

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»**  
**(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031  
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21  
E-mail: dou@pgups.ru; http://www.pgups.ru  
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,  
ИНН 7812009592/ КПП 783801001

22.11.2023 № 005.01.5-194  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
Г \_\_\_\_\_ Т \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по научной работе, д.т.н., профессор,  
Тамила Семеновна Титова



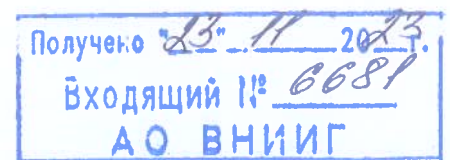
### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
Ярослава Олеговича Стахнёва, выполненную по теме  
**«Методика определения нагрузки от горного давления на подземные сооружения при сводообразовании в зависимости от прочности грунтов»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

**Актуальность темы исследования.** Определение горного давления является одной из основных проблем в тоннелестроении. По существу, нагрузка от горного давления на подземное сооружение – это отправная точка для проектирования обделки тоннеля, обеспечивающей его эксплуатационную надежность. Несмотря на многовековой опыт сооружения подземных сооружений, формирование теоретической базы для оценки силового взаимодействия сооружения с окружающим массивом горных пород насчитывает немногим более полутора веков.

Трудность данной задачи обусловлена сложностью физико-механических свойств горных пород и неопределенностью граничных условий. Имеющиеся сведения об авариях в тоннелях свидетельствуют о большом разнообразии форм обрушения горных пород, объема вывалов и размеров мульды оседания. Ответственность за принятые конструкции крепи подземных выработок слишком велика и ошибки в оценке нагрузки от горного давления недопустимы.

К настоящему времени опубликовано большое количество научных работ, посвященных проблеме определения горного давления и нагрузки на подземные сооружения. В то же время в практике проектирования транспортных тоннелей оценка нагрузки от горного давления на обделки устанавливается с использованием понятия коэффициента крепости, введенным в начале прошлого века М.М. Протодыяконовым.



Эта прогрессивная в свое время теория безусловно нуждается в совершенствовании и уточнении. Один из ее недостатков – отсутствие прямого учета параметров прочности горной породы. Установление коэффициента крепости в зависимости от параметров прочности не нашло убедительного подтверждения, кроме, разумеется, самой шкалы М.М. Протодяконова, которая и служит основным ориентиром для получения указанных эмпирических зависимостей. К этому следует добавить, что не получил достаточного обоснования и критерий, по которому при установлении нагрузки на обделку тоннеля разделяются схемы свода и столба обрушения. Поэтому разработка методики расчета нагрузки от горного давления с учетом характеристик прочности горной породы является, несомненно, актуальной задачей.

**Цель представленной диссертационной работы** как раз и заключается в разработке методики определения нагрузки от горного давления при сводообразовании в зависимости от характеристик прочности грунтов. Уточнение в отношении сводообразования корректно, поскольку и в теории М.М. Протодяконова, и по многочисленным наблюдениям образование свода обрушения – факт установленный.

**Практическая значимость исследований** усматривается в нескольких направлениях.

Во-первых, доказано, что для скальных и дисперсных грунтов должны применяться различные методы расчета горного давления

Во-вторых, доказано, что критической величиной для схемы обрушения является не глубина заложения тоннеля, как это считалось до сих пор, а ширина выработки. Даны численные значения критической ширины: при превышении первой критической ширины схема самонесущей выработки переходит в схему свода обрушения; при превышении второй критической ширины свод обрушения переходит в столб обрушения.

В-третьих, для скальных и дисперсных грунтов разработаны практические методики расчета нагрузки от горного давления в зависимости от прочности грунтов, т.е. достигнута заявленная цель диссертационной работы.

**Научная новизна работы.** Перечисленные выше пункты практической значимости являются в то же время новыми и в научном плане. Поэтому научная новизна работы может быть сформулирована следующим образом.

1. Разработаны новые методы расчета нагрузки от горного давления при сводообразовании в зависимости от прочности грунтов:

- для скальных грунтов – в рамках расчетной схемы В. Риттера;
- для полускальных – в рамках т.н. метода элементарного горизонтального слоя;
- для дисперсных – в рамках статики сыпучей среды.

2. Установлены критические величины ширины выработки, разграничивающие схемы свода обрушения и столба обрушения.

3. Выполнена взаимная верификация новых методов расчета, предложенных автором, и методов численного моделирования. Показано, что метод конечных элементов при решении задач об обрушении в скальных грунтах следу-

ет использовать с осторожностью. В то же время метод предельного анализа, реализованный в *Optim G2*, дает устойчивые результаты при вычислении предельного давления грунта на конструкции подземных сооружений.

**Степень обоснованности научных положений, сформулированных в диссертации.** Предложенные автором новые методы расчета являются теоретически обоснованными (в отличие от существующих нормативных) и не противоречащими существующим представлениям о совместной работе грунтов и подземных сооружений. Выводы, сделанные автором, прямо вытекают из полученных им в работе результатов.

**Достоверность результатов** обеспечивается следующим.

1. Использованная принципиальная схема В. Риттера анализируется в рамках статического равновесия. Автор включает в эту схему установленные зависимости предельных нормальных и касательных напряжений в соответствии паспортом прочности скальных грунтов, что вполне корректно.

2. Схема элементарного горизонтального слоя замыкается также уравнениями статического равновесия и условиями прочности.

3. Методы статики сыпучей среды не нуждаются в подтверждении – это классическая теория пластичности.

4. Выполненные сопоставления с численными методами и известными опытными данными ставят положительную точку в вопросе о достоверности полученных в диссертации результатов.

**Значимость для развития соответствующей отрасли науки.** Самое главное в представленной диссертационной работе – это то, что впервые предложено теоретическое обоснование теории сводообразования М.М. Протодьяконова – центральной теории в тоннелестроении и строительстве подземных сооружений, которая вот уже сто лет являлась практически безальтернативной при определении нагрузок на конструкции подземных сооружений – тоннелей, метрополитенов и т.д.

Фундаментальная гипотеза о сводообразовании, положенная в основу теории М.М. Протодьяконова, получила расчетное подтверждение, а сама теория тем самым приобретает характер системы расчетов, основанных на классических уравнениях геомеханики – уравнениях равновесия и законах прочности грунтов.

Важно отметить, что автор разделяет скальные грунты (условие прочности *Hoek-Brown*) и дисперсные (условие прочности Кулона-Мора). Это очень важный аспект исследований автора, поскольку скальные грунты могут работать на растяжение, хотя бы в небольшом диапазоне давлений, в то время как дисперсные на растяжение не работают в принципе. Отсюда и различные формы свода обрушения, и различные подходы к решению задач.

Большое значение имеет то, что автору удалось теоретически обосновать существование трех видов напряженного состояния грунта над выработкой – полностью устойчивое, свод обрушения и столб обрушения. На основании этого автор вводит понятие критических шири пролетов выработки (см. выше). Здесь отметим, что подобную гипотезу уже высказывал В.Д. Слесарёв, автор

гипотезы плит, однако он обосновывал это только опытными и практическими данными.

Внимания заслуживает ремарка, сделанная автором на 48 стр. Это касается переосмысления подходов к понятию свода обрушения при больших значениях коэффициента крепости. Так, автор пишет: «при  $f = 10$  правильно говорить об очень пологом своде или о практически горизонтальном "потолке"?» Действительно, в СП 120 и СП 122 говорится, что при соотношении  $h/L < 1/6$  обделку тоннелей следует рассчитывать уже не по схеме свода обрушения, а на воздействие местного вывала. Это указание прямо вытекает из практического опыта строительства подземных сооружений, а в работе Я.О. Стахнева оно получило теоретическое обоснование.

Таким образом, можно констатировать, что данная работа имеет большое значение для геомеханики, геотехники и теории и практики подземного строительства. Полученные автором решения имеют, на наш взгляд, большие перспективы для дальнейшего развития.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.** Рекомендации в принципе просты – предложенные Я.О. Стахневым методы расчета следует использовать в реальном проектировании и могут быть включены в нормативные документы, в частности, в СП 120 и СП 122 в разделы, посвященные определению нагрузок на конструкции тоннелей.

Прежде всего, рекомендуется обратить внимание на критерий, разграничивающий схемы свода и столба обрушения. Это – важнейший вопрос, и для его решения, по-видимому, следует организовать специальный научно-практический семинар представительного состава с привлечением специалистов институтов, занимающихся разработкой нормативной документации.

Если данный критерий будет утвержден, можно переходить к совершенствованию нормативных документов, регламентирующих проектирование тоннельных обделок. В процессе этой работы наверняка появятся и новые предложения, и новые решения. Однако, отправная точка – это сегодняшняя работа Я.О. Стахнева.

Далее, что касается непосредственного расчета вертикального давления на конструкции подземных сооружений, то здесь непосредственно можно использовать графики, представленные на рис. 3.24 для скальных грунтов и на рис. 2.17 для дисперсных. Единственное, что следует добавить к этим данным – это коэффициенты запаса и учет влияния трещиноватости.

С точки зрения практики также значение имеют и выполненные автором численные расчеты. В частности, для скальных грунтов подобные задачи можно решать, используя метод предельного анализа (ПК *Optum G2*). При этом полностью переходить на численные решения, по всей видимости, еще рано, процесс принципиальной верификации численных методов применительно к задачам о горном давлении еще далек от завершения.

Итак, полученные автором результаты могут быть использованы и непосредственно для расчета и проектирования подземных сооружений, и рекомен-

дованы к включению в нормативные документы, прежде всего, в СП 120 и СП 122.

## Структура и содержание работы

**В первой главе** дается общая характеристика вопроса и содержатся сведения о существующих методах расчета горного давления.

Автором проработан большой объем публикаций по исследуемой проблеме и дан критический анализ состояния вопроса определения нагрузки от горного давления на подземные сооружения.

Приводятся сведения о классических решениях по горному давлению, которые нашли широкое применение в горном деле для выработок глубокого заложения. Это решения Р. Феннера, В.Д. Слесарева, К.В. Руппенейта и мн. др., в которых рассматриваются зоны упругих и пластических деформаций, поднимаются вопросы учета податливости крепи.

Особое внимание автор уделяет специальному направлению в области исследования горного давления, в котором взаимодействие горной породы и крепи подземной выработки выражается в виде нагрузки от горного давления. Именно здесь появляются понятия купол обрушения, или свод естественного равновесия, и столб обрушения. По существу пионерные работы в этом направлении В. Риттера и особенно М.М. Протодьяконова до сих пор находят широкое применение. Нормативная методика, построенная на идеях М.М. Протодьяконова, основана на использовании понятия коэффициента крепости породы.

Детальный анализ понятия коэффициента крепости показал отсутствие общепринятого метода его определения за исключением специальной таблицы, где его значениям отвечает общее описание горных пород. И зарубежные исследования не внесли в это понятие конкретного содержания.

Отдельно даются сведения по статике сыпучей среды, необходимой для работы с дисперсными грунтами.

Из обзора литературы естественно следует постановка задачи определения нагрузки от горного давления на подземные сооружения в зависимости от параметров прочности горных пород, что и принято как цель диссертации.

**Вторая глава** посвящена изложению разработанных автором методов расчета нагрузки от горного давления.

В начале главы дается общая постановка задачи и формулируются основные положения. Прежде всего, выделяются три группы грунтов – скальные, полускальные и дисперсные, для которых будут приняты различные расчетные схемы. Далее, принимаются к исследованию схемы предельного равновесия в виде свода и столба обрушения.

Для скальных грунтов схема свода обрушения описывается аналитическими выражениями с использованием стандартного условия прочности и, соответственно, параметров прочности. При анализе результатов автором было выявлено существование двух критических пролетов выработки, разграничивающих схемы свода и столба обрушения.

Для полускальных грунтов автор применяет метод предельного равновесия с использованием метода горизонтального слоя. Анализ выполнялся для различных коэффициентов бокового давления грунта, и результат оказался качественно схожим с предыдущим случаем, т.е. подтвердилось наличие критических пролетов выработки.

Для дисперсных эта же качественная картина была получена совершенно иным расчетным путем, а именно построением решения в рамках краевых задач статики сыпучей среды.

Следует отметить, что все методы расчета изложены достаточно полно с обоснованием исходных расчетных схем.

**Третья глава** – это описание результатов численных решений, выполненных с применением современных программных комплексов. Один программный комплекс – MIDAS, в рамках которого реализуется в классическом варианте метод конечных элементов (МКЭ). Другой комплекс – Optum G2, реализующий метод предельного анализа (МПА), представляет особый интерес. В этом комплексе предельная нагрузка устанавливается методами нелинейного программирования. Его отличительная особенность в том, что, в отличие от МКЭ, уравнения статического равновесия непосредственно участвуют в вычислительном процессе. Соответственно, и полученные автором результаты в некотором смысле ожидаемы.

Итак, автором было выполнено численное моделирование процесса формирования нагрузки от горного давления. В соответствии с поставленной задачей были назначены размеры расчетной области и определены граничные условия, в том числе и нагружения (в данном случае разгрузки). Для скальных грунтов использовалась модель Хоек-Браун, для дисперсных – Кулон-Мор. Решения МКЭ показали существенное расхождение с аналитическими решениями автора, а решения МПА оказались близки к ним. Сделанный вывод о практической применимости авторских решений и моделирования МПА представляется совершенно обоснованным.

**В четвертой главе** даются результаты сопоставительных расчетов, проведенных по предложенным методикам и по нормативным документам. Наряду с совпадением результатов, наблюдалось и различие. Поэтому автором приводятся результаты сопоставления расчетов по указанным методикам и опытным данным, полученным другими авторами (В.Н. Пригожиным и Е.С. Денисовым). Здесь более согласованными оказались авторские результаты.

Несомненный интерес представляет приведенный анализ моделирования процесса обрушения кровли выработки, выполненный методом дискретных элементов для дисперсных грунтов. Результаты этого моделирования неплохо подтвердили решения о горном давлении, полученные автором методами статики сыпучей среды.

Безусловно, большой интерес представляет описанная в заключении этой главы авария на одном из реальных объектов, подтвержденная авторскими расчетами.

**В пятой главе** даются рекомендации по использованию разработанных в диссертации методов расчета. Приводятся расчетные формулы, графики и алгоритмы расчетов.

### **По работе можно высказать следующие вопросы и замечания.**

1. Наиболее важные с практической точки зрения графики представлены на рис. 3.24. Но при этом не дается достаточно убедительного обоснования относительного того, какой же из графиков следует использовать в практических расчетах – из решения для скальных грунтов? Если из решения для полускальных грунтов, то с каким коэффициентом бокового давления? Или, может быть, в принципе, имеет смысл применять метод предельного анализа?

2. Решение для дисперсных грунтов осуществлялось по двум схемам, которые автор назвал «ТПРГ-1» и «ТПРГ-2». Впоследствии, на основании сопоставлений с численными решениями, от схемы «ТПРГ-2» автор фактически отказался. Стоило ли вообще приводить эту схему?

3. В главе 5, где приводятся практические методики расчета, автор предлагает в качестве нагрузки на крепь применять величины давления, получаемые из решений (т.е. с учетом сил сопротивления грунта по контуру свода обрушения). Правильнее было бы в соответствии со схемами, разработанными в диссертации, вычислять высоту  $h$  свода обрушения, а давление на крепь определять как  $p = \gamma h$ , что даст запас прочности, всегда нелишний в подземном строительстве.

### **Заключение**

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки представленной диссертационной работы.

Автореферат диссертации отражает ее содержание и дает представление обо всех основных научных положениях работы.

Публикации автора – 9, в том числе 3 в журналах перечня ВАК РФ, 2 публикации, индексируемые МБД – также в достаточной мере дают представление о содержании работы.

Сама диссертация соответствует паспорту специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения – в частности, пунктам 2, 3 и 9.

Оформление работы соответствует требованиям ГОСТ по оформлению диссертаций.

Таким образом, диссертация Ярослава Олеговича Стахнёва «Методика определения нагрузки от горного давления на подземные сооружения при сводообразовании в зависимости от прочности грунтов» является завершённой научно-квалификационной, в которой содержится решение задачи определения нагрузок на конструкции подземных сооружений в скальных и дисперсных грунтах, имеющей значение для развития геотехники, геомеханики, подземного строительства, тоннеле- и метростроения.

Считаем, что рассматриваемая диссертационная работа соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Стахнёв Ярослав Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Тоннели и метрополитены» ПГУПС от 16.11.2023, протокол № 6.

Заведующий кафедрой  
«Тоннели и метрополитены»,  
Д.т.н, профессор

Александр Петрович Ледяев

Доцент кафедры  
«Тоннели и метрополитены»  
К.т.н., доцент

Владимир Николаевич Кавказский

Я, Титова Тамила Семеновна, доктор технических наук, профессор, Первый проректор-проректор по научной работе, заведующая кафедрой «Техносферная и экологическая безопасность» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 25.00.36 «Геоэкология» даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Стахнёва Ярослава Олеговича, и их дальнейшую обработку.

Д.т.н., профессор

Тамила Семеновна Титова