

На правах рукописи



МИНИН КИРИЛЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Зерцалов Михаил Григорьевич

Официальные оппоненты: **Еременко Виталий Андреевич**
доктор технических наук,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии»

Титов Евгений Юрьевич
кандидат технических наук,
акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»,
заместитель председателя – ученый секретарь аппарата объединенного ученого совета
ОАО «РЖД»

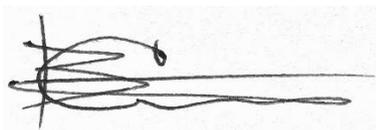
Ведущая организация **АО «Научно-исследовательский центр «Строительство»**

Защита состоится 14 февраля 2024 г. в 12.00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, зал Учёного Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ МГСУ и на сайте: <http://www.mgsu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сидоров
Виталий Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При расчёте взаимодействия инженерных сооружений со скальным массивом, как правило, приходится сталкиваться с проблемой определения механических характеристик горных пород. Представление скальных массивов, как среды, для описания деформирования которой всегда можно использовать зависимости механики сплошной среды, в большинстве случаев неправомерно.

Скальные массивы обычно имеют сложную структуру, часто обладают неоднородностью строения и анизотропией, а также, как правило, характеризуются высокой степенью трещиноватости. Это приводит к появлению масштабного эффекта, который выражается в том, что при изменении размеров исследуемого объёма массива его физико – механические характеристики могут существенно измениться. Одним из важнейших свойств скального массива, с практической точки зрения, является его способность деформироваться под нагрузкой, поэтому без знания значения модуля деформации скального массива невозможно изучение его взаимодействия с инженерными сооружениями.

В нашей стране и за рубежом проблемой деформирования трещиноватых скальных массивов занимались такие ученые как: К.В. Руппенейт, С.Б. Ухов, Э.Г. Газиев, Ю.К. Зарецкий, В.И. Шейнин, И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, Н.С. Булычёв, М.Г. Зерцалов, А.Н. Власов, В.И. Речицкий, В.П. Мерзляков, N. Barton, Z. Beniawski, R. Goodman, H. Einstein, E. Hoek, L. Zhang и др. На результатах их исследований основаны многие методы определения модуля деформации скальных массивов (аналитические, численные, эмпирические). Тем не менее, благодаря наличию масштабного эффекта указанная проблема до настоящего времени окончательно не решена. В то же время, современные численные методы решения и возможности компьютерной техники позволяют на основе разработанных моделей более широко исследовать поведение нарушенных скальных массивов, в том числе при взаимодействии с подземными сооружениями. Современные программы комплексы позволяют воспроизвести практически любой скальный массив с учётом его трещиноватости, структурной

неоднородности и анизотропии.

В настоящее время используются прямые и косвенные методы определения деформационных характеристик скального массива. Прямые методы включают полевые испытания пород и лабораторные испытания образцов.

Полевые методы определения механических характеристик скального массива позволяют исследовать небольшие по сравнению с размерами сооружений объёмы пород. Наличие масштабного эффекта, вызываемого структурной неоднородностью пород, как уже указывалось, ограничивает использование экспериментальных методов исследования, поскольку экстраполяция результатов мелкомасштабных испытаний на большие объёмы массива может привести к значительному расхождению с реальными значениями определяемых механических характеристик. Эта тенденция особенно заметна при строительстве крупноразмерных сооружений в горных районах, вовлекающих в работу большие объёмы скального грунта, таких, как объекты энергетической и транспортной инфраструктуры. Помимо этого, полевые методы имеют большой разброс из-за трещиноватости, неоднородности и анизотропии скальных массивов, а также из-за конструктивных особенностей испытательного оборудования и измерительной аппаратуры. Следует также учитывать, что проведение натурных опытов в полевых условиях достаточно трудоёмко и требует больших финансовых затрат.

Прямые исследования деформационных характеристик скальных массивов в лабораторных условиях невозможны в связи с неоднородностью свойств и наличием разного порядка трещин.

Косвенные методы определения механических характеристик скальных массивов можно разделить на эмпирические и аналитические.

Эмпирические методы базируются на использовании общепринятых классификационных системах, таких как *RQD* [34,36], *RMR* [33], *Q* [31] и *GSI* [44], не имеющих размерности и отражающих состояние и свойства массивов в неявном виде. Это позволяет подобрать эмпирические зависимости, связывающие

указанные показатели с реальными значениями модуля деформации – E_m .

Эмпирические методы позволяют произвести первый/оценочный расчёт характеристик массива, использование различных классификационных систем при определении свойств скального массива на одной площадке может привести к значительному разбросу данных [65].

Для случаев, когда объём исследуемой области можно рассматривать квазиоднородный, квазисплошной и квазиупругой средой (для которой применимы закономерности механики сплошной среды), возможно использовать аналитические методы определения деформационных свойств массива.

У аналитических методов есть допущение, при котором происходит усреднение распределений напряжений и деформаций по рассматриваемому объёму.

Как показывает практика и результаты испытаний [19,23,32,38], деформирование трещиноватых скальных массивов нелинейно. Неучёт нелинейности деформирования может существенно исказить напряженно деформирование состояние массива и рассматриваемого подземного сооружения.

Таким образом, проблема определения эффективных деформационных характеристик трещиноватых скальных массивов для использования при проектировании и строительстве подземных сооружений требует дальнейшего развития.

В работе рассматривается метод определения модуля деформации блочных скальных массивов, ослабленных системой взаимно-ортогональных трещин, которые части встречаются в практике строительства подземных сооружений. Метод учитывает нелинейность кривой деформирования скального массива $\sigma = f(\epsilon)$ в условиях одноосного сжатия. Учёт нелинейности деформирования путем учёта значений деформационных характеристик, как скальных блоков, так и межблочных трещин, позволяет более обоснованно определять модуль деформации, принимая во внимание его возрастание при увеличении сжимающей нагрузки. Исследования блочной среды, ослабленной трещинами, базируется на

трудах С.Б. Ухова, В.П. Мерзлякова, А.Н. Власова, В.В. Семенова, М.Г. Зерцалова, Б.Э. Сакания.

Личный вклад автора заключается в разработке нелинейной модели деформирования трещиноватых блочных скальных массивов при разных уровнях нагружения.

Рассмотренный метод определения деформационных характеристик скальных массивов предлагается для использования при решении практических задач взаимодействия подземных сооружений с вмещающим массивом. Предложенный метод позволяет получить более объективное НДС системы «подземное сооружение-скальный массив».

Степень разработанности темы. Как уже указывалось выше, изучением характеристик скального массива занимались многие отечественные ученые: С.Б. Ухов, Э.Г. Газиев, Б.Д. Зеленский, В.П. Мерзляков, А.Н. Власов, М.Г. Зерцалов, И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, Н.С. Булыгчёв, В.И. Речицкий, Р.А. Ширяев, Б.А. Урастембеков, Ю.Б. Мгабелов, И.А. Савич и др. За рубежом этим вопросом занимались R. Goodman, E. Hoek, E. Brown, M. Diederichs, L. Zhang, H. Einstein, Z. Bieniawski, N. Barton, R. Yoshinaka, T. Yamabe, M. Ebadi, S. Bandis, K. Fukushima, C. Zangerl, P. Kulatilake и др. исследователи.

Цель диссертационной работы является разработка нелинейной модели деформирования трещиноватых блочных скальных массивов при разных уровнях нагружения.

Задачи диссертационной работы. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнить анализ существующих методов определения деформационных характеристик скальных массивов;
- выбрать параметры, влияющие на изменения модуля деформации трещиноватого скального массива, пределы их варьирования;
- разработать схемы испытаний на основе численного моделирования фрагментов скальных массивов;

- провести исследования с использованием численного моделирования на основе МКЭ с применением метода планирования эксперимента (МПЭ);
- разработать метод определения деформационных характеристик скального массива в пределах первого нелинейного участка на основании работ S. Bandis, R. R. Goodman и А.Н. Власова;
- получить уравнение регрессии для определения модуля деформации фрагмента скального массива в пределах второго линейного участка его деформирования;
- привести примеры использования предложенного метода определения деформационных характеристик скального массива при решении задач взаимодействия подземного сооружения с вмещающим массивом.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан метод определения деформационных характеристик скальных массивов, учитывающий нелинейность их деформирования и позволяющий расчётным путём смоделировать кривую $\sigma = f(\varepsilon)$, аналогичную кривой, построенной по результатам натуральных штамповых испытаний. При построении кривой учитывались три основных фактора, определяющие значение модуля деформации скального массива: модуль упругости скальной отдельности (блока) - $E_{бл}$, показатель качества скального массива, учитывающий его трещиноватость – RQD и значения нормальной и касательной жёсткостей межблочных трещин (трещины) - K_n и K_s .

2. Разработана методика расчётного определения начальных нормальной и касательной жесткостей, позволяющая учесть изменение деформационных характеристик межблочных трещин и, тем самым, нелинейность кривой деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$ на первом участке.

3. Разработанный в диссертации метод построения кривой деформирования скального массива $\sigma = f(\varepsilon)$ по, определённым экспериментально, значениям $E_{бл}$ и RQD и, предложенным в работе расчётным формулам, значений K_n и K_s , позволяет учесть изменение величины модуля деформации с

увеличением напряжений в массиве. Это, в свою очередь, позволяет учесть влияние условий заложения и геометрических характеристик подземных сооружений на НДС системы «тоннель - скальный массив».

4. Разработана методика, основанная на принципах линейной механики разрушений, для расчёта трещиностойкости фибробетонных обделок тоннелей, возводимых горным способом в скальных грунтах.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Все, используемые в настоящее время в инженерной практике методы определения модуля деформации скальных трещиноватых массивов, рассматривают их как линейно деформируемую среду, характеризуемую постоянным модулем деформации.

Теоретическая значимость работы заключается:

1. В определении факторов и параметров, определяющих значение модуля деформации скального массива.

2. В разработке нелинейной модели деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$, позволяющей учитывать изменение величины модуля деформации массива в зависимости от изменения его НДС при варьировании глубины заложения сооружения и его геометрических размеров.

3. В разработке методики расчёта трещиностойкости обделки подземных сооружений транспортного назначения с использованием линейной механики разрушения, которая может быть использована для анализа трещинообразования в обделках сводчатого очертания.

Практическая значимость заключается в том, что разработанная методика построения нелинейной модели деформирования скального массива позволяет более точно определять его расчётный модуль деформации в зависимости от изменения НДС массива, что способствует получению более рациональных конструктивных решений.

Методология и методы исследования. Исследования проведены с использованием численного моделирования на базе метода конечных элементов (далее МКЭ) с использованием регрессионного анализа (метода планирования

эксперимента).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований влияния частоты трещин, модуля упругости скальной отдельности, нормальной и касательной жесткостей на модуль деформации скального массива в пределах первого участка его деформирования.

2. Уточнены значения критерия квазисплошности и размеров, определяющих представительность расчётного фрагмента скального массива.

3. Результаты исследований влияния частоты трещин, модуля упругости скальной отдельности и угла наклона системы трещин к направлению действия приложенной нагрузки на модуль деформации скального массива в пределах второго участка его деформирования.

4. Исследование влияния глубины заложения и размеров подземных выработок на величину модуля деформации вмещающего их скального массива.

5. Применение разработанного метода определения модуля деформации скального массива при исследовании работы фибробетонных обделок подземных сооружений, зарекомендовавших себя при строительстве объектов метро- и тоннелестроения в Российской Федерации (замковые блоки из сталефибробетона в перегонных тоннелях Московского метрополитена, опытный участок сборной обделки в Санкт-Петербурге, монолитная сталефибробетонная обделка в перегонном тоннеле между станциями «Киевская» и «Парк Победы» Московского метрополитена).

6. Разработка метода расчёта трещинообразования и трещиностойкости фибробетонных обделок подземных сооружений транспортного назначения.

Степень достоверности результатов обоснована их сопоставлением с результатами опубликованных аналитических решений и экспериментальных исследований, а также использованием сертифицированного программного комплекса при выполнении численных расчётов.

Апробация работы.

Результаты исследований и основные научные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на всероссийских и

международных конференциях и семинарах:

– доклад на тему: «Фибробетонные обделки безнапорных гидротехнических тоннелей в скальных грунтах и расчёт их трещиностойкости» на IV Всероссийском научно-практическом семинаре «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства», Московский Государственный Строительный университет, 26 мая 2021 г., г. Москва, Россия;

– доклад на тему: «Расчёт на трещиностойкость фибробетонных обделок транспортных тоннелей, возводимых горным способом в скальных грунтах» на II Всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территории», 26-28 мая 2021 г., г. Пермь, Россия;

– доклад на тему: «Численное моделирование при определении деформационных характеристик трещиноватых скальных массивов» на международной научно-технической конференции по Геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчетов» (GFAC 2021), 21-29 октября 2021 г., г. Санкт-Петербург, Россия;

– доклад на тему: «Determination of deformation characteristics of rock mass using numerical modeling» на II научной конференции «Моделирование и методы структурного анализа», 11-13 ноября 2022 г., г. Москва, Россия;

– доклад на тему: «Использование линейной механики разрушений при расчёте трещиностойкости фибробетонных обделок транспортных тоннелей» на XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, 15-17 ноября 2022 г., г. Москва, Россия.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, в том числе из которых 3 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень

рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), и 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объём диссертации составляет 117 страниц, включающий в себя 41 рисунок, 17 таблиц. Список литературы содержит 65 наименования, в том числе 35 иностранных источников.

Работа выполнена на кафедре Механики грунтов и геотехники ФГБОУ ВО «НИУ Московский государственный строительный университет» в период обучения в аспирантуре в 2018-2023 годах под руководством профессора, доктора технических наук М.Г. Зерцалова, которому автор выражает искреннюю благодарность за неоценимую помощь в работе над диссертацией.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры Механики грунтов и геотехники, а также ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» за советы и консультации, полученные автором в процессе подготовки диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель и задачи научного исследования, отмечены новизна и теоретическая и практическая ценность работы.

Первая глава диссертации посвящена описанию особенностей строения, структуры и анализу существующих методов определения деформационных характеристик скальных массивов.

Существующие методы скальный объём рассматривают условно сплошной, однородной средой, однако не учитывают критерий, при котором может быть принято указанной допущение.

Механические характеристики, определяемые рассмотренными методами,

рассчитываются из допущения линейного деформирования массива при увеличении нагрузки. В то же время, экспериментальные исследования показывают, что из-за наличия структурных особенностей и трещиноватости скальные массивы деформируются существенно нелинейно.

Кривую деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$ с достаточной точностью можно разделить на три участка (рис. 1).

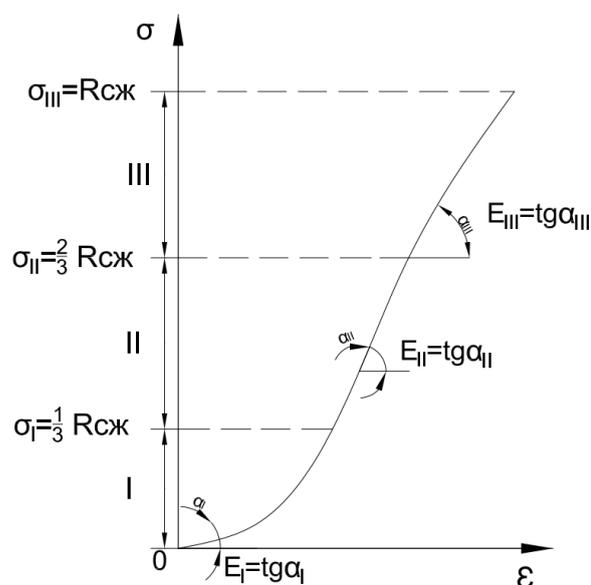


Рис. 1. Типичная кривая деформирования скальных массивов при одноосном сжатии

Граница первого участка кривой деформирования определяется ориентировочно величиной напряжений сжатия, равной $1/3$ прочности на одноосное сжатие скальной отдельности ($\sigma_1 = \frac{1}{3} R_{сж}$). Аналогично, граница второго участка соответствует напряжению, значение которого равно, также ориентировочно, $2/3$ прочности на одноосное сжатие скальной отдельности.

Во второй главе представлена методика проведения исследований.

Наиболее эффективным способом решения геомеханических и геотехнических задач, связанных с определением изменения НДС грунтового массива и подземных сооружений является МКЭ.

Исследования и реализация МКЭ выполнялись на базе современной и сертифицированной в РФ компьютерной программе геотехнических расчетов ZSoil 20.08 (Швейцария).

Совместное использование МКЭ и МПЭ позволяет учитывать разнообразные факторы и от решения частной задачи перейти к общему решению задачи с получением конкретных зависимостей в виде уравнений регрессии.

Задача определения деформирования трещиноватых скальных массивов решалась численным методом в условиях упругой двухмерной задачи. В исследованиях рассматривались фрагменты, размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ и $5 \times 2 \text{ м}^2$ (рис. 2), которые в процессе численного моделирования нагружались ступенями распределенной нагрузки. При решении задачи использовалась сетка 4-х угольных конечных элементов, моделирующих линейное деформирование скальных отдельностей (блоков). Для учета деформаций блоков по межблочным трещинам в теле фрагмента использовались контактные элементы, значение нормальной жесткости которых принимались на основании опытных данных, полученных В.И. Речицким, S. Bandis, A. Lumsden и N. Barton. Касательная жесткость посчитывалась по формуле теории упругости. Граничные условия задавались стандартным образом — путем фиксации боковых границ геометрической модели (отсутствие горизонтальных перемещений), и нижней границы (отсутствие горизонтальных и вертикальных перемещений).

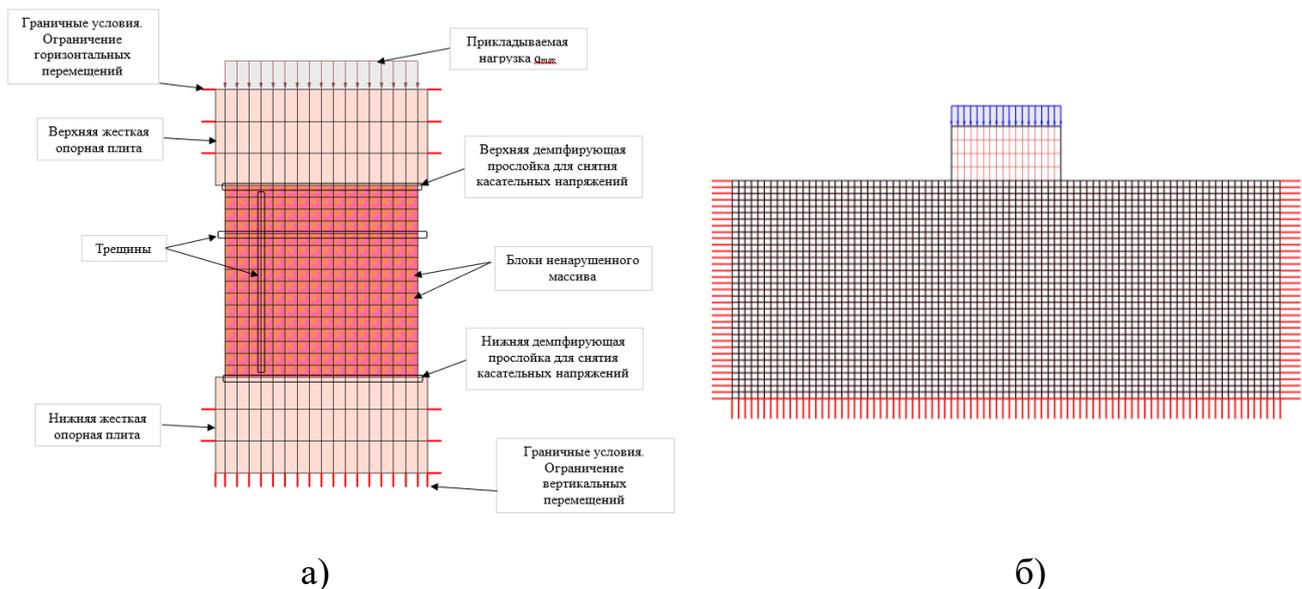


Рис. 2. Расчётные модели (а – блочный фрагмент размером $1 \times 1 \text{ м}^2$, б – блочный фрагмент размером $5 \times 2 \text{ м}^2$)

Исследовались случаи при следующих соотношениях ширины штампа – В к

ширине блока – b : $V/b = 8, 11, 18, 27$, что соответствовало значениям RQD : 85, 75, 50, 25, при этом, угол наклона одной из систем трещин также менялся и соответственно имел значения: $0^\circ, 22^\circ 30', 45^\circ$.

В работе также исследовалась задача определения НДС системы «подземное сооружение – скальный массив» в условиях плоской задачи (плоской деформации). Моделирование взаимодействия обделки подземного сооружения со скальным массивом выполнялось с использованием, упомянутого выше, контактного элемента. В качестве критерия прочности скального массива принимался критерий Ноек-Браун.

Третья глава посвящена анализу результатов исследований численных моделей скального массива при изменении граничных условий расчётных фрагментов. На основе анализа в работе предложен способ подсчета модулей деформации, как для блочных фрагментов в условиях одноосного сжатия (рис. 2 а), так и блочных массивов при штамповых испытаниях (рис. 2 б).

Первоначально, исследования деформирования образца трещиноватого скального массива проводились в условиях упругой задачи на фрагментах, ослабленных системой взаимно ортогональных трещин, в которых одна из систем была параллельна сжимающей нагрузке при условии ограничения смещений боковых граней фрагмента (условия одометра) (рис. 2 а).

Сопоставление полученных результатов проведённых исследований позволило оценить обоснованность и точность аналитического решения, предложенного А.Н. Власовым. Точность сходимости результатов аналитических и численных расчётов уменьшается в пределах $3,4\% - 13,8\%$ с уменьшением значений отношения ширины штампа к ширине скального блока - V/b и увеличением значений деформационных характеристик скальных отдельностей и трещин.

В процессе исследований были определены предельные значения отношения - V/b , при дальнейшем уменьшении которых (критерии квазисплошности массива) скальный массив нельзя рассматривать, при принятой инженерной точности расчётов 10% , как условно сплошной, и, следовательно,

основания, ослабленные, как и в предыдущем случае, двумя системами взаимно ортогональных трещин, ориентированных к направлению действия силы под углами: 0° $22^\circ 30'$ и 45° (рис. 4).

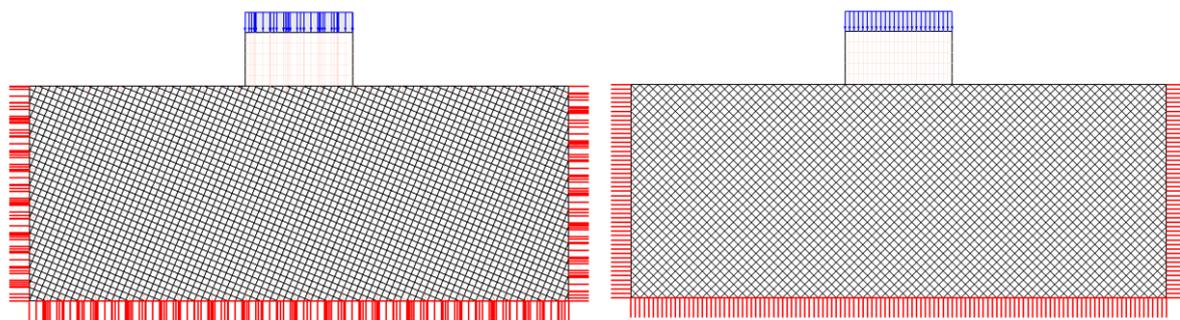


Рис. 4. Штамповые испытания: а - 23° б - 45°

Результаты численного моделирования методической серии опытов сопоставлялись, с результатами аналитических расчётов по зависимости, предложенной R. Yoshinaka и T. Yamabe. Сравнение результатов показало их расхождение в пределах 15 – 40%. Анализ деформирования основания штампов позволил установить причину такого различия результатов. При увеличении нагрузки на штампы межблочные швы начинали раскрываться, нарушая сплошность основания.

Выявленные в результате испытаний нарушения сплошности блочных массивов свидетельствует о неправомерности использования зависимостей механики сплошной упругой среды при определении модуля деформации блочных сред, ослабленных системами трещин, ориентированных под углом к направлению действия силы. Это показало необходимость проведения дополнительных исследований, для определения модуля деформации блочной среды, учитывающих раскрытие межблочных швов.

В четвертой главе исследуется нелинейный характер деформирования скальных трещиноватых массивов в пределах первых двух участков кривой $\sigma = f(\varepsilon)$. На основании полученных результатов предлагается метод, учитывающий эту нелинейность деформирования и позволяющий расчётным путём смоделировать кривую $\sigma = f(\varepsilon)$, аналогичной кривой, построенной по результатам натуральных штамповых испытаний.

Построение расчётной кривой деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$ скальных массивов

производится на первых двух участках. Построение графика кривой $\sigma = f(\varepsilon)$ на третьем участке в работе не рассматривается, так как сложность процесса деформирования скального массива на этом участке, требует проведения отдельных исследований. Кроме того, численные расчёты и инженерная практика показали, что при взаимодействии многих инженерных сооружений со скальными грунтами, в частности, подземных сооружений, в подавляющем большинстве случаев, напряжённое состояние, формируемое в скальном массиве, характеризуется напряжениями, не превышающими уровень напряжений, соответствующих второму (упругому) участку кривой деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$.

При построении графика $\sigma = f(\varepsilon)$ учитывались критерий квазисплошности массива, путем ввода показателя качества скального массива RQD и упругих характеристик структурных элементов массива. В данном случае, к ним относились: модуль упругости скальных отдельностей (E_0) и нормальная жёсткость трещин (k_n).

Построение графика кривой зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ на первом нелинейном участке выполнено с использованием эмпирического уравнения кривой, предложенного R. Goodman, зависимостей S. Bandis, L. Zhang и зависимости $k_{ni} = f(V_m)$, построенной соискателем на основании результатов исследования В.И. Речицкого, S. Bandis, C. Zangerl, P. Kulatilake. Сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований показали хорошую сходимость (рис. 5).

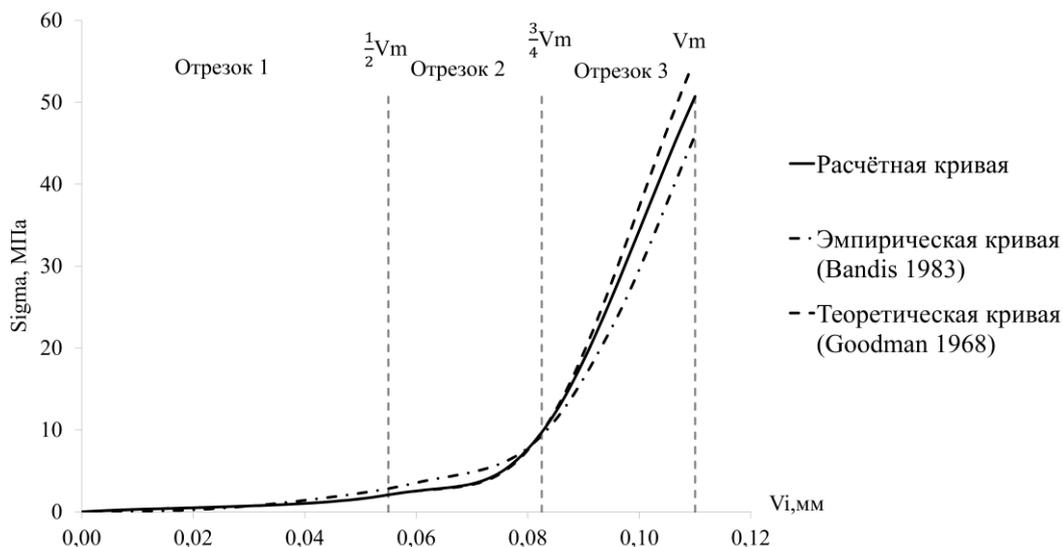


Рис. 5. Сопоставление теоретической, расчётной и экспериментальной кривых

$$\sigma = f(V_i)$$

Зная значения k_n и σ_n , по построенным кривым в пределах первого участка деформирования можно определять текущие значения его модуля - E_m , используя формулу А.Н. Власова (1):

$$E_m = \frac{lk_n E_0}{lk_n + E_0} \quad (1)$$

где l – расстояние между трещинами, определяющее размер блока.

Для построения графика зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ на втором линейном участке деформирования, учитывая расхождение результатов предварительного исследования штамповых опытов с результатами, полученными с использованием аналитических зависимостей механики сплошной среды, было принято решение провести полную серию численных экспериментов на штамповых моделях согласно сформированной матрицы планирования эксперимента с учётом раскрытия межблочных швов.

В качестве независимых варьируемых факторов эксперимента были выбраны факторы, оказывающие наибольшее влияния на деформируемость скального массива:

- модуль упругости скальной отдельности (блока) - E_0 ,
- показатель качества скального массива – RQD ,
- угол наклона системы взаимно ортогональных трещин к направлению действия приложенной на штамп нагрузки – α .

Так как, к началу указанного участка трещины в массиве смыкаются, и блочная среда начинает деформироваться линейно, значения нормальной жёсткости k_n в пределах второго участка остаются постоянными и определяется по формуле (2):

$$k_n = \frac{\sigma_1}{v_{max}} \quad (2)$$

где σ_1 = напряжение в конце первого (начале второго) участка деформирования - $\sigma_1 = \frac{1}{3} R_{сж}$, v_{max} – максимальная величина смыкания трещин,

принятая по результатам исследования S. Bandis.

Значения независимых параметров варьировались в следующих пределах: $E_0 = 1000 - 100000$ МПа, $RQD = 25 - 85\%$, угол $\alpha = 0^\circ - 45^\circ$. С учётом этих факторов строилась матрица планирования численных экспериментов. Для каждого численного расчёта, определяемого матрицей планирования, по формуле (2) определялось значение k_n .

При угле наклона α одной из систем трещин к направлению нагрузки начинается относительный сдвиг скальных блоков по сомкнутым межблочным трещинам и значение текущей нормальной жёсткости трещин k_n в пределах второго участка подсчитывается по формуле R. Yoshinaka (3):

$$k_n^\alpha = k_n \sin \alpha \quad (3)$$

Поскольку задача решается в упругой постановке, при моделировании сдвига блоков по межблочным плоскостям трещин, значения касательной жёсткости k_s подсчитывалось по формуле теории упругости (4):

$$k_s = \frac{k_n}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

На основании результатов расчётов, выполненных в соответствии с МПЭ, было получено уравнение регрессии (5):

$$E_m = 11227 + 4107 \times \frac{RQD-55}{30} + 10703.3 \times \frac{E_0-50500}{49500} - 2056.8 \times \frac{\alpha-22.5}{22.5} + 3860.1 \times \frac{RQD-55}{30} \times \frac{E_0-50500}{49500} - 1418.2 \times \frac{RQD-55}{30} \times \frac{\alpha-22.5}{22.5} - 2008.7 \times \frac{E_0-50500}{49500} \times \frac{\alpha-22.5}{22.5} - 1382.4 \times \frac{RQD-55}{30} \times \frac{E_0-50500}{49500} \times \frac{\alpha-22.5}{22.5} \quad (5)$$

Выполненная проверка адекватности уравнения показала статическую значимость уравнения, установлено, что не менее 85% общей вариабельностью функции $Y (E_m)$ объясняется изменением факторов X_i . Из этого следует, что точность определения модуля деформации штампа по уравнению регрессии соответствует инженерной точности расчётов (15% - 20%) и может быть использовано для оценки деформационных характеристик скальных массивов.

На рисунке 6 представлено сравнение графиков, построенных по предложенную методу, с графиками, построенными по эмпирическим линейным

зависимостям, связывающим значение E_m с различными показателями классификационных систем скальных массивов.

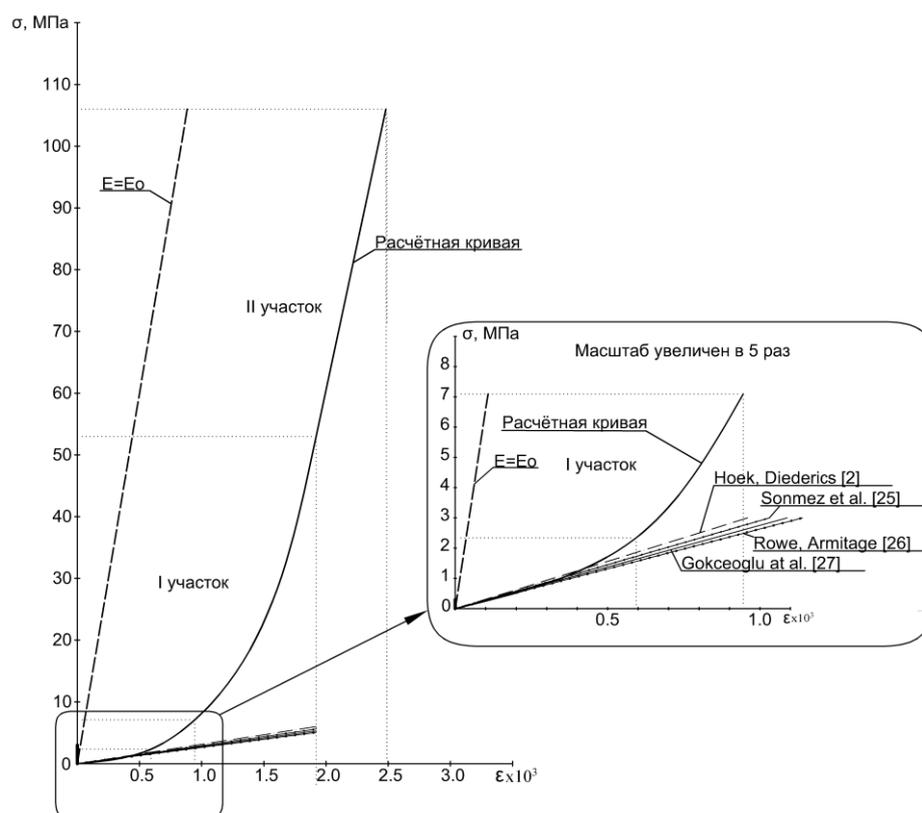


Рис. 6. Сопоставление расчётной кривой и эмпирических кривых $\sigma = f(\varepsilon)$.

Сравнение показывает хорошую сходимость расчётной кривой и эмпирических кривых на начальном этапе деформирования скального массива и указывает на то, что эмпирические зависимости дают заниженные значения модуля деформации, поскольку показатели классификационных систем скальных массивов определяются в их естественном ненагруженном состоянии.

Предлагаемый метод позволяет расчётным путём смоделировать реальный натурный эксперимент и, на основании полученных результатов, построить кривую деформирования скального массива $\sigma = f(\varepsilon)$, ослабленного системой взаимно ортогональных трещин, при одноосном сжатии в пределах первых двух участков кривой. При этом, учитываются, как масштабный эффект, так и деформационные характеристики блоков и межблочных трещин.

В пятой главе представлено использование предложенного метода определения деформационных характеристик скальных массивов при

исследовании работы подземных сооружений.

Строительство подземных сооружений, а в частности транспортных тоннелей, связано с исследованием деформационных характеристик вмещающего массива. Знание деформационных характеристик массива необходимо для решения вопроса о необходимости крепления, выбора конструкции крепи и требуемых для ее изготовления материалов, а также выбора способа и последовательности возведения сооружения. Учёт нелинейности деформирования скального массива может существенно повлиять на его НДС, что, в свою очередь, также может повлиять на прочность и несущую способность обделок подземных сооружений.

В качестве примера в главе исследуется влияния глубины заложения подземного сооружений и его геометрических размеров на взаимодействие трещиноватых скальных массивов с фибробетонными обделками тоннелей (рис. 7).

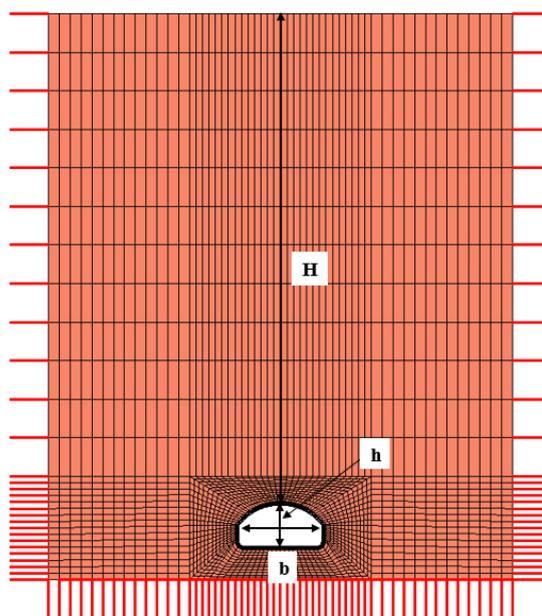


Рис.7. Расчетный фрагмент конечно – элементной сетки

В качестве независимых параметров, оказывающих наибольшее влияние на НДС и как следствие, на модуль деформации скального массива, были выбраны: H – глубина заложения подземного сооружения, b – ширина пролёта выработки, h – высота выработки.

Определение НДС скального массива в окрестности подземного сооружения производилось в 3 характерных точках: в уровне шельги свода (т.1),

горизонтального диаметра (т.2) и основания подземного сооружения (т.3).

С использованием предложенного в четвертой главе метода, выполнен расчёт модуля деформации скального массива в выбранных точках с учётом нелинейности деформирования и полученных напряжений.

По результатам расчётов выявлено, что выбранные параметры (H – глубина заложения подземного сооружения, b – ширина выработки, h – высота выработки) влияют на уровень напряжений, а, следовательно, и на модуль деформации скального массива в окрестности подземного сооружения. Полученные результаты подчеркивают важность учёта нелинейной работы скального массива и правомерность использования метода, предложенного и описанного автором в четвертой главе.

По результатам расчёта составлены графики изменения модуля деформации скального массива при варьировании глубины (Рис.8-10). Полученные результаты сопоставляются со значением модуля деформации, полученному по эмпирической зависимости, широко применяемой в инженерной практике.

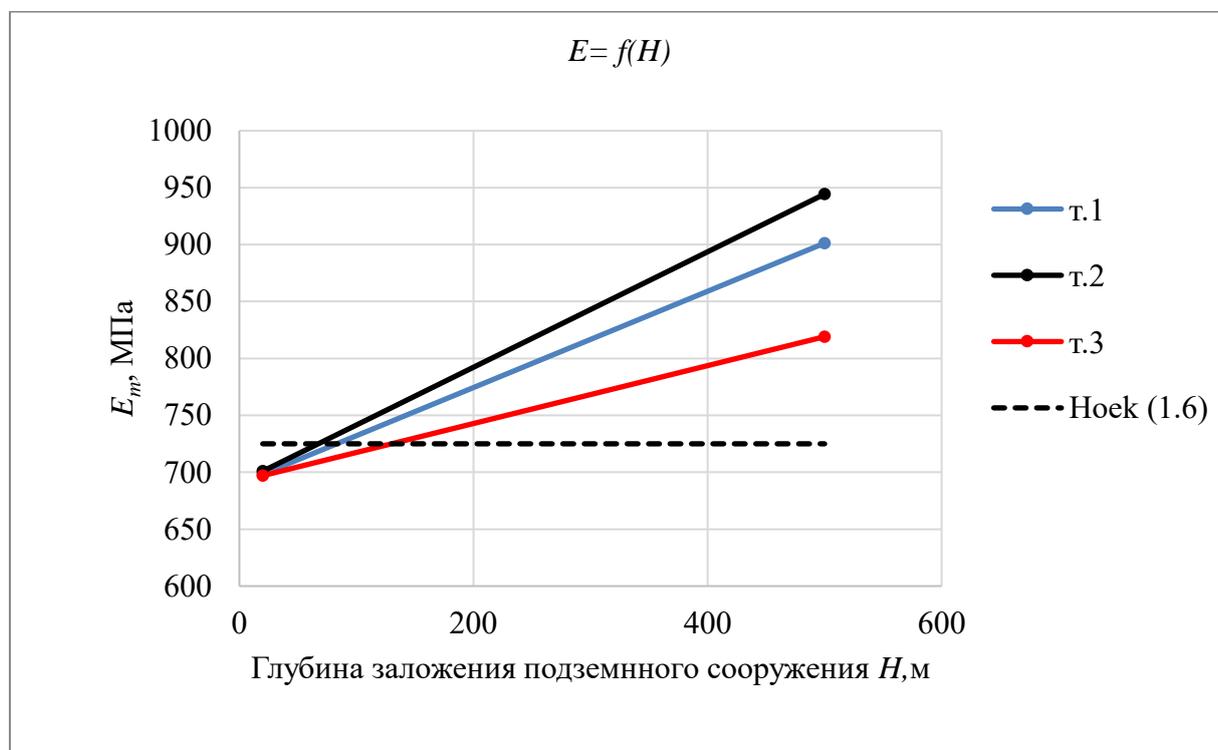


Рис. 8. График изменения модуля деформации скального массива в трех характерных точках при варьировании глубины заложения подземного сооружения

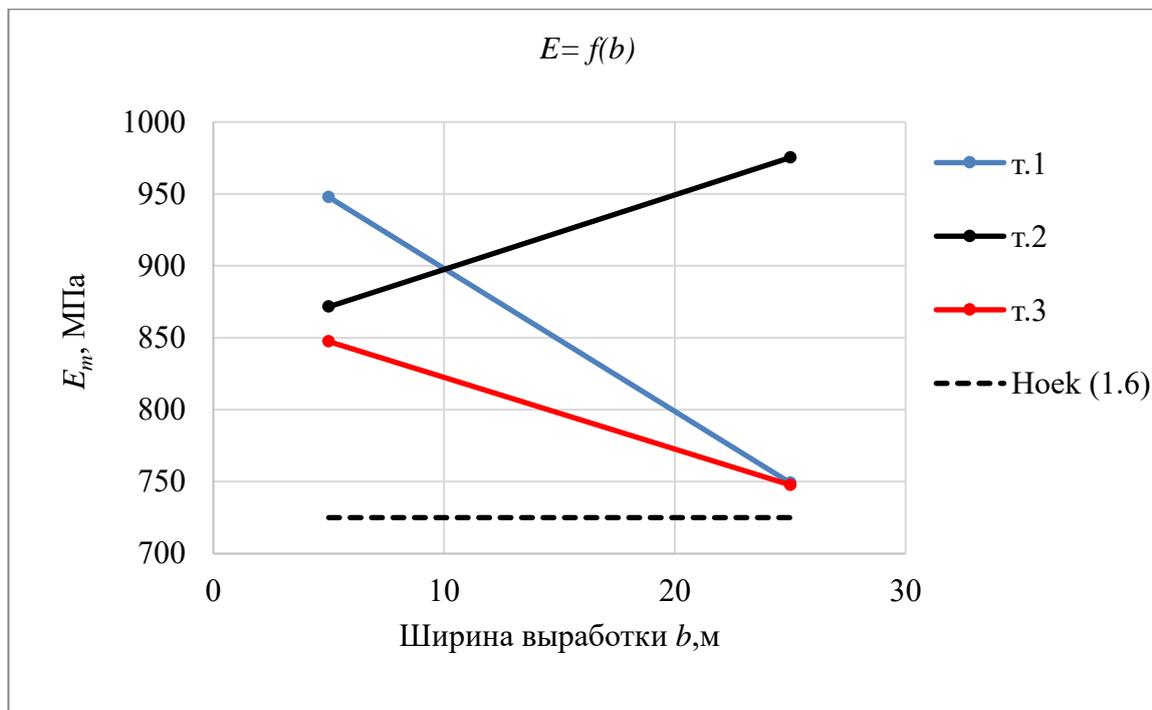


Рис. 9. График изменения модуля деформации скального массива в трех характерных точках при варьировании ширины выработки

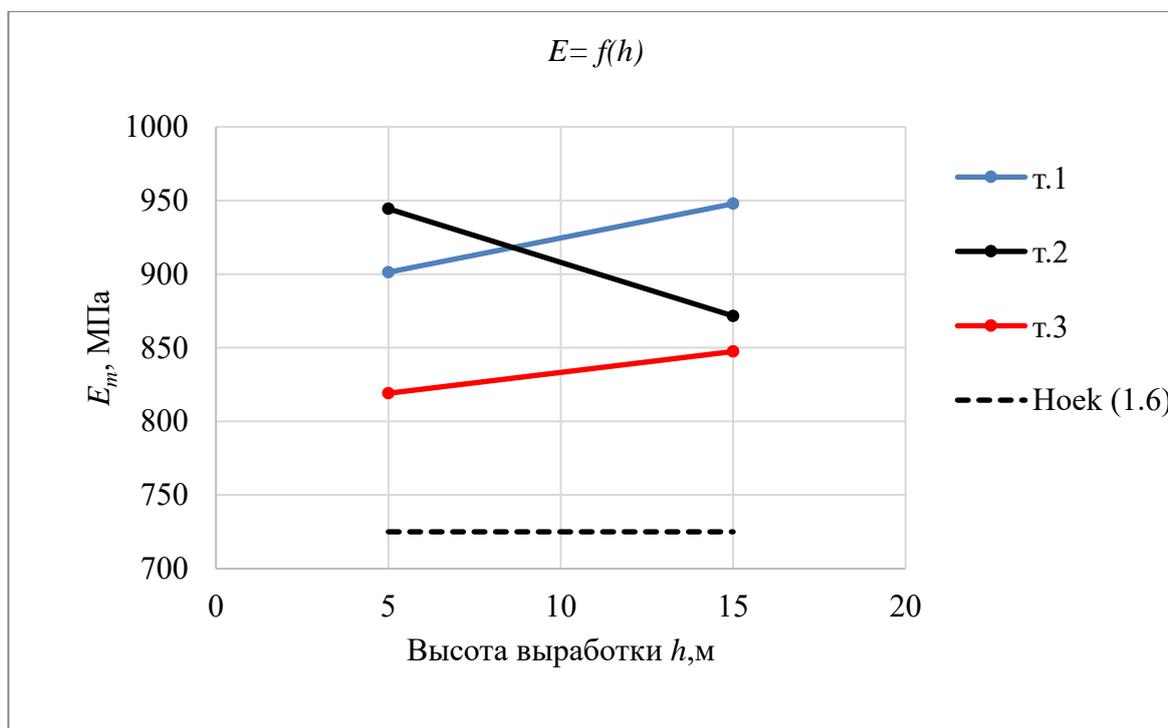


Рис. 10. График изменения модуля деформации скального массива в трех характерных точках при варьировании высоты выработки

Результаты сравнения показали значительно (от 1,5% до 465%) расхождение значений модулей деформации, посчитанных по предложенному в

четвертой главе методу и эмпирической зависимости. Допущения о линейном деформировании скального массива, используемые в эмпирических методах, дают заниженные, отличные от реальности значения модуля деформации нелинейно деформируемого скального массива. Это соответствует действительности, поскольку эмпирические зависимости строятся, обычно, на основе экспертных оценок, получаемых экспертами до начала строительства, когда скальный массив работает в условиях природного напряжённого состояния. В действительности, что подтверждается натурными испытаниями штампов, с ростом прикладываемых к массиву напряжений увеличивается, как указывалось выше, его модуль деформации. Поэтому при определении деформационных характеристик скальных массивов так важно учитывать их характер деформирования.

Влияние глубины заложения и геометрических размеров подземных сооружений на НДС и значения механических характеристик вмещающего массива рассматривалось на примере исследования его взаимодействия с фибробетонными обделками подземных сооружений транспортного назначения, хорошо зарекомендовавших себя в качестве конструкционного материала при возведении перегонных тоннелей Московского и Санкт-Петербургского метрополитена.

В связи с отсутствием рекомендаций по расчёту трещинообразования и трещиностойкости фибробетонных обделок, а также учитывая опыт ранее выполненных исследований, в диссертации рассмотрен метод расчёта образования и распространения трещины в фибробетоне, основанная на зависимостях линейной механики разрушения (далее ЛМР).

Выполнено численного моделирование взаимодействия тоннелей сводчатого очертания, возводимых горным способом, со скальным массивом. По результатам расчётов установлено, что к разрушению обделки тоннеля, при неблагоприятных условиях, может привести неустойчивое распространение двух симметричных трещин в обделке стен тоннеля (рис. 11).

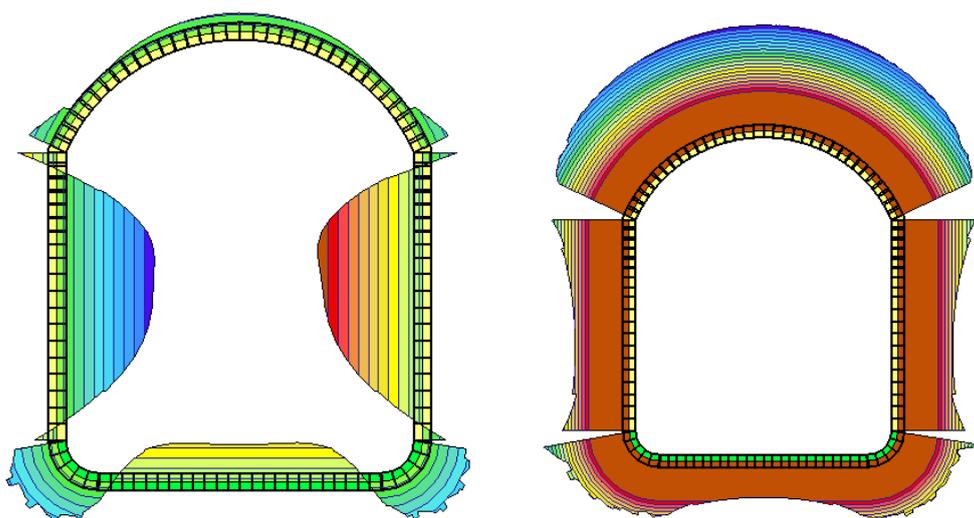


Рис.11. Численное моделирование напряженного состояния тоннельной обделки сводчатого очертания. Слева – пример эпюры распределения изгибающих моментов, справа – пример эпюры распределения продольных сил

Поскольку в сечении реализуются условия нормального отрыва, макротрещина будет двигаться в своей плоскости, нормально действию растягивающих напряжений. Условие начала распространения трещины и её остановки определяется только значением коэффициента интенсивности напряжений - K_I .

Движение трещины начнётся и прекратится при выполнении соответственно условий (6):

$$K_I \geq K_{Ic} \text{ и } K_I \leq K_{Ic} \quad (6)$$

Величина K_{Ic} является постоянной механической характеристикой материала, в данном случае фибробетона, и определяется экспериментально. Значение коэффициента интенсивности напряжений K_I в обделке можно определить по методике, описанной в книге В.Г. Орехова, М.Г. Зерцалова.

Используя указанные зависимости, были выполнены исследования трещиностойкости фибробетонной обделки сводчатого очертания транспортного тоннеля, сооружаемого горным способом, с учётом раскрытия выработки на полное сечение.

В качестве независимых факторов эксперимента были выбраны:

- отношение модуля упругости бетона материала обделки тоннеля к

эффективному модулю деформации скального массива $-\frac{E_{бет}}{E_m}$;

- глубина заложения шельги свода тоннеля – H ,
- отношение ширины горной выработки к ее высоте $-\frac{b}{h}$;
- коэффициент бокового давления грунта – λ .

По результатам проведенных исследований была получена факторная зависимость коэффициента интенсивности напряжений K_I от выбранных факторов в сечении обделки, где возможно продвижение трещины (7):

$$K_I = -340.06 + 32.97 \times \frac{E_{бет}}{E_{эф}} + 5,97 \times H - 39.30 \times \frac{b}{h} + 376.03 \times \lambda \quad (7)$$

Выполненная проверка адекватности уравнения показала статическую значимость уравнения, установлено, что не менее 81% общей вариабельностью функции $Y (K_i)$ объясняется изменением факторов X_i .

Всё изложенное выше позволяет заключить, что предлагаемая методика расчёта адекватно отражает процесс распространения трещин в сводчатых фибробетонных обделках, что даёт возможность использовать её на предварительных стадиях проектирования при проходке выработки горным способом и раскрытии её на полное сечение. Расчёты показали также, что не учёт влияния на НДС массива характера его деформирования, глубины заложения подземного сооружения может привести к большим изменениям в распределении напряжений в областях вокруг тоннеля, что может негативно сказаться на трещиностойкости обделок сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении диссертационной работы проводятся итоги выполненных исследований, которые позволяют сделать следующие выводы:

1. В представленной работе на основе численного моделирования исследовались деформационные характеристики скальных массивов, ослабленные системой взаимно-ортогональных трещин с учётом масштабного фактора. Подобные структуры очень часто встречаются в инженерной практике

при строительстве в горных районах.

2. Результаты численного моделирования блочных сред подтвердили справедливость вывода, сделанного С.Б. Уховым о том, что представительность объёма скального массива, определяемая критерием квазисплошности, зависит не только от величины указанного критерия, но также и от деформационных характеристик, как структурных отдельностей, так и межблочных трещин. Было установлено, что величина этого критерия увеличивается с уменьшением жёсткости, как скальных отдельностей, так и межблочных трещин, и изменяется в пределах 8 – 11.

3. Результатами проведенных исследований показано, что на основании используемых в настоящее время методов определения модуля деформации скального массива (аналитических, эмпирических и экспериментальных зависимостей) в расчётах принимаются постоянные значения модуля деформации, что не корректно, поскольку нелинейность кривой $\sigma = f(\varepsilon)$ приводит к увеличению значений указанных характеристик при изменении НДС скального массива. Эмпирические методы, основанные на использовании квалификационных систем скального массива, определяют значение его модуля деформации в природном состоянии (без приложения нагрузки). В тоже время, результаты натуральных штамповых опытов дают заниженные результаты модуля деформации скальных массивов, поскольку не позволяют достичь уровня напряжений, формирующихся при возведении реальных сооружений.

4. Результаты исследования показали, что в этом случае совместное использование МКЭ и МПЭ позволяет более корректно определить модуль деформации трещиноватого скального массива.

5. На первом участке, нелинейность которого обусловлена смыканием трещин, модуль деформации блочного массива определяется с использованием зависимости R. Goodman с уточнениями, принятыми на основании результатов натуральных и лабораторных исследований, проведенных в нашей стране и за рубежом.

6. Исследования деформирования блочного фрагмента в пределах

второго участка показало, что в результате сдвига скальных блоков по межблочным швам приводит к нарушению сплошности скального массива, что делает невозможным использование аналитических решений, основанных на механике сплошного упругого тела. Учитывая это, были проведены численные исследования деформирования скального массива в условиях штамповых испытаний при различных углах наклона системы взаимно-ортогональных трещин к направлению действия сжимающей нагрузки. В результате было получено уравнение регрессии, которое позволяет получить значения модуля деформации с точностью, принимаемой в инженерных расчётах (15 – 20%).

7. Предложенный метод даёт возможность расчётным путем построить кривую деформирования скального массива $\sigma = f(\varepsilon)$ ослабленного системой взаимно ортогональных трещин, при одноосном сжатии в пределах первых двух участков кривой. Это позволяет максимально точно смоделировать поведение блочного скального массива при проведении натурных штамповых опытов.

8. Результаты исследований, в которых изучалось влияние сетей трещин различной конфигурации на деформационные характеристики скальных массивов, показывают, что при выполнении условия представительности объёмов и равенства величин тензора плотности трещин, возможно использование предлагаемого метода для исследования деформационных характеристик скальных массивов, рассечённых не только системой взаимно-ортогональных трещин. Однако, наличие такой возможности требует проведения отдельных дополнительных исследований.

9. Результаты исследований свидетельствуют также о значительном влиянии нелинейности деформирования на характеристики скального массива при его взаимодействии с подземным сооружением. По результатам расчётов установлено, что глубина заложения подземного сооружения, его ширина и высота влияют на уровень напряжений, а, следовательно, и на величину модуля деформации скального массива в окрестности подземных выработок.

10. На основании более точного определения модуля деформации скального массива разработан метод определения трещиностойкости

фибробетонных обделок тоннелей сводчатого очертания, основанный на линейной механике разрушений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Scopus, Springer) и считаются включенными в Перечень рецензируемых научных изданий (отрасли знаний: «Engineering: Mechanical Engineering», «Environmental Science: Water Science and Technology», «Energy: Energy Engineering and Power Technology»):

1. Зерцалов М.Г. Численное моделирование при определении деформационных характеристик трещиноватых скальных массивов / М.Г. Зерцалов, К.Е. Минин // Гидротехническое строительство. – 2020. – №11. – С. 20-25.

2. Зерцалов М.Г. Фибробетонные обделки безнапорных гидротехнических туннелей в скальных грунтах и расчёт их трещиностойкости / М.Г. Зерцалов, Д.Ю. Чунюк, К.Е. Минин, А.И. Польшаева // Гидротехническое строительство. – 2021. – №10. – С. 46-50.

3. Zertsalov M.G. Fiber-reinforced concrete lining of unpressurized hydraulic tunnels in rocks and determination of their crack resistance / M.G. Zertsalov, D.U. Chunyuk, K.E. Minin, A.I. Polysaeva // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 55. – № 6. – P. 877-880.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus (отрасли знаний: «Engineering: General Engineering», «Materials Science: General Materials Science», «Energy: General Energy», «Environmental Science: General Environmental Science», «Earth and Planetary Sciences: General Earth and Planetary Sciences», «Physics and Astronomy: General Physics and Astronomy»):

1. Zertsalov M. To the problem of determining the deformation characteristics of jointed rock mass / M. Zertsalov, D. Vlasov, K. Minin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869. – № 7. – P. 072045.

2. Zertsalov M.G. Crack resistance estimation of fibre reinforced tunnel linings constructed by conventional method in rocks / M.G. Zertsalov, V.E. Rusanov, K.E. Minin, A.I. Polysaeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1928. – P. 012031.

3. Zertsalov M. Numerical modeling in determining deformation characteristics of fractured rock massifs / M. Zertsalov, K. Minin // E3S Web of Conferences. – 2022. – Vol. 363. – P. 02012.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

1. Зерцалов М.Г. Численное моделирование при определении деформационных характеристик трещиноватых скальных массивов / М.Г. Зерцалов, К.Е. Минин // Сборник тезисов международной научно-технической конференции по геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчётов» (GFAC 2021), 27-29 октября 2021 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2021. – С. 42.

2. Zertsalov M.G. Determination of deformation characteristics of rock massifs using numerical modeling / M.G. Zertsalov, K.E. Minin // Proceedings of the II scientific conference "Modelling and methods of structural analysis" (MMSA-2021), 11-13 November 2021, Moscow. - submission MS ID: AIPCP22-AR-MMSA2021-00137.

3. Зерцалов М.Г. Использование линейной механики разрушений при расчёте трещиностойкости фибробетонных обделок транспортных тоннелей / М.Г. Зерцалов, К.Е. Минин, Е.А. Хотеев // Сборник трудов 12-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композитных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, 15-17 ноября 2022 г., Москва. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2022. – С. 521-528.