

*На правах рукописи*

**Романова Екатерина Леонидовна**



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ  
РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ В  
НАРУШЕННЫХ ЗОНАХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

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

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

Санкт-Петербург – 2025

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Деменков Петр Алексеевич*

**Официальные оппоненты:**

*Саммаль Андрей Сергеевич*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тулский государственный университет», кафедра механики материалов и геотехнологий, профессор;

*Трофимов Андрей Викторович*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», департамент по исследованиям и разработкам, заместитель директора.

**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **15 июля 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 15 мая 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Вертикальные стволы являются капитальными сооружениями, остановка функционирования которых негативно отражается на работе всего предприятия. Понимание напряженного состояния вмещающего массива пород имеет решающее значение для прогнозирования и предотвращения возможных проявлений неравномерных напряжений, а также повышения безопасности работ. Строительство новых и поддержание действующих вертикальных стволов требуют точной оценки напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и крепи. Ошибки в оценке действующих напряжений в массивах, особенно, в условиях их тектонического строения, могут приводить к катастрофическим последствиям. Например, в 1984 году на шахте «Центральная» Донского горно-обогатительного комбината произошло масштабное (порядка 200 метров) разрушение бетонной крепи вертикального ствола на глубине свыше 500 метров. На восстановление крепи потребовалось два года, что снизило добычные темпы предприятия и стало причиной колоссальных финансовых потерь. После восстановления разрушенного участка и усиления крепи произошла повторная потеря ее несущей способности на другой глубине, также по причине некорректной оценки напряжений. Проблема расчета крепей в тектонически напряженных массивах осложняется также тем, что нормативная база в таких случаях рекомендует обращаться в специализированные организации для расчета крепей по особым методикам. Отсутствие базы нормативных документов, определяющей порядок расчета крепи горных выработок в нарушенных зонах, вынуждает проектные организации рассматривать специальные способы строительства таких сооружений и ссылаться на опыт проектирования. Неизменная потребность в добыче полезного ископаемого вкупе с усложнением и углублением обрабатываемых горизонтов определяет задачу дополнения математическим моделированием существующей нормативной документации Российской Федерации в области расчета крепей вертикальных выработок в сложных горно-геологических условиях с целью повышения надежности крепи и безопасности работы горных предприятий.

Таким образом, уточнение и расширение существующих методов расчета крепей стволов в тектонически напряженных массивах численными методами с целью повышения безопасности проведения вертикальных выработок является актуальной задачей.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросы особенностей распределения напряжений в массивах горных пород в сложных горно-геологических условиях нашли отражение в трудах многих отечественных ученых – Н.С. Булычева, С.В. Сергеева, А.Г. Протосени, Л.Л. Панасьян, Г.А. Крупенникова, Н.А. Филатова. Вопросы диагностики и мониторинга напряженного состояния крепей вертикальных стволов были рассмотрены в трудах Д.М. Казикаева, О.П. Борисова, С. В. Сергеева, А.М. Козела. Особенности учета факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние крепей выработок были затронуты в работах А.Н. Ставрогина, А. Г. Протосени, А. С. Саммаля, П.А. Деменкова, М. J. Kavvadas, T. Chan, C. C. Davison.

Решению проблем корректного геомеханического прогноза нагрузок на крепь вертикальных стволов аналитическими и численными методами посвящены работы многих российских и зарубежных ученых: А.Г. Протосени, Н.С. Булычева, А.Г. Оловянного, Г.А. Крупенникова, Н.А. Филатова, К.В. Руппенейта, Н.И. Фотиевой, И.И. Савина, М.А. Карасева, М. Hudek, D. Daniel, G. Link, F. Mora, Yazdani M., Sharifzadeh M., Kamrani K., Starfield A. M., Cundall P. A.

Отечественный и зарубежный опыт шахтного строительства свидетельствует о том, что проблема проведения и поддержания вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях не полностью решена, несмотря на обширное количество уже проведенных исследований. На сегодняшний день не разработан подход, способный обеспечить повышение точности подбора параметров крепи в нарушенных тектоникой массивах. Решения, полученные в этой области, определены в плоской постановке с упрощением расчетной схемы. С развитием вычислительной техники становится возможным решать такие задачи в объемной постановке с учетом пространственной конфигурации выработки и нарушений, а также учитывать влияющие на расчет факторы в явном виде, что повышает точность расчетов.

**Объект исследования** – крепь вертикальных стволов в тектонически напряженных массивах.

**Предмет исследования** – процесс формирования и изменения напряженно-деформированного состояния бетонной крепи ствола.

**Цель работы** – обеспечение безопасности строительства и эксплуатации вертикальных стволов в тектонически нарушенных зонах массивов посредством повышения достоверности прогноза развития геомеханических процессов в окрестности выработки.

**Идея работы** – повышение достоверности прогноза развития геомеханических процессов в окрестности вертикальных стволов, возводимых в тектонически осложненных массивах, и расчет нагрузок на крепь в этих зонах, обеспечивается за счет решения задачи в пространственной постановке, учета неровности внешнего контура бетонной крепи и учета прочностных характеристик и конфигурации (мощности и угла наклона) пересекаемого нарушения, при этом определение параметров зоны возможного обрушения выполняется численными методами.

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

1. Анализ существующих методик оценки напряженного состояния вмещающего массива и напряженно-деформированного состояния крепи ствола в осложненных тектоникой условиях.

2. Сравнение методик аналитических и численных решений задачи расчета крепей в сложных горно-геологических условиях.

3. Создание математической модели ствола, учитывающей неровность внешнего контура бетонной крепи в тектонически напряженном массиве, и оценка степени влияния размера неровности на напряженно-деформированное состояние крепи.

4. Создание математической модели вертикального ствола, пересекающего зону дробления в тектонически напряженном массиве по данным существующего месторождения; определение факторов, влияющих на величину нагрузки на крепь, сравнительный анализ и определение качественных зависимостей между полученными данными и натурными исследованиями.

5. Разработка методики расчета крепей стволов в тектонически напряженных массивах, сравнение с существующими расчетными методиками.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация численной методики расчета крепей стволов, базирующейся на учете особенностей тектонических нарушений, пересекаемых вертикальным стволом, в качестве дополнения к существующей нормативной методике.

**Научная новизна работы:**

1. Установлена квадратичная зависимость напряжений в бетонной крепи ствола, проведенном в тектонически напряженном массиве, от ориентации, размера и формы неровности на контуре крепи.

2. Установлена полиномиальная зависимость размера области пластических деформаций в окрестности вертикальной выработки, пересекающей зону дробления в тектонически напряженном массиве, от мощности и угла наклона зоны дробления.

3. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния крепей вертикальных стволов, пересекающих зоны дробления в тектонически напряженных массивах, позволяющая повысить точность расчетов за счет учета мощности и угла наклона зоны дробления в явном виде.

**Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

П.1. Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений;

П.2. Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, креплением, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров, разрезов, отвалов и подземных выработок;

П.6. Теоретические основы прогнозирования геомеханических процессов в массивах горных пород и грунтов, в том числе антропогенных, служащих средой и материалом различных горнотехнических конструкций.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана численная модель прогноза напряженно-деформированного состояния системы крепь-массив в тектонически нарушенном массиве.

2. Разработана методика расчета крепей стволов в тектонически напряженных массивах (получены переходные коэффициенты для аналитического расчета).

3. Определены оптимальные параметры крепи ствола, пересекающего зоны дробления в массивах.

4. Результаты диссертационной работы отражены в свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ № 2023680836 «Программа для расчета крепи вертикального ствола в программном пакете Abaqus CAE» от 05.10.2023.

5. Результаты диссертационной работы приняты к использованию при определении параметров крепи вертикальных стволов на месторождениях полезных ископаемых, добываемых подземным способом, и применены в проектной деятельности компании АО «Ги-процветмет» – получен акт об использовании результатов кандидатской диссертации от 28.11.2024 г..

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований базировалось на применении комплекса теоретических (анализ существующих исследований и методик и их сравнение), статистических (анализ и обработка данных – корреляция, регрессия, а также количественный и качественный анализы данных) методов, а также методов математического моделирования (создание прогнозных моделей) и работы с данными (визуализация полученных результатов в виде графиков и диаграмм).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. При проведении вертикального ствола через зоны дробления мощностью свыше 25% его диаметра и углом падения свыше 15 градусов в тектонически напряженных массивах размер зоны пласти-

ческих деформаций в окрестности зоны дробления следует определять из пространственной постановки задачи, в иных случаях допускается использование упрощенной (плоской) постановки.

2. Максимальные напряжения в бетонной крепи ствола при пересечении зон дробления в тектонически напряженных массивах образуются в областях контакта с ненарушенным породным массивом, примыкающим к зоне дробления, где величина напряжений повышается до 2,4 раз в сравнении с аналогичными участками вне зон дробления, причем, определяющее влияние на значение напряжений в крепи оказывает угол наклона зоны дробления, в то время как мощность зоны дробления оказывает влияние только при достижении ее размерами значений, соизмеримых с диаметром ствола.

3. Неровности контура бетонной крепи вертикального ствола при расчете ее напряженно-деформированного состояния следует учитывать при превышении линейного размера неровности на 6% от радиуса ствола в черне.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием стандартных методов математического моделирования и большим числом проведенных численных экспериментов, верификацией моделей с натурными данными и экспериментами, а также сопоставлением результатов с предложениями других исследователей.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Инновационные идеи молодых ученых», выступление с докладом «Влияние вывалов и неровностей крепи вертикального ствола на напряжения на ее контуре» 01 декабря 2023 г., Уфа.

2. XXXIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2025», выступление с докладом «Закономерности формирования зон пластических деформаций вокруг незакрепленных стволов в тектонически нарушенных массивах пород» 06 февраля 2025 г., Москва.

3. Международная научно-практическая конференция «Теоретические и практические аспекты развития современной науки:

теория, методология, практика». Научная конференция молодых ученых. Выступление с докладом «Методика прогноза вывалов на контуре вертикальной выработки в нарушенных массивах тектонического строения» 21 февраля 2025 г., Уфа.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе научной и нормативной литературы по теме исследования; обосновании и подборе параметров численных моделей; обработке полученных данных и сопоставлении их с существующими методиками; выявлении закономерностей распределения напряжений на контуре вертикальных выработок в сложных горно-геологических условиях.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 150 наименований и 2 приложения. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 12 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность коллективу сотрудников и аспирантов кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений, а также своей семье, за поддержку на каждом из этапов написания диссертации.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**В первой главе** представлен анализ проблем строительства стволов в сложных горно-геологических условиях. Рассмотрены существующие способы оценки состояния вмещающих массивов пород, способы описания поведения массивов, методы прогноза вывалов на контуре незакрепленных выработок, методики расчета бетонных крепей вертикальных стволов, а также способы учета неровного контура крепей стволов. Выявлено, что существующие нормативные, аналитические и экспериментальные методики требуют совершенствования посредством численного моделирования.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** представлено теоретическое обоснование подхода к определению напряжений на незакрепленном контуре вертикальной выработки и на контуре крепи ствола при пересечении нарушений в виде зон дробления, а также описание подхода к учету неровностей на круглом контуре крепи ствола посредством численного моделирования. Описаны горно-геологические и физико-механические характеристики массива пород и крепи ствола, проведена верификация с натурными данными для обоснования подобранных параметров.

**В третьей главе** предложен способ прогноза размеров вывалов на контуре обнажения круглой формы, а также представлен способ прогноза напряженно-деформированного состояния крепей стволов с неровным контуром в тектонически осложненном массиве.

В результате виртуальных экспериментов установлена необходимость учета неровностей на контуре незакрепленной выработки, а также необходимость учета в расчетах в явном виде пространственной конфигурации и свойств зон дробления. Даны рекомендации по учету указанных особенностей массива и крепи.

**В четвертой главе** разработана методика расчета крепей вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях с учетом неровностей на контуре бетонной крепи, а также с учетом геологических нарушений тектонически напряженных массивах. Предложены рекомендации по проектированию и расчету крепей вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. При проведении вертикального ствола через зоны дробления мощностью свыше 25% его диаметра и углом падения свыше 15 градусов в тектонически напряженных массивах размер зоны пластических деформаций в окрестности зоны дробления следует определять из пространственной постановки задачи, в иных случаях допускается использование упрощенной (плоской) постановки.**

В ходе решения задачи были созданы объемные численные модели выработок, пересекающих зоны дробления различной конфигурации. Прогнозные модели были верифицированы с учетом геологии и тектоники месторождения по натурным данным. Подбор характеристик зон дробления произведен по условию прочности Хока-Брауна посредством ослабления исследуемого участка массива через индекс геологической прочности GSI. Численная модель представляет собой массив горной породы с вертикальной выработкой, проведенной в центре массива. Определяемый размер зоны потенциального вывала обозначен  $l_{зав}$  и приведен на рисунке 1.

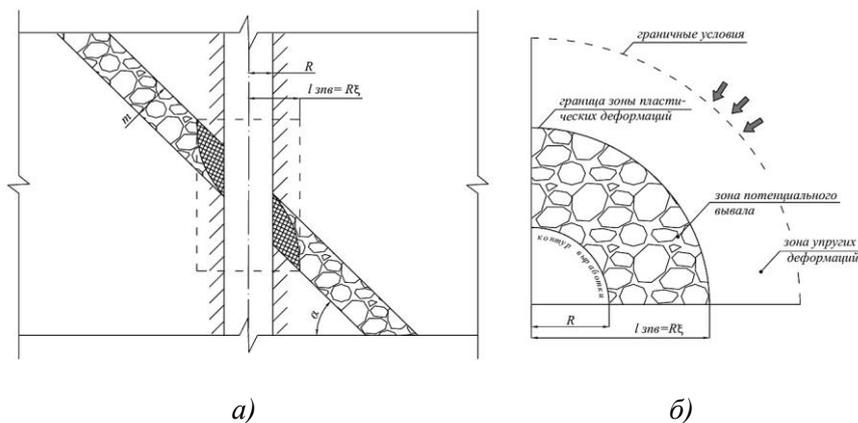


Рисунок 1 – Определение границ влияния выработки, пересекающей зону дробления в массиве: а) расчетная схема; б) напряженно-деформированное состояние массива вокруг выработки

Геологические нарушения пересекают трассу вертикального ствола в середине выработки. Мощность зоны дробления изменялась от 2 до 8 метров; угол наклона к плоскости, перпендикулярной оси выработки в точке ее пересечения с зоной дробления, изменялся от 0 до 60 градусов с шагом в 15 градусов.

Полученные при численном моделировании результаты были сопоставлены с существующей методикой, базирующейся на условии прочности Хока-Брауна. Для удобства сопоставления и оценки полученных результатов расчета по разным методикам было введено понятие относительного размера вывала  $\xi$ , определяемого как отношение глубины прогнозируемого вывала (размера зоны пластических деформаций) к радиусу выработки (1):

$$\xi = \frac{l_{зпв}}{R} \quad (1)$$

где  $l_{зпв}$  – размер зоны пластических деформаций, м;  $R$  – внешний радиус выработки, м.

В существующей методике относительный размера вывала  $\xi$  определяют с учетом прочностных свойств геологического нарушения, определяемых параметрами  $m_b$  и  $\sigma_{ci}$  из условия прочности Хока-Брауна (2).

$$\xi = \exp \left[ \frac{1}{k+1} \sqrt{1 + 4 \frac{\sigma_1}{m_b \sigma_{ci}} \left( \frac{k+1}{k} \right)^2} - \frac{1}{k+1} \right] \quad (2)$$

где  $k$  – параметр, определяющий форму выработки;  $\sigma_1$  – главное максимальное напряжение в массиве;  $m_b$  – параметр геологической структуры массива;  $\sigma_{ci}$  – прочность на сжатие ненарушенного образца.

Вышеприведенная существующая методика была сопоставлена с результатами численного моделирования в явном виде выработок, пересекающих геологические нарушения в тектонически осложненных массивах. Сопоставление существующей методики с предлагаемой методикой, учитывающей особенности геологического нарушения, приведены в таблице 1. Анализ полученных графиков позволяет заключить, что методика определения размера вывала,

описываемая уравнением (2), хоть и позволяет учесть местную раздробленность посредством введения параметров  $m_b$  и  $\sigma_{ci}$ , коррелируется с предложенной численной методикой только в случае, когда угол наклона зоны дробления не превышает 15 градусов, а ее мощность не превышает 2 метров.

В результате проведения расчетов было установлено, что размер потенциального вывала на контуре круглой вертикальной выработки увеличивается с увеличением угла наклона и мощности зоны дробления, а также с увеличением степени ее нарушенности. Была определена зависимость размера потенциального вывала на контуре вертикальной круглой выработки от параметров зоны дробления можно описать уравнением (3):

$$l_{зпв} = (13,73 + 0.278m - 0.739GSI - 0.109\alpha + 0.0299m^2 + 0.0106GSI^2 + 0.0017\alpha^2 - 0.0081m \cdot GSI + 0.0078m \cdot \alpha + 0.0022GSI \cdot \alpha) + R, \quad (3)$$

где  $l_{зпв}$  – абсолютный размер зоны потенциального вывала от оси выработки, м;  $m$  – мощность зоны дробления;  $\alpha$  – угол наклона зоны дробления;  $GSI$  – индекс  $GSI$  зоны дробления,  $R$  – радиус выработки, м.

При сравнении результатов исследования с существующей методикой, предложены рекомендации: предложенную методику следует применять для уточнения размеров зоны пластических деформаций в окрестности круглой вертикальной выработки при ее пересечении зон дробления мощностью свыше 25% от диаметра и углом наклона свыше 15 градусов в тектонически напряженных массивах с дезинтегрированной структурой. Формула (3) может быть использована в качестве предварительной «полевой» оценки размеров потенциального вывала и должна подтверждаться численным моделированием.

**2. Максимальные напряжения в бетонной крепи ствола при пересечении зон дробления в тектонически напряженных массивах образуются в областях контакта с ненарушенным породным массивом, примыкающим к зоне дробления, где величина напряжений повышается до 2,4 раз в сравнении с аналогичными участками вне зон дробления, причем, определяющее влияние на значение напряжений в крепи оказывает угол**

**наклона зоны дробления, в то время как мощность зоны дробления оказывает влияние только при достижении ее размерами значений, соизмеримых с диаметром ствола.**

Оценка изменения нагрузок на крепь стволов проведена для зон дробления мощностью от 2 до 8 метров (с шагом 2 м) и углами наклона от 0 до 60 градусов (с шагом 15°). Индекс GSI равен 15.

Крепь ствола представляет собой бетонное кольцо диаметром 8 метров вчере. Класс прочности бетона В30, толщина крепи – 0,3 м. Из эпюры напряжений в крепи, представленной на рисунке 2 на примере двухметровой зоны, характерной для всех расчетных случаев, очевидно, что область концентрации максимальных напряжений на контуре находится на границе нарушения и вмещающего массива. Анализ зависимости максимальных напряжений ( $\sigma_{\max}$ ) на контуре крепи от угла наклона зоны дробления ( $\alpha$ ) показал, что при мощности зоны дробления ( $m$ ) до 2 метров и угле ее наклона до 15° нагрузка не превышает расчетное сопротивление бетона класса В30 (рисунок 3, а). Однако, при увеличении этих параметров, наблюдается уже значительный прирост напряжений. При возрастании угла наклона от 0° к 60° степень неравномерности нагрузки на крепь нарастает. Иными словами, угол наклона особенно влияет на концентрацию напряжений на контуре крепи ствола. При мощности, соизмеримой с диаметром ствола ( $m = 8$  м), напряжения на контуре крепи превышают допустимые более чем в 1,5 раза, что объясняется локальной концентрацией напряжений по причине их асимметрии из-за крутых углов, а также масштабным эффектом из-за мощности нарушения, соизмеримой с диаметром ствола.

Для количественной оценки перегрузки крепи было введено понятие коэффициента концентрации напряжений. Коэффициент концентрации напряжений на внешнем контуре крепи  $k_z$ , как отношение максимального напряжения к номинальному (на аналогичных участках крепи ствола, не пересекающих нарушение), определяется выражением (4):

$$k_z = \frac{\sigma_k}{\sigma_n}, \quad (4)$$

где  $\sigma_k$  – максимальное напряжение в крепи по данным расчетов, МПа;  $\sigma_n$  – номинальное напряжение в крепи по данным расчетов, МПа.

Значение  $k_z$  демонстрирует нелинейный рост с увеличением угла наклона зоны дробления для каждой из ее мощностей. Для мощностей от 2 до 6 метров максимальное значение  $k_z$  варьируется в пределах 2,2 (рисунок 3, б). Пиковых значений коэффициент достигает при угле наклона в 60 градусов при любой мощности нарушения. Высокие значения  $k_z$  (до 2,2-2,4) указывают на критическую нагрузку в зонах контакта крепи с нарушенным массивом. В таких условиях рекомендуется использовать пластичные материалы, например, фибробетон, повышающий трещиностойкость крепи.

**3. Неровности контура бетонной крепи вертикального ствола при расчете ее напряженно-деформированного состояния следует учитывать при превышении линейного размера неровности на 6% от радиуса ствола в черне.**

В рамках исследования было проанализировано влияние положения и геометрии неровности на напряженно-деформированное состояние выработки и крепи в тектонически осложненном массиве. Разработанная численная модель представляет собой массив размерами 100×100 метров. Физико-механические характеристики массива представлены в таблице 2. В массиве преобладают тектонические напряжения, компоненты поля напряжений приняты равными: вертикальные напряжения – 10 МПа, горизонтальные – 7 и 4 МПа. Крепь ствола монолитная бетонная, класс прочности бетона В30, радиус крепи 3,6 м, а толщина крепи – 0,3 м.

В первом моделируемом случае (рисунок 4, п.1) было исследовано влияние ориентации вектора главных напряжений относительно неровности на величину максимальных тангенциальных напряжений на контуре. Во втором моделируемом случае (рис. 4, п. 2) рассмотрено влияние линейного размера неровности на развитие напряженно-деформируемого состояния крепи ствола.

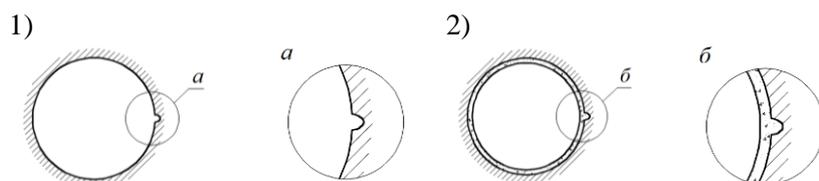


Рисунок 4 – Схема модели: 1, а – неровность на контуре выработки; 2, б – неровность на контуре крепи ствола

Было установлено, что напряжения на контуре выработки возрастают нелинейно, достигая максимальных значений при положении неровности перпендикулярно вектору максимальных горизонтальных напряжений (рисунок 5).

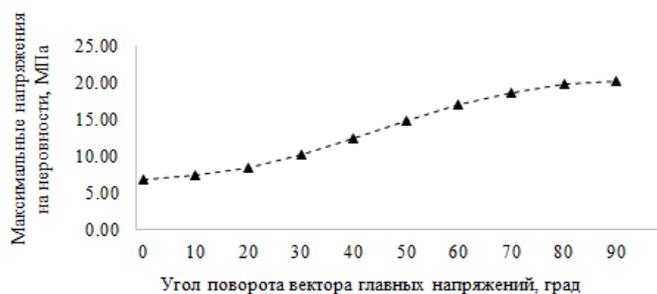


Рисунок 5 – График зависимости максимальных напряжений на контуре от ориентации тензора напряжений

Эпюра распределения тангенциальных напряжений вокруг выработки представлена на рисунке 6.

Во втором моделируемом случае было установлено, что, с увеличением размера неровности относительно радиуса крепи, максимальные тангенциальные напряжения возрастают нелинейно. При исследовании напряженно-деформированного состояния крепи ствола в рамках рассмотрения упругой модели поведения бетона был определен коэффициент концентрации напряжений в крепи, а при рассмотрении пластической модели его поведения были локализованы области развития пластических деформаций. График зависимости изменения напряжений на контуре крепи от относительного размера неровности с учетом разных моделей поведения бетона приведен на рисунке 7.

Была введена относительная величина  $c$ , показывающая процентное соотношение максимального линейного размера неровности к внешнему радиусу крепи (5):

$$c = \frac{a}{R} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где:  $a$  – глубина неровности, м;  $R$  – внешний радиус крепи, м.

Результаты расчетов коэффициента концентрации напряжений на неровном контуре крепи представлены на рисунке 8.

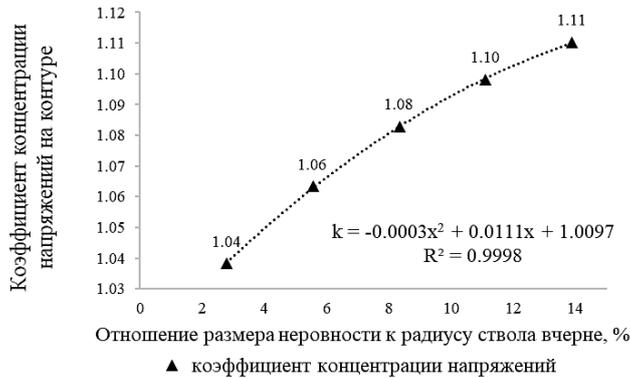


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений на контуре крепи от размера неровности

Прирост напряжений на контуре крепи свыше 5% соответствует относительному линейному размеру неровности  $c = 6\%$  (значения напряжений и эпюра распределения зон пластических деформаций приведены на рисунке 9). Коэффициент концентрации напряжений  $k_c$  можно определить из полученной полиномиальной зависимости (6) (рисунок 7):

$$k_c = -0,0003c^2 + 0,0111c + 1,0097 \quad (6)$$

Полученный коэффициент  $k_c$  рекомендуется использовать при расчетах нагрузок на крепь ствола по нормативной методике СП 91.13330, тогда формула (Б.3) примет вид (7):

$$P_n = \gamma_f \gamma_n \gamma_d n_n k_c P^H [1 + 0,1(r_0 - 3)], \quad (7)$$

где  $r_0$  – радиус выработки в свету, м;  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке, равный 1,17;  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответ-

ственности, равный 1,2;  $\gamma_d$  – коэффициент условий работы, для монолитной бетонной крепи равен 0,8;  $n_n$  – коэффициент приведения к расчетному (максимальному) давлению при неравномерной эпюре нагрузок (зависит от схемы проходки и угла залегания пород);  $k_c$  – коэффициент концентрации напряжений при нервно контуре бетонной крепи,  $P^H$  – нормативное давление на крепь, МПа, определяемое на основании критерия устойчивости пород выработки и технологии проходческих работ.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе представлены результаты пространственного численного моделирования в явном виде вертикальных выработок с учетом зон дробления, пересекаемых ими, а также с учетом неровного контура выработок. По результатам выполнения диссертационной работы сделаны некоторые выводы и рекомендации.

Для выработок, пересекающих зоны дробления в тектонически напряженных массивах:

1. При расчете и подборе конструкций крепей необходимо существующие нормативные методики дополнять численным моделированием в объемной постановке для учета влияния пространственной конфигурации нарушения на нагрузку на крепь.

2. При мощности зоны дробления до 2 метров и угле ее наклона до 15 градусов допускается не предусматривать изменение принятой конструкции крепи.

3. Угол наклона зоны дробления свыше 15 градусов оказывает определяющее влияние на напряженно-деформированное состояние крепи ствола и становится причиной появления зон концентраций напряжений в ней.

4. Мощность зоны дробления до 6 метров незначительно определяет величину дополнительной нагрузки на крепь; мощность зоны дробления, соизмеримая с диаметром ствола (6-8 метров), становится причиной резкого роста напряжений в крепи вне зависимости от угла наклона зоны дробления.

5. При проектировании крепи ствола в тектонически напряженных массивах с локальными зонами дробления следует применять материалы для крепления с повышенной пластичностью (например,

фибробетоны или слои набрызг-фибробетона по гибкой металлической сетке), а также рассматривать варианты изменения бетонной крепи на опасном участке на многослойную.

Для крепей стволов с неровным контуром в тектонически напряженных массивах:

6. Учет неровностей на контуре выработки должен осуществляться на этапе проектирования при помощи математического моделирования либо с использованием предложенного коэффициента концентрации напряжений при относительных размерах неровностей свыше 6% от радиуса выработки, при этом важно учитывать пространственную ориентацию неровности относительно вектора главных напряжений массива и ее размеры. При малых размерах неровности (до 6% от радиуса выработки) допускается не применять дополнительных мер по поддержанию и усилению существующей крепи.

7. Для уменьшения влияния неровностей на контуре крепи на ее напряженно-деформированное состояние рекомендуются: оптимизация методов проходки (контурное взрывание и щитовая проходка); применение трещиностойких пластичных, способных противостоять росту и раскрытию трещин (фибробетонов).

8. Коэффициент концентрации напряжений  $k_c$  рекомендуется учитывать при расчете нагрузок на крепь протяженного участка стволов, проводимую в тектонически напряженных массивах буровзрывным способом.

Разработанные рекомендации позволят повысить безопасность работ и экономическую эффективность при строительстве и эксплуатации сопряжений горных выработок в тектонически напряженных массивах пород. В качестве перспективного направления дальнейших исследований можно отметить интеграцию предложенной методики с существующей в настоящий момент нормативной базой в области расчетов крепей стволов.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Деменков, П.А. Анализ подходов к расчету крепи вертикальных стволов в зонах тектонических нарушений / П.А. Деменков, **Е. Л. Романова**. //Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2022. – №. 4. – С. 223-236.

2. Деменков, П.А. Анализ влияния рейтинговых методик оценивания массива на его физико-механические характеристики и на расчет крепи вертикального ствола / П.А. Деменков, Д.А. Котиков., **Е.Л. Романова** // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – №. 1 (69). – С. 67-77.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. Деменков, П. А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура / П.А. Деменков, Д.А. Котиков., **Е.Л. Романова** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – №. 11. – С. 33-48.

4. Demenkov, P. A. Regularities of plastic deformation zone formation around unsupported shafts in tectonically disturbed massive rock / P.A. Demenkov, **E.L. Romanova** // Geosciences. – 2025. – Т. 15. – №. 1. DOI: 10.3390/geosciences15010023

*Публикации в прочих изданиях:*

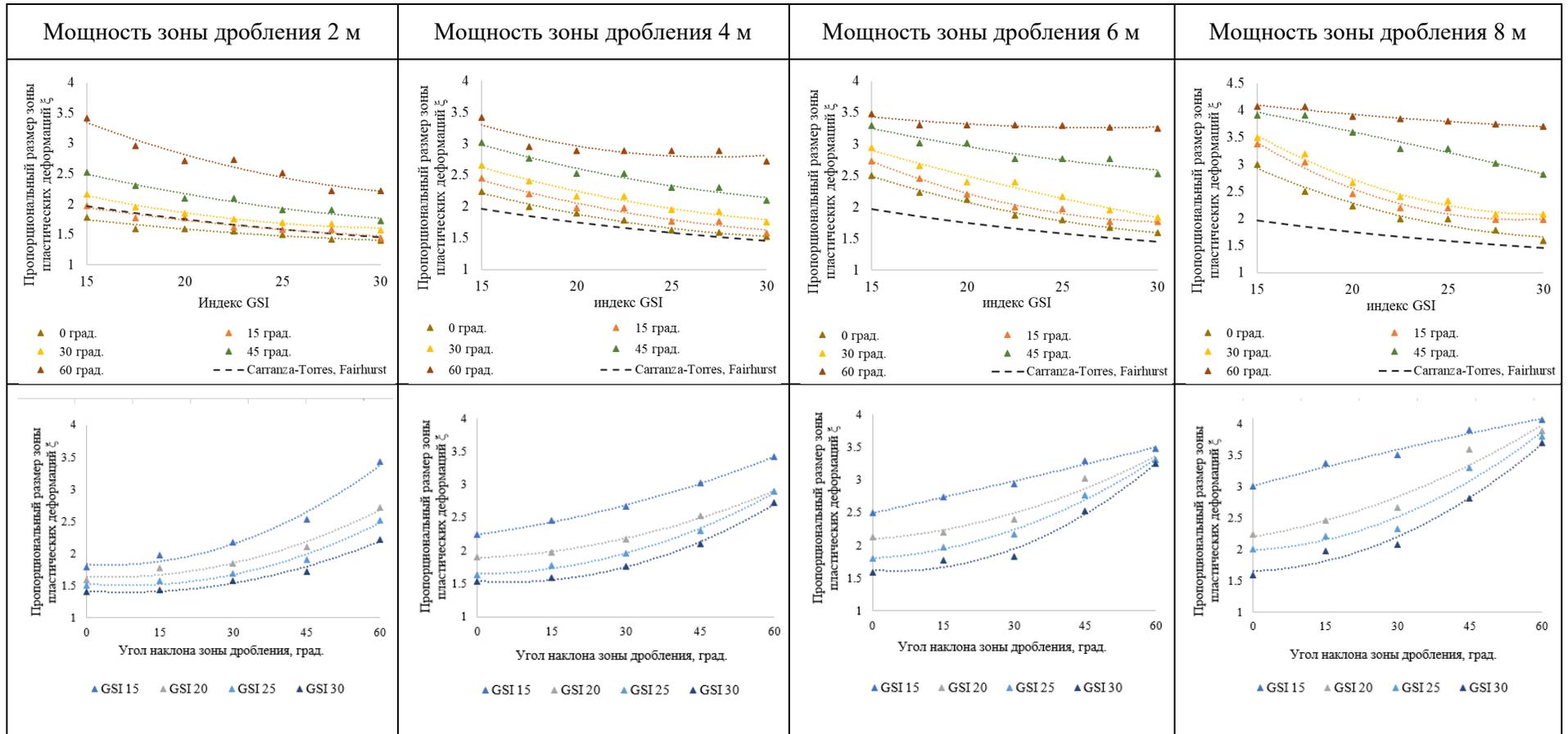
5. **Романова, Е.Л.** Влияние вывалов и неровностей крепи вертикального ствола на напряжения на ее контуре / **Е.Л. Романова** // Инновационные идеи молодых исследователей: сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции, Уфа, 01 декабря 2023 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. – С. 265-270.

6. **Романова, Е.Л.** Методика прогноза вывалов на контуре вертикальной выработки в нарушенных массивах тектонического строения / **Е.Л. Романова** // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика: сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции, Уфа, 21 февраля 2025 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2025. – С. 65-69.

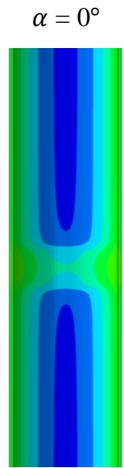
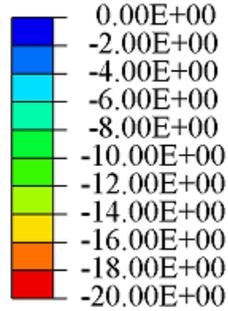
*Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:*

7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023680836 Программа для расчета крепи вертикального ствола в программном пакете Abaqus CAE. Заявка № 2023669398: заявл. 22.09.2023; опублик. 05.10.2023 / Деменков П.А., **Романова Е.Л.**, заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

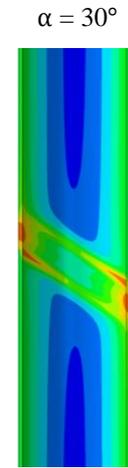
Таблица 1 – Изменение пропорционального размера зоны пластических деформаций вокруг круглой вертикальной выработки в зависимости от мощности и угла наклона зоны дробления, а также ее прочностных характеристик в рамках сравнения с существующими методиками



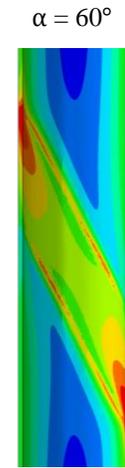
S, Min. Principal  
(Avg: 75%)



а)

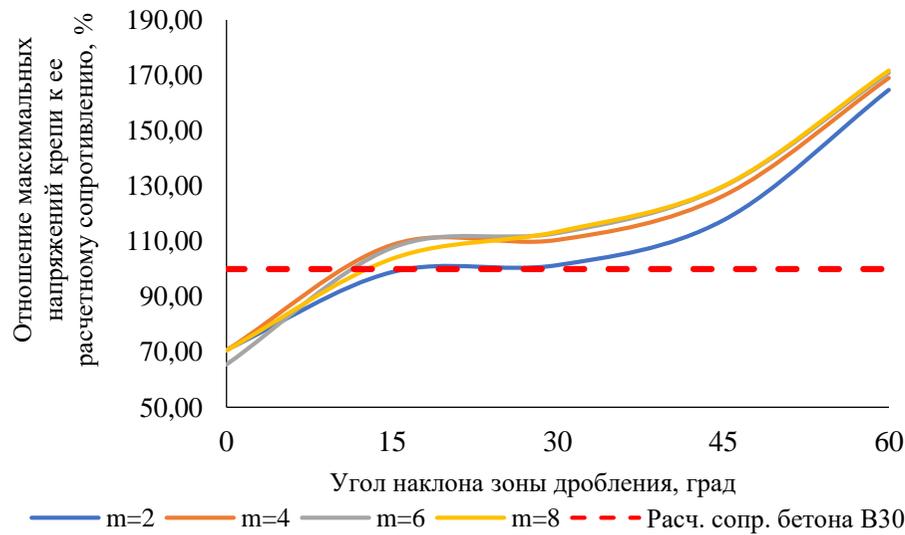


б)

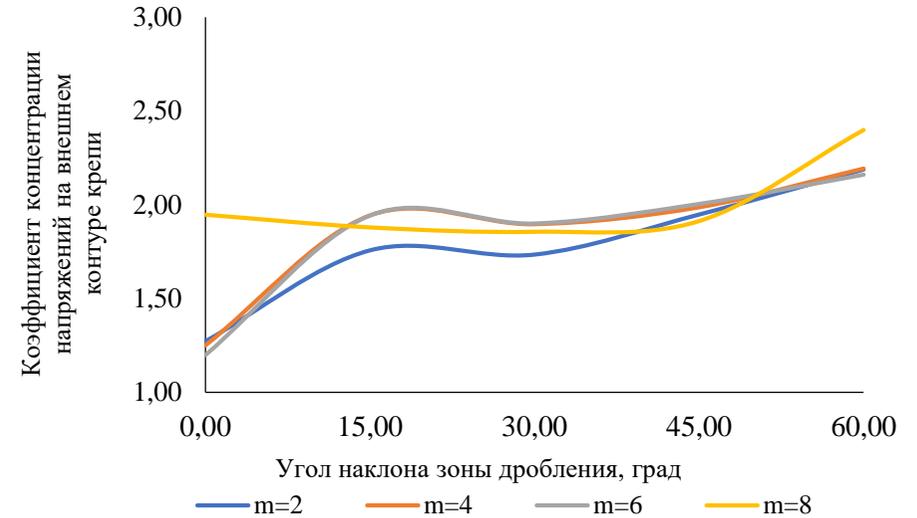


в)

Рисунок 2 – Эпюры напряжений в крепи ствола, пересекающего зону дробления мощностью 2 метра и углом наклона: а) 0 градусов; б) 30 градусов; в) 60 градусов.  $\alpha$  – угол наклона зоны дробления



а)



б)

Рисунок 3 – Результаты оценки влияния мощности и угла зоны дробления на значения: а) максимальных напряжений; б) коэффициента концентрации напряжений на внешнем контуре бетонной крепи

Таблица 2 – Физико-механические характеристики пород в массиве

Параметр	Значение	Ед. изм.
Модуль деформации	15	ГПа
Сцепление	10	МПа
Коэффициент Пуассона	0,3	-
Угол внутреннего трения	30	град

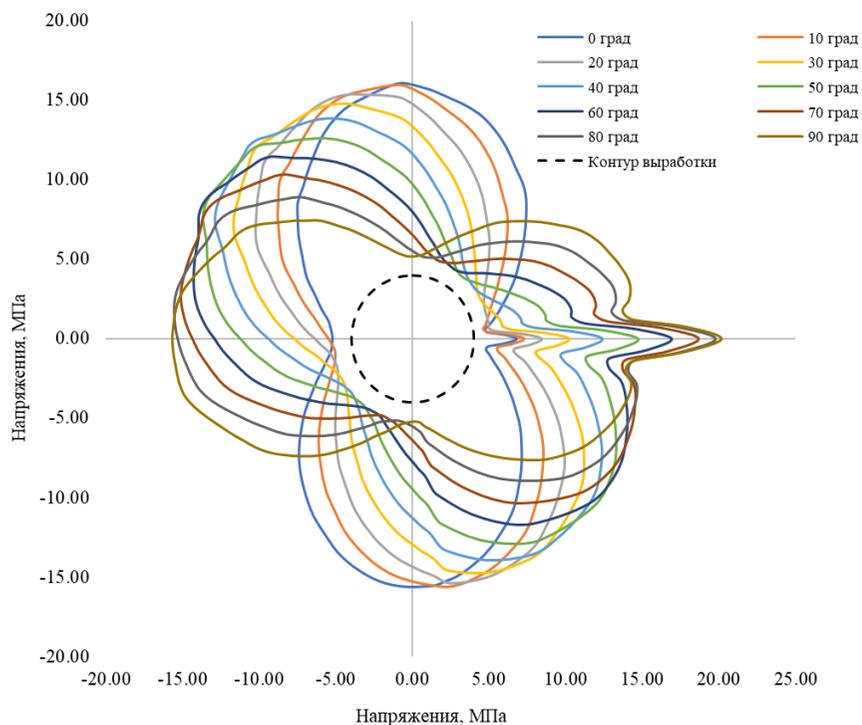


Рисунок 6 – Эпюра распределения тангенциальных напряжений на контуре выработки при различной ориентации максимальных горизонтальных напряжений в массиве

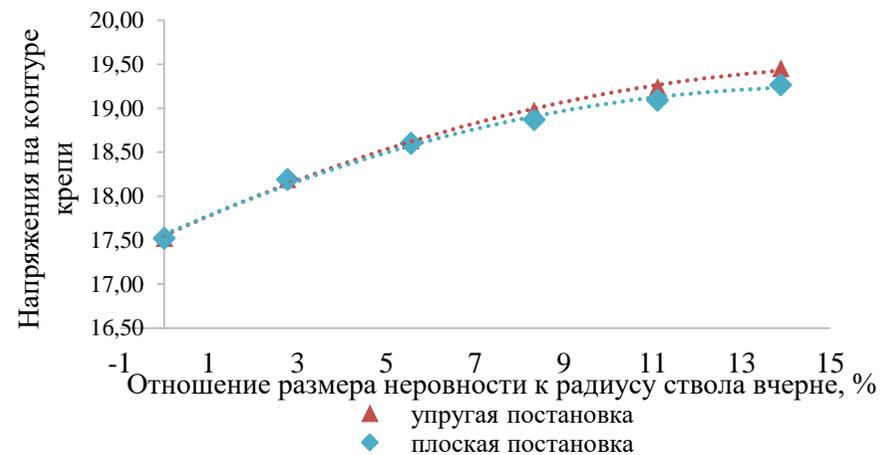


Рисунок 7 – Напряжения в крепи с учетом упругой и пластической моделей поведения бетона

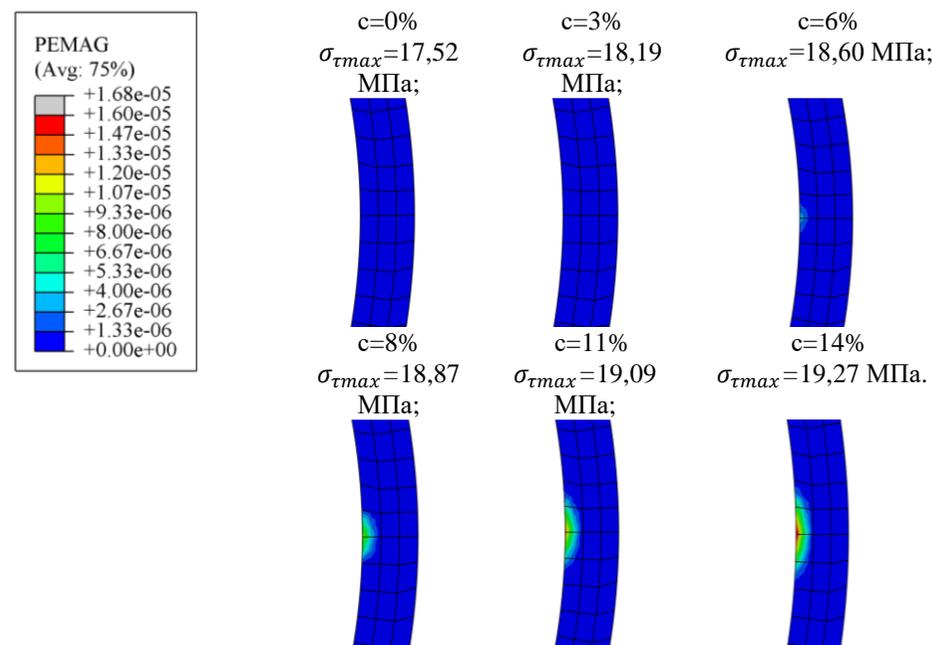


Рисунок 9 – Развитие зоны пластических деформаций в зависимости от относительного размера неровности и максимальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре крепи  $\sigma_{\tau max}$