

*На правах рукописи*



**Прищепа Дмитрий Вячеславович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК НА  
ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО  
«Уральский государственный горный университет»

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Латышев Олег Георгиевич.**
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, главный консультант по геомеханике SRK Consulting  
**Макаров Александр Борисович;**  
кандидат технических наук, директор Уральского филиала ОАО «ВНИМИ».  
**Аксёнов Анатолий Аркадьевич.**
- Ведущая организация: **ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург).**

Защита состоится «28» мая 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.010.02 при Институте горного дела УрО РАН по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук: <http://diss.igduran.ru>.

Автореферат диссертации разослан 2 апреля 2020 года

Просьба направлять отзывы почтой в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному выше адресу и на электронный адрес: [panzhin@igduran.ru](mailto:panzhin@igduran.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



**Панжин А.А.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Исследование и обеспечение устойчивости пород в подземной выработке является важнейшей научной и практической задачей горного дела. Решению данной задачи посвящены многочисленные научные исследования. Однако по общему признанию единой работоспособной теории устойчивости пород в выработке до настоящего времени не создано. Поэтому основным инструментом проектировщиков являются рекомендации Строительных правил СП (актуализированные версии бывших СНиП), которые изобилуют многочисленными и нередко весьма неопределенными коэффициентами. В этой связи в самих СП прямо указывается на необходимость дополнительных исследований факторов, определяющих устойчивость.

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) породных массивов в настоящее время широко используется «метод конечных элементов», реализованный в компьютерных моделях. Однако его использование адаптировано к упруго-линейному представлению массива. Применительно к реальным породным массивам значительную роль с точки зрения устойчивости играет их трещинная структура. Природные трещины представляют собой фрактальные объекты. Поэтому адекватную информацию о геометрии и распределении трещин может дать их анализ с позиций фрактальной геометрии.

Прогноз устойчивости основывается на соотношении функций НДС и разрушаемости пород на контуре горной выработки, которые зависят от множества случайных независимых факторов. В этой связи наиболее эффективным методом исследования данной функции является статистическое моделирование, основанное на имитации состояния массива с учетом его вероятностных характеристик (метод Монте-Карло).

В этой связи тема представленной диссертации, направленной на изучение указанных аспектов, является актуальной.

**Объект исследования** – устойчивость скальных горных пород в трещиноватых породных массивах, разрабатываемых подземным способом.

**Предмет исследования** – закономерности формирования функций напряженно-деформированного состояния и разрушаемости горных пород в окрестности подземной выработки.

**Цель работы** – повышение достоверности и надежности прогноза устойчивости горных пород в подземных выработках в условиях трещиноватого породного массива.

### **Задачи исследований:**

1. Исследование свойств горных пород, определяющих их разрушаемость на контуре горных выработок.
2. Оценка трещинной структуры горных пород и массивов с фрактальных позиций.

3. Разработка и реализация статистических моделей трещинной структуры горных пород.

4. Проектирование и исследований моделей концентрации напряжений на контуре подземной выработки с помощью имитационного моделирования (метод Монте-Карло).

5. Исследование напряженно-деформированного состояния трещиноватого породного массива методом конечных элементов.

6. Совершенствование методов прогноза устойчивости горных пород в подземной выработке.

**Основная идея работы** заключается в установлении закономерностей формирования функций НДС трещиноватого породного массива и его механических характеристик на основе фрактальных представлений и их использования для прогноза устойчивости пород в подземной выработке с вероятностных позиций.

Тема исследования соответствует п.п. 1, 4, 5 паспорта специальности 25.00.20.

**Методы исследований:** экспериментальное определение свойств горных пород и статистическая оценка их результатов; имитационное (метод Монте-Карло) и математическое (метод конечных элементов) моделирование трещиноватых пород и массивов. Анализ и обобщение результатов производилось на основе теоретических положений физики твердого тела (горных пород), геомеханики, фрактальной геометрии. **Информационная база** исследования включает публикации в открытой печати материалов по рассматриваемым проблемам, базу данных кафедры шахтного строительства УГГУ по свойствам и состоянию горных пород Урала, результаты собственных расчетов и экспериментов.

**Защищаемые научные положения:**

1. Прочность и деформируемость породного массива определяются фрактальными характеристиками трещинной структуры горных пород и динамикой их изменения под нагрузкой.

2. Прогноз напряженно-деформированного состояния осуществляется методом конечных элементов, где трещинная структура породного массива учитывается (задается) статистическим моделированием динамики смыкания трещин и дилатансией горных пород.

3. Оценка устойчивости горных пород в выработке производится по двум критериям: определение вероятности вывалообразования по фрактальным характеристикам контура выработки в проходке и расчет горного давления по схеме заданной деформации с учетом реологии породного массива.

**Научная новизна результатов исследования** заключается в следующем:

✓ Установлены закономерности развития и слияния трещин при нагружении горных пород, динамику которых определяет параболическая функция фрактальной кластерной размерности трещинной структуры; начало лавинообразного роста дефектов вызывающего разрушение пород (точка

бифуркации) фиксируется пороговым значением корреляционной размерности ( $d_2 = 1,75$ ).

✓ Разработаны статистические компьютерные модели развития трещинной структуры пород (метод Монте-Карло), основанные на алгоритме фрактального броуновского движения, методе «срединных смещений» и вероятностной оценке траектории трещин (алгоритм Фосса).

✓ Обоснована методика определения площади контактов берегов трещин на базе установленной зависимости изменения фрактальной размерности траектории трещин в процессе деформации горных пород.

✓ Разработана модель и процедура определения дилатансии при сдвиге горных пород по трещине, основанные на количественной оценке извилистости и шероховатости природных трещин.

✓ Введен новый показатель – фрактальный коэффициент формы, характеризующий концентрацию напряжений на контуре горной выработки.

✓ Обоснована вероятностная модель вывалообразования, отличающаяся представлением подземной выработки как фрактального объекта.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы** обеспечивается: представительным объемом данных, полученных в ходе лабораторных экспериментов и компьютерного моделирования, на основе которых сформулированы основные выводы по работе; удовлетворительным (в пределах естественной вариации) сходимостью аналитических и экспериментальных результатов прогноза устойчивости горных пород; соответствием полученных рекомендаций фундаментальным положениям геомеханики и физики разрушения горных пород.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке методов и компьютерных программ фрактального анализа трещинной структуры горных пород и формирования напряжено-деформированного состояния породного массива, обеспечивающих достоверность и надежность прогноза устойчивости пород в подземных выработках.

**Личный вклад автора** состоит в непосредственном участии в лабораторных исследованиях свойств горных пород и фрактальных характеристик трещинной структуры, в разработке и реализации компьютерных моделей трещиноватого породного массива и метода конечных элементов, в анализе результатов и получении основных выводов и рекомендаций работы.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на X Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» - г. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2016 г.; V Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» - г. Екатеринбург, УГГУ, 2016 г.; VI Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» - г. Екатеринбург, УГГУ, 2017 г.; XII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы

недропользования» - г. Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2018 г.; на V Международной конференции: «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений», - г. Екатеринбург, 2016 г.; на ежегодных молодежных научно-практических конференциях Уральского государственного горного университета – Екатеринбург (2013-2017 гг.).

**Реализация результатов работы.** Методика прогнозирования устойчивости трещиноватых массивов в подземных выработках, включающая результаты исследования свойств и состояния горных пород Юбилейного и Североуральских месторождений, методы и компьютерные программы имитационного моделирования условий устойчивости переданы для использования в организации: Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Уралгипротранс», ООО «Научно-производственное объединение УГГУ».

Теоретические результаты анализа свойств и трещинной структуры горных пород, компьютерные модели используются при чтении лекций, курсовом и дипломном проектировании по дисциплинам «Геомеханика», «Моделирование физических процессов в горном деле», «Физика горных пород», «Механика подземных сооружений».

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 15 научных работах. Из них 8 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях.

**Структура и объем работы.** Объем диссертации составляет 194 страниц машинописного текста, включая 86 рисунков, и 13 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 163 наименований и приложения.

В *главе 1* на основе анализа условий и методов прогноза устойчивости горных пород в подземных выработках поставлена цель и обоснованы задачи исследований.

*Глава 2* посвящена исследованию трещинной структуры и свойств горных пород Урала и их массивов с фрактальных позиций.

В *главе 3* описывается процедура разработки, реализации и анализа результатов статистических моделей трещиноватых породных массивов.

*Глава 4* содержит результаты исследования НДС методом конечных элементов на основе представления породного массива как трещиноватой среды с разным типом ее структуры.

*Глава 5* посвящена прогнозу устойчивости горных выработок на основе расчета по схемам с заданной нагрузкой и заданной деформацией.

Автор выражает благодарность научному руководителю, Латышеву Олегу Георгиевичу, за помощь и поддержку при выполнении данной работы, а также коллективу кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Устойчивость горных пород в подземной выработке определяется соотношением напряженно-деформированного состояния (НДС) массива и

функцией его разрушаемости. Применительно к скальным породам результаты исследования данного вопроса отражены в работах отечественных (И. В. Баклашов, Л. И. Барон, Н. С. Булычев, В. Т. Глушко, О. В. Зотеев, А. В. Зубков, О. Г. Латышев, Г. Г. Литвинский, М. М. Протождяконов, А. Г. Протосеня, К. В. Руппенейт, А. Д. Сашурин, А. Н. Ставрогин, И. А. Турчанинов Г. Л. Фисенко, и др.) и зарубежных ученых (Н. Р. Бартон, В. Витке, Р. Гудман и др.). Функция разрушаемости пород основывается на теориях прочности, основные положения которых отражены в работах А. Гриффитса, Ж. С. Ержанова, С. Н. Журкова, Ю. М. Карташова, Л. М. Качанова, Г. Г. Литвинского, О. Мора, В. В. Ржевского, Г. П. Черепанова, А. Н. Шашенко и др.

В соответствии с целью диссертационного исследования вопросы устойчивости рассматриваются применительно к трещиноватым породным массивам. Породный массив имеет иерархичное устройство (М. А. Садовский). Поэтому изучение трещиноватости горных пород на любом уровне позволяет распространять результаты на другие уровни иерархии (низшие или высшие). В этой связи выполнены исследования трещин на микроуровне (методом люминесцентной дефектоскопии) и макроуровне (путем профилирования поверхности трещин).

Обобщение и анализ результатов, выполненных на кафедре шахтного строительства исследований (О. Г. Латышев) и опытов автора позволили установить следующее. Природные трещины являются фрактальными объектами, обладающими свойствами самоподобия. Их геометрия адекватно оценивается различными типами дробной фрактальной размерности. Определение величины фрактальной размерности основывается на законе Ричардсона, связывающего размер объекта  $L(\delta)$  с масштабом его измерения  $\delta$ :  $L(\delta) = \alpha \delta^\beta$ , где  $\alpha$  - некоторая константа;  $\beta$  - отрицательный показатель степени ( $\beta = 1 - d_f$ , где  $d_f$  - фрактальная размерность трещины).

Истинная (фрактальная) длина трещины характеризуется ее фрактальной размерностью  $L_{\text{фр}} = L_0(L_0/\delta)^{d_f-1}$ , где  $L_0$  - линейная длина трещины (расстояние между ее вершинами);  $\delta$  - масштаб измерения (определяется требуемой точностью). Определение фрактальной размерности траектории трещины производилось с помощью разработанной компьютерной программы на основе представления закона Ричардсона в виде:  $\ln L(\delta_i) = (1 - d_f) \ln \delta_i + \ln \alpha$ . Площадь поверхности берегов трещины определяется фрактальной размерностью  $D$ , величина которой исследовалась триангуляционным методом, заключающемся в представлении поверхности набором пирамид с различными размерами оснований.

Для изучения динамики развития трещин при нагружении горных пород выполнены исследования образцов с фиксацией изменения их трещинной структуры люминесцентным методом и параллельным измерением деформации. Установлено, что по мере нагружения образцов наблюдалось зарождение новых трещин, развитие существующих трещин, их слияние с образованием очагов нарушений (кластеров). Мерой данного процесса служит фрактальная кластерная размерность  $d_c = - \ln S(\lambda) / \ln \lambda$ , где  $S(\lambda)$  - площадь

кластеров, измеренных с разрешающей способностью  $\lambda$ . С ростом нагрузки  $\sigma$  кластерная размерность нелинейно возрастает, и темп ее роста описывается уравнением параболы:

$$d_c = d_{c0} + k (\sigma^2 - b \sigma), \quad (1)$$

где  $k$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты (для описываемых опытов  $k = 8 \cdot 10^{-5}$  и  $b = 8,75$ ).

Неоднородность распределения трещин по объему пород оценивается их корреляционной размерностью  $d_2$ , отражающей относительное расстояние между трещинами. Установлено, что при некотором критическом значении корреляционной размерности наступает лавинообразный рост трещин и разрушение породы. Для описываемых опытов эта критическая величина (точка бифуркации) составляет  $d_2 = 1,75$ .

Вероятностный характер развития трещин оценивается энтропийной размерностью трещинной структуры пород. Установлен экстремальный характер изменения энтропийной размерности по мере нагружения образцов. В начальной стадии неоднородность трещинной структуры возрастает, что проявляется в экстремуме (минимуме) графика. В последующих циклах нагружения развивающиеся трещины и вновь зарождающиеся дефекты все более равномерно заполняют объем образцов, и информационная размерность монотонно возрастает.

Полученные закономерности развития трещинной структуры пород создают базу для анализа их свойств и разработки статистических моделей прочности и устойчивости горных пород в выработке.

Следующим этапом исследований является определение и анализ прочностных и деформационных свойств горных пород. Для прогноза характеристик породного массива изучены и количественно оценены основные факторы, определяющие свойства массива: действие горного давления, увлажнения, масштабного фактора и трещиноватости. На основе разработанной Г. Г. Литвинским «дифференциальной теории прочности» установлены параметры паспорта прочности трещиноватого массива:

$$\tau = (1 - \omega) \tau_0 \left[ \frac{\sigma}{\sigma_p} + 1 \right]^{\alpha(1-\omega)} \left( \frac{\sigma}{(1-\omega)\sigma_p} + 1 \right)^{\alpha\omega}. \quad (2)$$

Здесь коэффициент  $\alpha$  определяется в лабораторных испытаниях по уравнению:  $\alpha = 0,38 + 0,27 (1/k_c)$ , где  $k_c = S/S_0 = \tau_0/\tau_c$  является мерой трещиноватости породных образцов. Его величина характеризует превышение измеренной площади образца над истинной площадью контактов минеральных зерен ( $S/S_0$ ), что эквивалентно отношению истинной прочности породы на сдвиг  $\tau_0$  к измеренной в опыте  $\tau_c$ . Показатель  $k_c$  находится по разности ординат огибающей предельных кругов напряжений и ее асимптоты при данном уровне напряжений  $\sigma$ . Показатель нарушенности породного массива  $\omega$  в общем случае

количественно оценивает степень снижения прочности массива по сравнению с образцом. Он отражает комплексное влияние масштабного эффекта и трещиноватости массива.

На основании вероятностного анализа результатов экспериментальных исследований получено уравнение масштабного эффекта:

$$\lambda = \sigma_V / [\sigma] = \lambda_0 + mV^{1/k}, \quad (3)$$

где  $[\sigma]$  – прочность породы, определяемая в лабораторных экспериментах на образцах;  $\lambda_0$  – предельное снижение прочности при  $V \rightarrow \infty$ ;  $m$  – параметр масштабного фактора;  $k$  – коэффициент однородности горной породы, определяемый степенью ее трещиноватости. Для широкого спектра скальных пород Урала получены значения данных показателей в интервалах:  $\lambda_0 = 0,29 - 0,61$ ;  $m = 0,7 - 1,3$ ;  $k = 2,0 - 3,7$ . Контрольные эксперименты подтвердили адекватность полученного уравнения (расхождение не более 10 %).

Совокупный коэффициент структурного ослабления породного массива, учитывающий микро- и макротрещиноватость, выражается формулой:

$$k_{\text{стр}} = \frac{a + b (1 - V_\sigma)}{c (0,2J_T + 1)}, \quad (4)$$

где  $V_\sigma$  – коэффициент вариации единичных определений прочности;  $J_T$  – модуль трещиноватости породного массива. Для изученных нами пород:  $a = 0,7$ ;  $b = 0,8$ ;  $c = 1,25$ .

Анализ результатов лабораторного исследования образцов и компрессионных испытаний массива, выполненных сотрудниками ОАО «Уралгипротранс», позволил выделить два типа деформационных характеристик – с явно выраженной упругой зоной (для монолитных пород) и нелинейным характером деформирования (для трещиноватых пород и массивов). Для описания закономерностей деформирования пород второго типа (представляющих интерес в контексте данной работы) получена функция их трещиноватости  $F(E, \sigma)$ , характеризующую динамику смыкания трещин. Установлена ее зависимость от уровня приложенных напряжений  $\sigma$ :

$$F(E, \sigma) = E/E_0 - 1 = a (\sigma^2 + k\sigma), \quad (5)$$

где установленные в опытах для изученных пород коэффициенты:  $a = 7 \cdot 10^{-4}$ ;  $k = 2,5$ .

Устойчивость горных пород в выработке определяется множеством случайных независимых факторов, учесть которые в единой детерминированной модели не представляется возможным. В качестве критерия устойчивости используется величина надежности, принимаемая как вероятность  $P$  выполнения неравенства в виде:

$$H_p = P [F_1(R) - F_2(K) F_3(\sigma) > 0], \quad (6)$$

где  $F_1(R)$  – функция разрушаемости (прочности) массива на данном уровне иерархии;  $F_2(K)$  – функция концентрации напряжений на контуре выработки;  $F_3(\sigma)$  – функция действующих в массиве напряжений. Исследование функции  $F_1(R)$  описано выше. Распределение напряжений в породном массиве можно оценить математическим моделированием с помощью метода «конечных элементов» (МКЭ). Нами для этого использован лицензионный программный комплекс «Plaxis». Для задания начальных условий требуется установить деформационные характеристики массива и параметр дилатансии.

К. В. Руппенейтом породный массив рассматривается как среда, в которой горные породы и трещины воспринимаются как отдельные слои с различными свойствами. Все многообразие реальных трещиноватых массивов можно свести к трем типам их трещинной структуры: параллельно расположенные трещины; хаотично распределенная трещиноватость; пересекающиеся трещины, образующие блочное строение массива. Каждому типу массива сопоставляется свой модуль трещиноватости. В частности, для блочного массива модуль деформации определится соотношением:

$$E = \frac{E_0}{1 + \sum_{i=1}^n \eta_i (1 - \sin^4 \Theta_i) \frac{L_i}{X_m} \cos \Theta_i}, \quad (7)$$

где  $E_0$  – модуль упругости ненарушенных вмещающих пород;  $L_i/X_m$  – отношение среднего размера блока к линейному размеру области влияния выработки;  $\Theta_i$  – угол падения  $i$ -й системы трещин с геометрической характеристикой  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \frac{\delta_i}{l_i \xi_i}, \quad (8)$$

где  $\delta_i$  – средняя ширина раскрытия трещин  $i$ -й системы;  $l_i$  – среднее расстояние между трещинами;  $\xi_i$  – относительная площадь скальных контактов берегов трещин.

Нами рассмотрены инженерно-геологические условия Юбилейного месторождения (Башкортостан). Анализ трещинной структуры породных массивов показал, что распределение трещин по размерам подчиняется распределению Вейбулла:  $F(L_i) = 1 - \exp[-(b L_i/a)^m]$ . По всей толще пород средний модуль трещиноватости составляет  $J_T = 7,23$  1/м при среднеквадратическом отклонении  $S = 3,22$  1/м. Коэффициент вариации размеров блоков  $K_{\text{вар}} = 44,5$  %. Этим данным соответствуют параметры распределения Вейбулла:  $b = 0,891$ ;  $m = 2,31$ . Для данного массива вероятный размер породного блока составляет  $L_i = 0,14$  м.

Ширина зияния  $\delta_i$  и относительная площадь контактов  $\xi_i$  в формуле (8) показатели взаимосвязанные и их определение нуждается в дополнительных исследованиях. Нами на основании вышеприведенных результатов выполнено

статистическое моделирование трещинной структуры горных пород. На первом этапе реализована модель генерирования трещины, основанная на фрактальном броуновском движении, где приращения трещины  $\Delta t$  определяются ее фрактальной размерностью  $d_f = 2 - H$ :  $M[|x(t_2) - x(t_1)|] = \sqrt{2/\pi} \sigma(t_2 - t_1)^H$ . Для моделирования природной трещины в модели назначаются ее характерные точки, и траектория задается методом «срединных смещений», дополненным алгоритмом Фосса, учитывающим вероятностную природу трещин. Таким образом, статистическая модель генерирует представительную трещину, характеризующую данный породный массив. Множественная реализация моделей позволяют получить статистически надежные параметры трещиноватости.

На втором этапе средствами компьютерной графики изучалась динамика смыкания трещин отрыва, сдвига и их комбинации. Установлено, что за счет смятия берегов трещин при их сближении они становятся более сглаженными. Это надежно оценивается фрактальной размерностью траектории трещин. На рисунке 1 в качестве примера показан процесс сближения берегов трещин в модели гранита.

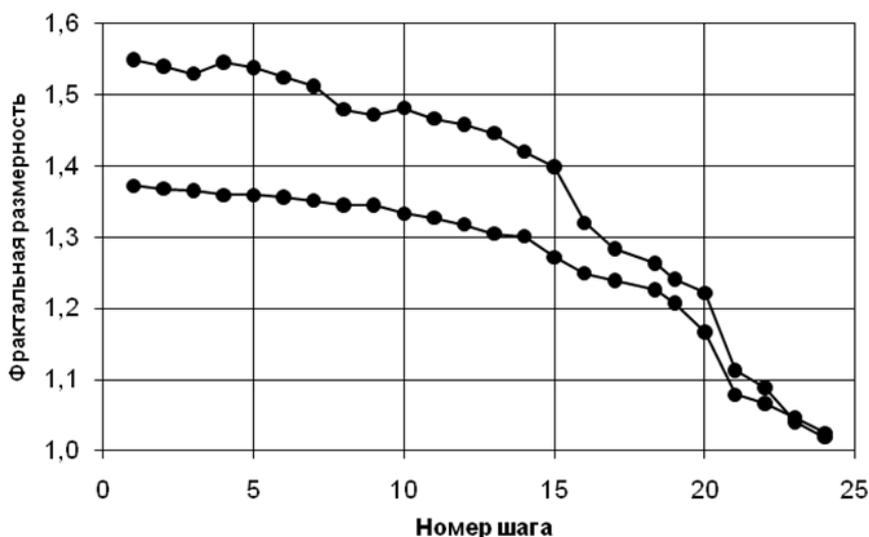


Рисунок 1 – Изменение фрактальной размерности противоположных берегов трещины при их сближении и деформировании

Обобщение модельных представлений, а также исследование реальных трещин на обнажениях пород позволили получить уравнение связи относительной площади контактов берегов трещин с фрактальной размерностью  $d_{fi}$  их средней линии:

$$\xi_i = k d_{f0} (1 - b d_{fi}), \quad (9)$$

где  $d_{f0}$  – фрактальная размерность средней линии данного класса трещин;  $k$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от соотношения нормальных и сдвигающих деформаций. Для представительных трещин Юбилейного месторождения:  $d_{f0} = 1,468$ ,  $k = 7,9 \cdot 10^{-3}$ ,  $b = 0,68$ .

Важнейшим фактором, определяющим напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива, является дилатансия, т. е. раздвижка берегов трещины при их сдвиге за счет подъема по неровностям извилистости. Для ее оценки проведена серия экспериментов по сдвигу горных пород по трещине с фиксированием продольной и поперечной деформации образцов. Установлено, что в зависимости от усилий прижатия (нормальных напряжений) взаимосвязь поперечного расширения и деформации сдвига описывается нелинейной зависимостью. Тангенс угла наклона касательной в финальной части графика является параметром дилатансии  $\eta_{кр}$ .

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о большой вариации параметра дилатансии  $\eta_{кр}$  для одинаковых условий испытаний одной и той же горной породы. Это обусловлено принципиальной невозможностью многократных испытаний одной и той же трещины. В этом случае эффективным инструментом исследования закономерностей дилатансии служит статистическое моделирование. Базой модели являются результаты экспериментальных исследований и описанные выше компьютерные программы генерирования и фрактального анализа поверхности трещин. Общее уравнение модели дилатансии:

$$V = u_r \operatorname{tg} \alpha_B + K - \Delta V, \quad (10)$$

определяет подъем берегов трещины по линии ее извилистости  $u_r \operatorname{tg} \alpha_B$  при деформации сдвига  $u_r$  и характеристике извилистости  $\alpha_B$ ; дилатансии за счет разрушения зубцов шероховатости  $K = k_1 u_r^n$ ; смятие поверхности трещины  $\Delta V = \Delta \sigma / K_n$  при данной величине нормальных напряжений  $\sigma$  и жесткости трещины  $K_n$ . В этой связи на первом этапе моделирования выполняется фрактальный анализ траектории трещины с выделением и оценкой параметров извилистости  $\alpha_B$  и шероховатости  $K_{ш}$ . Затем определяется вероятностная модель зуба шероховатости и производится построение графика дилатансии при заданной пригрузке трещины  $\sigma$ .

По результатам реализации модели для различных горных пород, условий нагружения и геометрии трещин установлены следующие закономерности. Параметр дилатансии определяется соотношением показателей извилистости и шероховатости в виде:

$$\eta_{кр} = k_\sigma (1 - \alpha_B / K_{ш}), \quad (11)$$

где  $k_\sigma$  – эмпирический коэффициент, зависящий от прочности материала берегов трещины.

В свою очередь коэффициент шероховатости трещины непосредственно определяется ее фрактальной размерностью  $d_f$ :

$$K_{ш} = 0,5 d_f^{5.2}. \quad (12)$$

Описанные статистические модели служат основой задания начальных и граничных условий для реализации метода конечных элементов (МКЭ) в пакете компьютерных программ «Plaxis». Для условий Юбилейного месторождения определено напряженно-деформированное состояние (НДС) различных блоков месторождения с различной их трещинной структурой. На рисунке 2 в качестве примера приведена компьютерная распечатка результатов оценки НДС для базальтового массива, имеющего блочное строение.

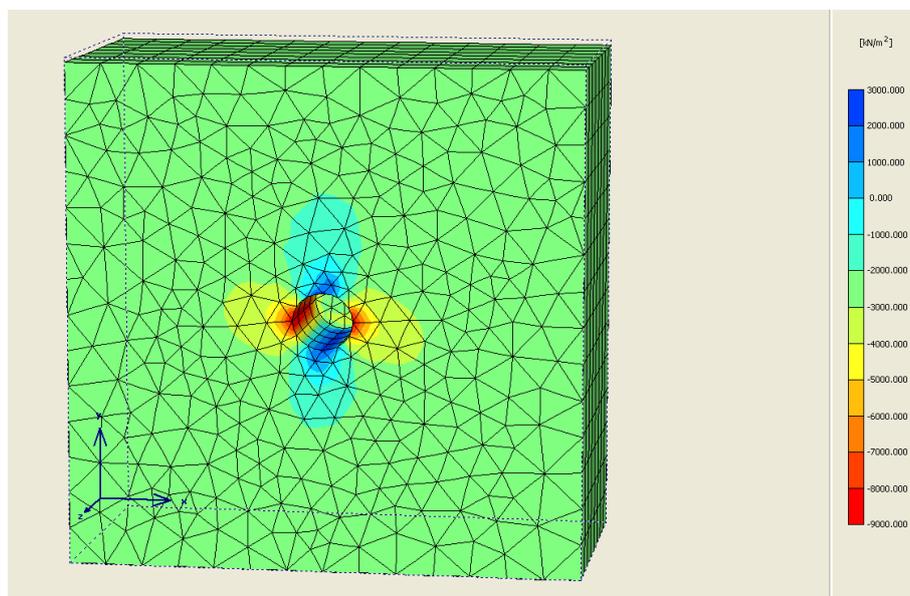


Рисунок 2 – Пример реализации метода конечных элементов

Моделирование НДС в окрестности подземной выработки опирается на представлении ее контура геометрически правильными «гладкими» функциями. В реальных условиях сечение выработок представляет собой бесконечно изломанные поверхности, которые нельзя описать дифференцируемыми функциями. Причем технологические неровности контура выработок, обусловленные реальным производством БВР, оказывают на порядок большее влияние на величину коэффициента концентрации напряжений  $K_\sigma$ , чем разница в проектной форме сечения выработок. Для учета этого нами предложен комплексный показатель – фрактальный коэффициент формы выработки:

$$k_f = \frac{4\pi S}{P_f^2}. \quad (13)$$

Здесь  $S$  – проектная площадь сечения выработки геометрически правильной формы;  $P_f$  – периметр выработки в проходке. Тогда, учитывая равную вероятность отклонения реального сечения выработок от ее конформного отображения, площадь  $S$  остается неизменной, а ее периметр будет тем больше, чем выше степень неровностей контура. Истинный периметр сечения выработки (как бесконечно изломанной кривой) определится ее

фрактальной размерностью  $d_f$ . в виде:  $P_f = P_0 (P_0/\delta)^{d_f - 1}$ , где  $\delta$  – принятая точность (шаг) измерения – определяется характером решаемой задачи; в данных условиях принято  $\delta = 1/100 P_0$ ;  $P_0$  – проектный периметр выработки как геометрически правильной фигуры.

Из формулы (13) следует, что чем более изрезан контур выработки, тем больше ее периметр  $P_f$  и тем меньше фрактальный коэффициент формы. Для нахождения связи коэффициента концентрации напряжений на контуре выработки с ее фрактальным коэффициентом формы использованы результаты замеры сечений реальных выработок Североуральских бокситовых рудников. Коэффициент концентрации напряжений  $K_\sigma$  вычислялся по методике И. В. Баклашова путем решения параметрических уравнений, описывающих контур выработки, методом Колосова-Мухелишвили. Корреляционный анализ взаимосвязи  $K_\sigma = f(k_f)$  показал ее высокую статистическую надежность ( $R^2 = 0,96$ ). Эта зависимость (рисунок 3) описывается уравнением:

$$K_\sigma = 2,24 k_f^{-0,1}. \quad (14)$$

Таким образом, коэффициент концентрации напряжений определяется геометрией контура выработки и описанными выше ее фрактальными характеристиками. Однако координаты сечения выработки зависят от множества случайных независимых факторов, определяемых технологией БВР и свойствами породного массива. Поэтому для одной и той же выработки после каждого цикла БВР будут реализовываться различные по геометрии контуры. В этой связи для анализа данных факторов разработана имитационная модель формирования контура выработки, основанная на использовании уравнения фрактального броуновского движения. Усреднение множественных реализаций модели позволяет получить вероятностные и фрактальные характеристики выработки в заданных горно-геологических условиях.

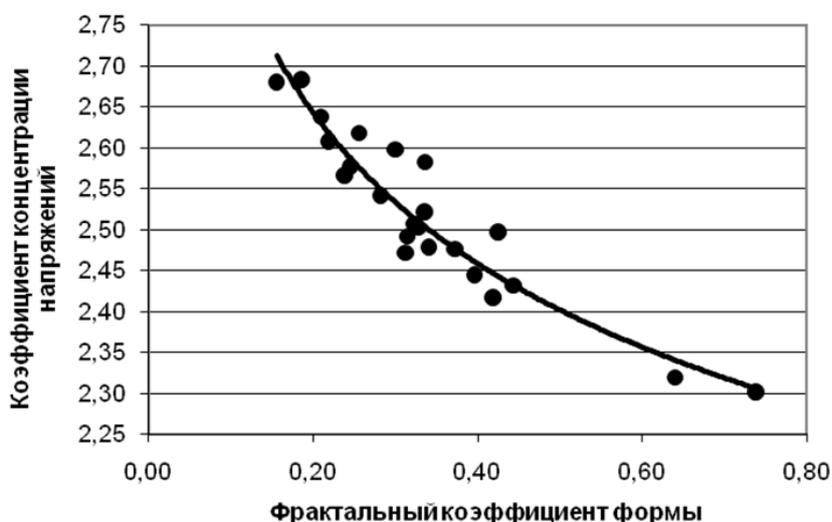


Рисунок 3 – Взаимосвязь коэффициента концентрации напряжений с фрактальным коэффициентом формы горной выработки

Реализация метода конечных элементов для вышеописанных условий позволяет получить распределение напряжений на контуре выработки,

представленной в модели ее эквивалентным сечением в виде окружности. Тогда определенный в результате реализации имитационной модели фрактальный коэффициент формы выработки позволяет оценить коэффициент концентрации напряжений с учетом неровностей контура выработки в проходке:

$$K = K_0 - 0,13 \ln(k_f). \quad (15)$$

Здесь  $K_0$  – коэффициент концентрации напряжений, определяемый в модели МКЭ для гладкого контура выработки. Знак «-» в формуле (15) отражает тот факт, что фрактальный коэффициент формы ( $k_f$ ) заведомо меньше единицы.

Описанные выше результаты исследований являются основой прогноза устойчивости горных пород в выработке для реальных горно-геологических условий. Рассмотрены методы расчета по схеме заданной нагрузки и схеме заданной деформации. В первом случае прогноз осуществляется на основе теории сводообразования М. М. Протодяконова. В скальных трещиноватых массивах разрушение пород в объеме свода естественного равновесия определяется механизмом вывалообразования. Для оценки вероятности образования вывалов использована методика И. В. Баклашова и О. В. Тимофеева, адаптированная к условиям разработки Юбилейного месторождения и учитывающая результаты вышеприведенных исследований. В частности, напряжения на контуре выработки определялись методом конечных элементов, характеристики неоднородности вмещающего массива оценивались вышеизложенными методиками и компьютерными программами. На этой основе разработана имитационная компьютерная программа вывалообразования, позволяющая прогнозировать вероятностные аспекты устойчивости выработок для конкретных условий месторождения. В основу модели положена система уравнений, связывающих вероятность вывалов с фрактальными характеристиками выработки и свойствами вмещающих пород.

Методы расчета по схеме заданных деформаций опираются на анализ совместной работы крепи и породного массива. Анализ рекомендаций Строительных правил (бывшие СНиП) и результатов исследований, положенных в основу этих рекомендаций (И. Н. Кацауров) позволили получить формулу оценки смещений пород в сторону выработанного пространства:

$$U = \mu r_0 \left[ \exp\left(\frac{F(\sigma, k_f)}{\sigma_{(м)}}\right) - 1 \right], \quad (16)$$

где  $r_0$  – радиус эквивалентного сечения выработки;  $F(\sigma, k_f)$  – функция действующих напряжений, определяемая вышеприведенными методами конечных элементов и фрактального анализа геометрии выработки;  $\sigma_{(м)}$  – прочность породного массива, оцениваемая соотношениями (2 - 4);  $\mu$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий трещинную структуру породного массива. Использование комплекса разработанных компьютерных

программ позволило определить значения коэффициента пропорциональности  $\mu$  для различных типов трещинной структуры породных массивов Юбилейного месторождения.

Для оценки совместной работы крепи и массива необходимо определить закономерности развития деформаций пород во времени. С этой целью нами выполнен комплекс исследований реологических характеристик горных пород. Установлено, что ползучесть пород адекватно описывается уравнениями теории наследственной ползучести Больцмана-Вольтерра со степенным ядром ползучести  $L = (T, \tau) = \delta (t - \tau)^{-\alpha}$ , где  $\alpha$  и  $\delta$  - параметры ядра ползучести. Определены значения этих параметров для основных типов изучаемых пород. Доказано (Ж. С. Ержанов), что деформационные характеристики пород изменяются во времени  $t$  по следующему закону:  $E(t) = E_0 \cdot \exp [-\omega \delta \Gamma(1 - \alpha) t^{1-\alpha}]$ , где  $\Gamma()$  – гамма-функция;  $t$  – время стояния выработки без крепи;  $\omega = (1 - \alpha)^{1-\alpha}$ .

Величина  $E_0$  соответствует определенному выше модулю деформации различных типов массива, который задает начальные условия расчетов методом конечных элементов. Путем ввода в программу МКЭ значений  $E(t)$  получены зависимости смещений пород в выработку от времени ее стояния без крепи. Это служит базой оценки устойчивости выработки, выбора типа и расчета прочных размеров крепи.

В итоге выполнена оценка информативности, достоверности и адекватности разработанных моделей условиям разработки Юбилейного месторождения. В качестве критерия надежности прогноза принято:  $U = H_d / H(\omega) - 1$ , где  $H(\omega)$  - энтропия системы «выработка-массив»;  $H_d$  - допустимое значение энтропии (для принятого в инженерной практике уровня значимости допустимая вероятность неустойчивого состояния выработки составляет  $P_d(\omega_{\text{ну}}) = 0,05$  и  $H_d = 0,287$  бит). Величина  $U$  изменяется от  $\infty$  до  $-1$ . Значения  $U > 0$  (т. е. при  $H_d > H(\omega)$ ) свидетельствуют о заведомой устойчивости выработки. Чем ближе значения коэффициента к  $U = -1$ , тем больше опасность разрушения пород в выработке. На этой основе составлены прогнозные диаграммы устойчивости для типичных горно-геологических условий Юбилейного месторождения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано новое решение научно-практической задачи прогноза устойчивости трещиноватых горных пород и массивов, имеющее существенное значение для проектирования разработки месторождений полезных ископаемых.

При достижении поставленной цели и решении задач диссертационного исследования в работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. На основании экспериментальных и модельных представлений установлены закономерности формирования трещинной структуры горных

пород, динамики их развития под нагрузкой и разработаны методы фрактального анализа характеристик трещин на различных уровнях иерархии.

2. Определены прочностные и деформационные характеристики горных пород и трещиноватых породных массивов с учетом их нарушенности, влажности и масштабного эффекта.

3. Разработаны статистические компьютерные модели трещинной структуры горных пород, основанные законах фрактального броуновского движения и позволяющие в вероятностном аспекте определять площадь контактов берегов трещин и дилатансию пород при деформации массива.

4. Обоснована методика прогнозирования деформационных характеристик породного массива с различной характеристикой их трещинной структуры: с системой параллельных протяженных, хаотично ориентированных трещин и пересекающихся трещин, образующих блочное строение массива.

5. Разработана конечно-элементная модель прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) приконтурного массива с различным представлением его трещинной структуры. Определены характеристики НДС для реальных условий разработки Юбилейного месторождения.

6. На базе имитационной модели проходки выработок определена процедура формирования вероятностного сечения выработки и определения коэффициента концентрации напряжений на ее контуре с помощью фрактального коэффициента формы.

7. Сформирована модель вывалообразования на контуре выработок, основанная на оценке НДС методом конечных элементов и характеристик неоднородности вмещающего массива, полученных по разработанным методикам и компьютерным программам.

8. Разработана методика прогноза конвергенции подземных выработок на базе определения функции напряженно-деформированного состояния и прочности породного массива с различным типом их трещинной структуры. Определение и введение в модели реологических характеристик пород позволяет оценить смещение пород в выработку за время до установки крепи.

9. Разработанный комплекс методик, статистических моделей и компьютерных программ передан к использованию Институт горного дела УрО РАН, ОАО «Уралгипротранс», ООО «Научно-производственное объединение УГГУ».

## **ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, определяемых Высшей аттестационной комиссией*

1. Латышев О.Г. Фрактальная размерность трещины как мера ее шероховатости / О. Г. Латышев, В. В. Франц В.В., Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. - 2015. - №8. С.55-60.

2. Латышев О.Г. Исследование поверхности природных трещин как фрактального объекта / О. Г. Латышев, В. В. Франц, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. - 2016. - №3. С.44-50.
3. Латышев О.Г. Исследование дилатансии при сдвиге горных пород по трещине /О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. - 2016. - №4. С.55-59.
4. Латышев О.Г. Статистическое моделирование природных трещин / О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа, В. В. Франц // Изв. вузов. Горный журнал. - 2016. - №5. С.38-45.
5. Латышев О.Г. Прогноз деформационных характеристик трещиноватого породного массива / О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа// Изв. вузов. Горный журнал. - 2017. - №1. С.80-85.
6. Латышев О.Г. Моделирование и прогноз прочности при сдвиге горных пород по трещине/ О. Г. Латышев, В. В. Франц, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. - 2017. - №2. С.50-56.
7. Латышев О.Г. Фрактальный коэффициент формы подземных выработок / О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа // Изв. вузов. Горный журнал. - 2017. - №8. С.53-57.
8. Латышев О.Г. Прогноз смещений горных пород для определения нагрузки на крепь подземной выработки/ О. Г. Латышев, Д. В. Прищепа, О. О. Казак // Изв. вузов. Горный журнал. - 2018. - №2. С.23-29.

*Статьи, опубликованные в других изданиях*

9. Соколов В.В. Исследование фрактальной размерности контура подземной выработки для оценки коэффициента концентрации напряжений / В. В. Соколов, Д. В. Прищепа, Д. Р., Садрьев // XI Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа регионам»: сборник докладов, Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – с. 242-243.
10. Прищепа Д. В. Имитационная модель формирования контура подземной выработки при производстве буровзрывных работ/Д. В. Прищепа, Д. Р. Садрьев, О. О. Казак // XII Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа – регионам» : сборник докладов, Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. – с.345-346.
11. Прищепа Д.В. Анализ методов прогноза устойчивости пород в подземной выработке / Д. В. Прищепа // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений»: сборник докладов, Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2016. – с.191-192.
12. Прищепа Д.В. Моделирование НДС трещиноватых массивов методом конечных элементов / Д. В. Прищепа // XIV Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа – регионам»:

- сборник докладов, Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – с.337-338.
13. Прищепа Д.В. Исследование реологических характеристик горных пород / Д. В, Прищепа // Проектирование строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: Труды V международной конференции, Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. - с. 180-185.
14. Прищепа Д.В. Использование метода конечных элементов для исследования напряженно-деформированного состояния трещиноватого породного массива / Д. В. Прищепа, О. Г. Латышев // VI Международная научно-техническая конференция «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений»: сборник докладов, Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2017. – с.258-265.
15. Прищепа Д.В. Обоснование моделей напряженно-деформированного состояния трещиноватого породного массива/ Д. В. Прищепа // Проблемы недропользования. 2017. №1. с.81-88.

