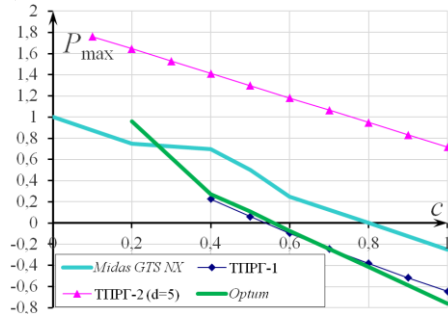


Рисунок 10 – Зависимость $P_{\max}(c)$: а – при $d = 1,75$; б – при $d = 5,0$

Здесь и МПА, и МКЭ дают значения предельной силы, близкие к теоретическим, рассчитанным по схеме ТПРГ-1 ($d = h$). Что касается схемы ТПРГ-2 ($d = 1,75$ и $d = 5,0$), то, исходя из выполненного сопоставления, она может применяться только при небольшой глубине заложения под-

земных сооружений, когда на размеры области обрушения будет оказывать влияние близкое расположение дневной поверхности. В целом, МПА дает более близкие результаты к теоретическим решениям, чем МКЭ. При этом отметим, что для дисперсных грунтов с прочностью по Кулону-Мору МКЭ дает чуть более надежные величины предельной нагрузки, чем при использовании условия *Hoek-Brown*.

Четвёртая глава содержит результаты сопоставления полученных решений с известными теоретическими, практическими и экспериментальными данными. Было выполнено сопоставление со следующими данными.

Сопоставление 1. Нормативная методика (СП 120 и СП 122), которая является прямым отражением теории М.М. Протодяконова, и по которой запроектировано и построено огромное количество подземных сооружений. Из выполненного сопоставления, представленного в полном тексте диссертации, можно сделать следующие выводы.

Первое. При небольших значениях R_c предлагаемые решения для скальных и полускальных грунтов дают заниженные оценки высоты свода обрушения по сравнению с нормативной методикой. Это можно рассматривать как решение проблемы, которая является следствием некорректности формулы $f = R_c/10$, используемой в СП, при малых значениях R_c . Действительно, для полускальных грунтов с $R_c = 5 \dots 1$ МПа – коэффициент крепости равен $f = 0,5 \dots 0,1$ при том, что грунт $f = 0,3$ по шкале М.М. Протодяконова назначается для плывунов.

Второе. Предлагаемые теоретические решения дают четкую границу применимости схем столба обрушения, свода обрушения и самонесущей выработки (для которой СП рекомендуют схему вывала – при отношении $h/L < 1/6$) на основе стандартных характеристик прочности.

Сопоставление 2. Опыты на дисперсных грунтах, выполненные Пригожиным Е.С. и Денисовым В.Н. (см. «Механика подземных сооружений» Н.С. Булычева), для количественной верификации теоретических оценок предельного давления грунтов на подземные сооружения. Сопоставление показало, что предлагаемые теоретические решения дают расхождение в $1 \dots 75$ % с указанными опытными данными, в то время как методика СП дает расхождение в $6 \dots 340$ %.

Сопоставление 3. Работа сотрудников Института горного дела СО РАН, в которой приводятся результаты численного эксперимента по устойчивости грунтов, выполненного в рамках механики дискретных сред. Здесь основная задача – оценить получаемую в теоретических реше-

ниях эпюру предельного давления дисперсных грунтов на крепь выработок. Было показано, что в дисперсных грунтах разрушение грунта начинается с краев выработки, а не с середины.

Сопоставление 4. Анализ причин аварии, произошедшей на строительстве одного из реальных тоннелей. Показано, что по нормативной методике определения горного давления, в данных инженерно-геологических условиях, формируется свод обрушения. Согласно же предлагаемой схеме над выработкой формируется столб обрушения, что и было реализовано на данном объекте.

Пятая глава посвящена описанию практической методики определения горного давления в скальных, полускальных и дисперсных грунтах. Эта методика базируется на полученных выше теоретических решениях и приводится в полном тексте диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработана методика расчёта вертикальной нагрузки от горного давления на подземные сооружения в рамках теории сводообразования на основе паспорта прочности скальных и дисперсных грунтов.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Разработана общая схема решения задачи об устойчивости скальных грунтов над выработкой и определения нагрузки от горного давления на подземные сооружения в скальных грунтах.

2. Установлены закономерности изменения величины нагрузки от горного давления в скальных грунтах в зависимости от соотношения прочности грунтов и ширины выработки. В частности, показано, что существуют три типа поведения грунта над выработкой или подземным сооружением – полностью устойчивое состояние, формирование свода обрушения, формирование столба обрушения.

3. Предложено и обосновано понятие двух критических пролетов подземных сооружений. Первый критический пролет отделяет полностью устойчивое состояние выработки от состояния, при котором образуется свод обрушения, второй критический пролет разделяет схемы свода и столба обрушения.

4. Предложено новое решение задачи о нагрузке на подземные сооружения от горного давления в полускальных грунтах методом элемен-

тарного горизонтального слоя. Установлено влияние коэффициента бокового давления на результат формирования областей обрушения.

5. В рамках теории предельного равновесия грунтов на базе аналогии с давлением грунта на подпорные стенки решена задача о горном давлении в дисперсных грунтах, а также предложено приближенное решение о равноустойчивом очертании выработки.

6. Дан критический анализ результатов численного моделирования указанного класса задач в скальных и дисперсных грунтах методом конечных элементов (МКЭ) и методом предельного анализа (МПА). Показано, что МКЭ дает противоречивые результаты, особенно при рассмотрении скальных грунтов. МПА дает результаты, весьма близкие к разработанным в диссертации теоретическим решениям. Вместе с тем, верификация МПА применительно к задачам о горном давлении (например, вокруг выработок круглого сечения), видимо, должна быть продолжена.

7. Показано удовлетворительное соответствие предложенных теоретических решений с общими положениями теории М.М. Протодяконова. Иначе говоря, предложено теоретическое обоснование центральной гипотезы М.М. Протодяконова о сводообразовании с тремя важными уточнениями – о существовании критических пролетов, о зависимости давления грунта от соотношения его прочности и ширины выработки, о пологих сводах обрушения ($f > 5 \dots 10$) как о самонесущих выработках с возможностью местного вывала. Также показано удовлетворительное соответствие полученных результатов опытным данным.

8. Разработаны практические рекомендации по расчету вертикальной нагрузки от горного давления на подземные сооружения в скальных и дисперсных грунтах.

Представленная диссертация соответствует пп. 2, 3 и 9 области исследований паспорта специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

В качестве перспективных направлений по данному вопросу можно выделить несколько позиций.

1. Ввести деформационное уравнение в решение для полускальных грунтов.
2. Развить полученные решения ТПР введением линии разрыва.
3. Распространить полученные решения на пространственную задачу.

Список публикаций автора по теме диссертации

По теме диссертации автором опубликовано 9 печатных работ и получено 1 свидетельство о регистрации программного продукта:

I. Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования материалов диссертаций

1. Королёв, К.В. Статическое решение задачи о горном давлении методом характеристик теории предельного равновесия / К.В. Королёв, **Я.О. Стахнёв** // Известия вузов. Строительство – 2020. – № 12. – С. 78-85.
2. Стахнёв, Я.О. Определение горного давления на базе решения В.В. Соколовского о нависающем своде / **Я.О. Стахнёв** // Известия вузов. Строительство – 2021. – № 9 (753). – С. 13-20.
3. Королёв, К.В. Статический анализ предельного равновесия свода обрушения при проходке подземных выработок в скальных и полускальных грунтах / К.В. Королёв, **Я.О. Стахнёв** // Вестник СГУПС – 2022. – № 61. – С. 103-115.

II. Публикации в зарубежных и российских журналах, входящих в международные реферативные базы данных цитирования (Scopus)

4. Karaulov, A., Korolev, K., **Stakhnev, Y.** (2021). Determining the Magnitude of Rock Pressure on the Underground Mine Working Support. In: Mottaeva, A. (eds) Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. ISCAC 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 130. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_18
5. Korolev, K., **Stakhnev, Y.**, Kuznetsov, A. Rock pressure calculation for rocky and disperse soils. In: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2022). E3S Web of Conferences. V. 371. DOI: 10.1051/e3sconf/202337102035.

III. Статьи в научных журналах, сборниках научных трудов и материалов научно-практических конференций

6. Королёв, К.В. К вопросу о горном давлении и сводообразовании / К.В. Королёв, Е.Н. Жукова, **Я.О. Стахнёв** / В сборнике: Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений. Труды VI Международной конференции 10-11 апреля 2019 г. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. – С. 209-216.

7. Калугин, А.Л. К вопросу об определении реакции горного массива / А.Л. Калугин, **Я.О. Стахнёв**, К.В. Королев / В сборнике: Интеллектуальный потенциал Сибири. 27-я Региональная научная студенческая конференция: сборник научных трудов. – Новосибирск, 2019. – С. 189-190.

8. Королёв, К.В. Определение горного давления на базе решения В.В. Соколовского о нависающем своде / Королев К.В., **Стахнёв Я.О.**, Караулов А.М. // В сборнике: Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий. Материалы II Всероссийской конференции с международным участием – Пермь, 2021. – С. 187-198.

9. Стахнёв, Я.О. Вопросы теории сводообразования в скальных и дисперсных грунтах применительно к транспортному строительству / **Стахнёв Я.О.** // В сборнике: Политранспортные системы. Материалы XII Международной научно-технической конференции. – Новосибирск, 2022. – С. 187-198.

10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020612536, 26.02.2020. Заявка № 2020610170 от 10.01.2020. Построение статического решения теории предельного равновесия грунтов в задаче о горном давлении «ГД V.1» / **Я.О. Стахнёв** – Опувл. 26.02.2020.

Стахнёв Ярослав Олегович

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ
ОТ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ
ПРИ СВОДООБРАЗОВАНИИ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ**

Специальность 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук