

УДК 622.24:622.83

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ РАЗГРУЗОЧНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ ПРИВЕДЕНИЯ ВЫРАБОТОК В НЕУДАРООПАСНОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



И. И. БАГАУТДИНОВ¹,
ведущий научный сотрудник лаборатории горного давления на рудных и нерудных месторождениях, канд. техн. наук



Б. Ю. ЗУЕВ¹,
зав. лабораторией моделирования, канд. техн. наук, b.zuev2010@yandex.ru



А. А. СТРЕШНЕВ²,
начальник Службы прогноза и предотвращения горных ударов

¹ Научный центр геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия

Введение

К настоящему времени в мировой практике подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых накоплен значительный потенциал управления геомеханическими процессами, т. е. целенаправленного изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород с целью обеспечения эффективного и безопасного ведения горных работ [1–4].

Несмотря на огромные достижения в области численного моделирования, до настоящего времени возникают серьезные трудности при определении напряжений в областях массива при его разрушении с разрывом его сплошности, обусловленного влиянием техногенных факторов. Вместе с тем при решении подобных задач одним из наиболее эффективных методов исследований является физическое моделирование на эквивалентных материалах (ЭМ) [5, 6]. Объединение наиболее сильных сторон методов численного и физического моделирования для более детального и достоверного исследования подобных нелинейных геомеханических процессов в плоской и объемной

Предложена комплексная методика численного и физического моделирования с целью повышения достоверности оценки эффективности бурения разгрузочных скважин для приведения выработок в неудароопасное состояние. Процесс формирования разгрузочной щели на контуре одиночной выработки при численном моделировании выполнен с помощью сертифицированного программного комплекса PLAXIS 3D компании Bentley Systems в трехмерной осесимметричной постановке. Процессы, связанные с формированием разгрузочной щели на контуре одиночной выработки, были также воспроизведены с помощью метода физического моделирования на эквивалентных материалах. Приведенные результаты свидетельствуют о перспективности взаимного применения методов физического и численного моделирования для повышения достоверности выполняемых исследований.

Ключевые слова: численное моделирование, физическое моделирование, лабораторные испытания, эквивалентные материалы, разгрузочные скважины

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.05

постановке задачи может обеспечить более полное представление об их сущности и повысить надежность прогноза геодинамических форм проявления горного давления.

В частности, на основании многолетнего опыта применения разгрузочных мероприятий на подземных рудниках КФ АО «Апатит» следует отметить, что применяемые сегодня на рудниках типовые паспорта бурения разгрузочных скважин лишь отчасти учитывают прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) массива, изменения геомеханической обстановки в результате ведения очистных работ и параметры формирования зон хрупкого разрушения породы на контуре выработки. Повышение надежности прогноза изменения параметров этих зон хрупкого разрушения в условиях увеличения глубины и интенсивности ведения горных работ на базе комплексного моделирования, по мнению авторов, является весьма актуальным и одним из основных путей совершенствования метода приведения выработок в неудароопасное состояние [7–10].

Нормативными документами установлено, что основным методом приведения подземных выработок в неудароопасное состояние является бурение разгрузочных скважин. В основе метода заложен принцип использования внутренней потенциальной энергии высоконапряженного горного массива. В области концентрации тангенциальных напряжений на контуре горной выработки бурят створку параллельных скважин.

Переход межскважинных целиков в предельное состояние в результате действия горного давления приводит к перемещению области концентрации напряжений от контура выработки в глубь массива. Риск возникновения подземного горного удара в результате выполнения указанных мероприятий значительно снижается при условии обеспечения эффективных проектных и фактических параметров разгрузочных скважин.

Ниже приведены результаты численного и физического моделирования, а также данные исследования геомеханических процессов при образовании разгрузочной щели, которое имитируют фактически применяемые параметры разгрузки [11–14].

Основной целью выполненных исследований являлась оценка эффективности моделируемых разгрузочных мероприятий, основанная на сопоставительном анализе параметров нелинейных геомеханических процессов, полученных при численном и физическом моделировании.

Методология численного моделирования

Процесс формирования разгрузочной щели на контуре одиночной выработки выполнен методом численного моделирования с использованием сертифицированного программного комплекса PLAXIS 3D компании Bentley Systems в трехмерной осесимметричной постановке.

Граничные условия в модели расположены на расстоянии 2,5 линейных размеров выработки, находятся за границами зоны влияния выработки на массив горных пород и заданы по граням, поверхности и почве следующим образом:

- боковые грани модели – $u_x = 0; u_y = 0; u_z = 0$;
- верхняя грань (поверхность) – $u_x = 0; u_y = 0; u_z = 0$;
- нижняя грань (почва) – $u_x = 0; u_y = 0; u_z = 0$.

Исходное (природное) поле напряжений на месторождении является гравитационно-тектоническим с преобладанием горизонтальной составляющей. Исходные компоненты тензора напряжений были иницированы в численной модели на стадии Initial при помощи решателя Field Stress и приведены в **таблице**. Компоненты тензора главных напряжений обозначены в соответствии с требованиями программного продукта.

Для расчета параметров напряженного состояния массива все пространство численной модели было разбито на 110291

десятиузловой тетраэдральный элемент второго порядка. По размерам элементов сетка построена дифференцированно. В анализируемой области размер элементов был наименьший и увеличивался при удалении от центра модели к ее периферии.

Параметры бурения моделируемых разгрузочных скважин приведены ниже.

Выработка	Буродоставочный штрэк
Протяженность разгружаемого участка, м	15
Диаметр скважин (шпуров) d , мм	76
Глубина бурения, м	3
Расстояние между стенками скважин в ряду a , м	2d
Угол наклона разгрузочных скважин, градус:	
α (относительно вертикальной оси выработки)	75
β (относительно горизонтальной оси выработки)	0

Одиночная выработка в численной модели была ориентирована по направлению вектора максимальной компоненты тектонического напряжения σ_2 .

Для описания поведения массива горных пород в численной модели использовали обобщенный критерий Хука – Брауна (Generalized Hoek – Brown Criterion), который представлен выражением [15]

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{сж} (m_b \sigma'_3 / \sigma_{сж} + s)^a,$$

где σ'_1, σ'_3 – главное максимальное и минимальное эффективное напряжение соответственно; $\sigma_{сж}$ – прочность породы на одноосное сжатие; m_b, s, a – эмпирические параметры критерия прочности Хука – Брауна, зависящие от структурной нарушенности породного массива.

Обобщенный критерий прочности Хука – Брауна является эмпирическим и устанавливает прочность горной породы в осях главных максимального σ_1 и минимального σ_3 напряжений. Прочность породного массива в рамках критерия может быть определена с учетом данных лабораторных испытаний ненарушенных образцов, существующих нарушений и систем трещин в породном массиве, степени влияния буровзрывных работ.

Прочностные и деформационные свойства массива в образце и в массиве, заложенные в численные модели приведены ниже.

Прочность на одноосное сжатие, МПа:	160
m_b	5,03
s	3.87e-003
a	0,51
GSI (геологический индекс по прочности)	50
m_i (тип горной породы)	30
D (показатель качества буровзрывных работ)	0
Модуль упругости в образце, МПа	78000
Модуль упругости в массиве, МПа	23960

Исходные компоненты тензора напряжений в численной модели

σ_1 , кН/м ²	σ_2 , кН/м ²	σ_3 , кН/м ²
$-35 \cdot 10^3$	$-60 \cdot 10^3$	$-25,9 \cdot 10^3$
Направляющие косинусы: ось OX (1); Ось OY (2)		
$x_1=0$	$y_1=0$	$z_1=0,259$
$x_2=0$	$y_2=1$	$z_2=0$

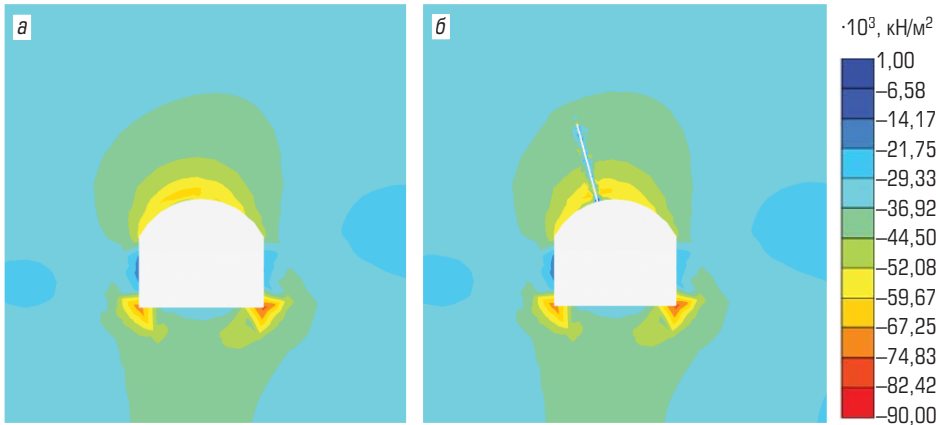


Рис. 1. Эпюры распределения главного напряжения σ_2 , кН/м^2 , до (а) и после (б) бурения разгрузочных скважин (неполная разгрузка массива)

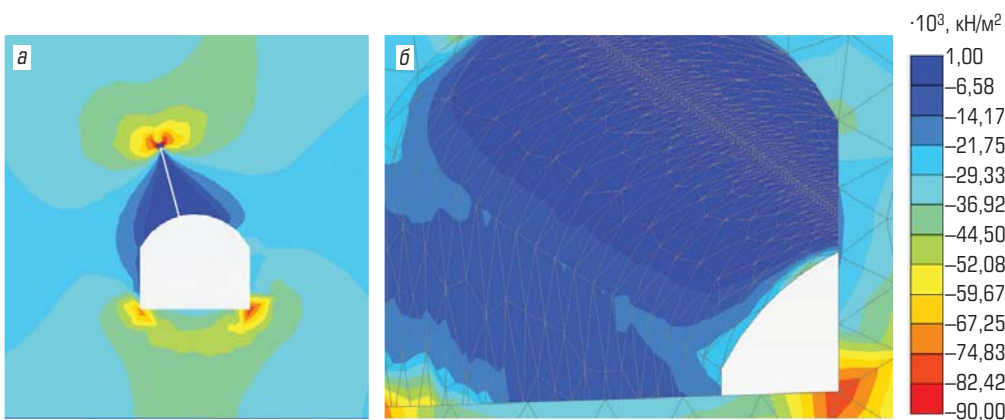


Рис. 2. Эпюры распределения главного напряжения σ_2 , кН/м^2 , в приконтурном массиве (а) и кровле выработки (б) после бурения разгрузочных скважин (разгрузка массива в результате разрушения межскважинных целиков)

Результаты численного моделирования

Анализ результатов расчета распределения главных напряжений в породном массиве в окрестности одиночной выработки выполнен для двух предельных состояний массива, соответствующих разным стадиям «работы» разгрузочной щели:

- неполной разгрузки породного массива посредством бурения строчки скважин с оставлением межскважинных целиков шириной не менее $2d$;

- разгрузки породного массива в окрестности выработки в результате разрушения межскважинных целиков (реактивная сила на границах целика фактически равна нулю, $R = 0$).

Прогноз главных напряжений σ_2 в окрестности одиночной выработки для первого предельного состояния массива приведен на **рис. 1**.

Разрушение межскважинных целиков является завершающей стадией работы разгрузочных скважин и может быть результатом действия горного давления при пересечении зон влияния крупных тектонических нарушений, а также при изменении положения фронта очистных работ.

Прогноз главного напряжения σ_2 в окрестности одиночной выработки для первого предельного состояния массива приведен на **рис. 2**.

Из анализа результатов расчетов следует, что при частичной потере устойчивости межскважинных целиков происходит

значительное снижение напряжений в своде и бортах выработки. Основная концентрация напряжений смещается в область забоя разгрузочной скважины и там происходит их перераспределение в глубь массива. При этом необходимо обратить внимание, что напряженное состояние массива противоположного борта выработки изменилось весьма незначительно.

Таким образом, в результате разрушения межскважинных целиков происходит локальная разгрузка породного массива, а также формируются небольшие участки растягивающих напряжений в своде выработки. Прогноз величины главных деформаций ϵ_2 в массиве при условии полного разрушения межскважинных целиков приведен на **рис. 3, а**. На **рис. 3, б** приведена фотография фактического вывала, который был зафиксирован в подземной выработке. При численных расчетах в PLAXIS 3D под деформациями ϵ понимается производная компонент перемещений по соответствующим осям [16]:

$$\epsilon_{ij} = 0,5(\partial u_i / \partial j + \partial u_j / \partial i),$$

где i и j могут быть осями x , u или z .

Результаты расчета главных деформаций ϵ_2 в окрестности контура разгрузочной скважины позволяет говорить о формировании зоны вывала в форме шатра в кровле выработки с вершиной, направленной в сторону забоя скважины.

Таким образом, результаты численного моделирования показали высокую степень сходимости с фактическими



Рис. 3. Результаты прогноза главных деформаций ϵ_2 (а) и фактическая форма вывала (б)

параметрами вывалов, зафиксированными на предприятии, а также подтвердили качественные характеристики напряженного состояния массива после бурения разгрузочных скважин, установленные методами визуального контроля [17–23].

Общая методология физического моделирования на эквивалентных материалах

Процессы, связанные с формированием разгрузочной щели на контуре одиночной выработки были также воспроизведены с помощью метода физического моделирования на ЭМ.

В качестве исходных данных использовали исходные компоненты тензора напряжений (см. таблицу), параметры бурения разгрузочных скважин, показатели прочностных и деформационных свойств массива горных пород, приведенные выше. Моделирование осуществляли на специальном стенде на основе критериев подобия, изготовления модели из соответствующих им ЭМ, новой разработанной технологической оснастки, методики воспроизведения процессов бурения и исследования происходящих процессов с помощью комплекса информационно-измерительных систем (ИИС).

Известно, что в основе метода моделирования на ЭМ лежит разработка ЭМ, удовлетворяющих критериям подобия [5, 6, 24–29]. Среди последних необходимо выбрать те из них, которые наиболее важны для характера исследуемых процессов. С учетом того, что в основе физики процессов, происходящих при бурении разгрузочных скважин, лежит принцип использования внутренней потенциальной энергии высоконапряженного горного массива, при разработке ЭМ необходимо, чтобы соблюдалось энергетическое подобие моделируемых процессов, которое может быть обеспечено при одновременном выполнении условий подобия для прочностных и деформационных параметров ЭМ [5]:

$$R_{сж/мод} = \alpha_1 \alpha_\gamma R_{сж/нат};$$

$$E_{мод} = \alpha_1 \alpha_\gamma E_{нат};$$

где $R_{сж/мод}$, $R_{сж/нат}$ – прочности на одноосное сжатие в модели и натуре соответственно; α_1 – линейный масштаб

моделирования; α_γ – масштаб удельного веса; $E_{мод}$, $E_{нат}$ – модули деформации в модели и натуре соответственно.

В соответствии с этими требованиями были определены расчетные и фактические параметры ЭМ, при незначительном упрощении этих требований (с погрешностью, не превышающей 1–2 %), но позволяющие ограничиться требованием к обеспечению требуемых соотношений модельных и натуральных прочностей и модулей деформации моделируемой области горных пород к соответствующим величинам гравитационного и тектонического напряжения.

При этом были ужесточены требования к двум важным параметрам ЭМ, характеризующим их хрупкость и предельные относительные деформации: E/M и $\epsilon_{пр} = R_{сж}/E$; $E_{мод}/M_{мод} = E_{нат}/M_{нат}$ и $\epsilon_{пр.мод} = \epsilon_{пр.нат}$, где E – модуль деформации; M – модуль спада; $\epsilon_{пр}$ – предельная относительная деформация; $R_{сж}$ – прочность на одноосное сжатие; $M_{мод}$, $M_{нат}$ – модули спада в модели и натуре соответственно; $\epsilon_{пр.мод}$, $\epsilon_{пр.нат}$ – предельная относительная деформация в модели и натуре соответственно.

Подбор типов и рецептур ЭМ проведен на основании исследования более 50 образцов из ЭМ (5×5×10 см), на основе наполнителя из мелкодисперсного кварцевого песка (средняя фракция 0,2 мм) и связующих на основе смол ЭД-20 и ДЭГ-1 при варьировании процентного состава связующих (в диапазоне от 0,45 до 1,2 %).

На основе проведенных испытаний для дальнейших исследований был выбран ЭМ со связующим на основе смолы ЭД-20 при $C_s = 0,45$ % (C_s – процентная доля связующего), обеспечивающий наиболее точное воспроизведение ключевых параметров для моделируемых горных пород:

$$E_{мод}/M_{мод} = 0,12 \div 0,17 \approx E_{нат}/M_{нат} = 0,1 \div 0,3;$$

$$\epsilon_{пр.мод} = 0,0035 \div 0,0042 \approx \epsilon_{пр.нат} = 0,0027 \div 0,0036.$$

Модель изготавливали на стенде БУ-3 (рис. 4). В процессе изготовления модели в ней установили датчики МДГ-3 по заданной схеме (см. рис. 4, в), подключаемые к ИИС на базе LTR крейта с ПО ACTest Pro, а на ее поверхности – реперные марки для фиксации смещений с помощью системы их

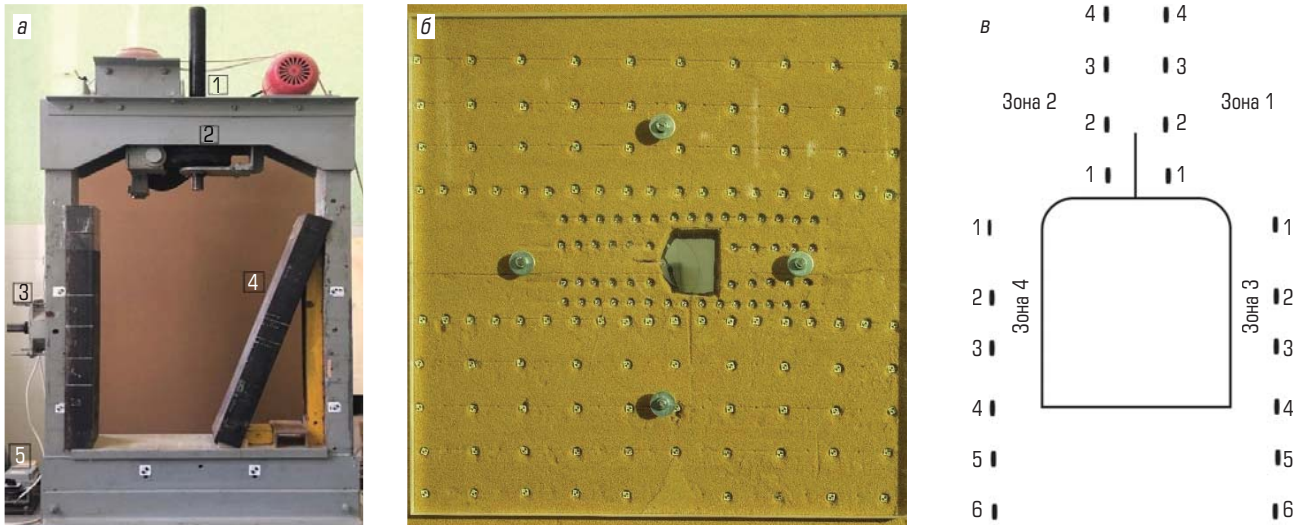


Рис. 4. Общий вид стенда БУ-3 (а), «тело» модели (б) и схема расположения датчиков напряжения МДГ-3 (в):

1 – двигатель вертикальной пригрузки; 2 – пригрузочное устройство по вертикали; 3 – электрический исполнительный механизм с редуктором горизонтальной пригрузки; 4 – рама стенда; 5 – пульт управления; 1–6 – датчики напряжения

регистрации с помощью камеры Hasselblad H5D и ПО ТЕМА Motion 2D [5, 6].

Разработка методик моделирования на моделях из 3М граничных условий и бурения разгрузочных скважин

Формирование граничных условий на стенде по вертикали и горизонтали проводили с помощью силовых элементов 2 и 3 (см. рис. 4, а), представляющих комплекс асинхронных двигателей, редукторов и силоизмерительных элементов, обеспечивающих нагрузки на модель от 0 до 30 кН, а по передней и задней поверхности модели – с помощью двух пластин из оргстекла толщиной 30 мм, стягиваемых четырьмя металлическими стержнями динамометрическим ключом (см. рис. 4, б).

Моделирование бурения разгрузочных скважин осуществляли путем последовательного извлечения тонких металлических стержней, предварительно установленных в модели, диаметром, равным диаметрам скважин, и с размером межскважинных целиков $2d$.

Результаты физического моделирования

Основные элементы программы испытаний модели состояли в моделировании прохождения выработки в масштабе 1:50, нагружении модели до заданных значений и фиксации изменения параметров напряжений и смещений при моделировании бурения разгрузочных скважин.

На рис. 5, 6 представлены результаты изменения полей напряжений и деформаций при моделировании прохождения выработки и бурения разгрузочных скважин.

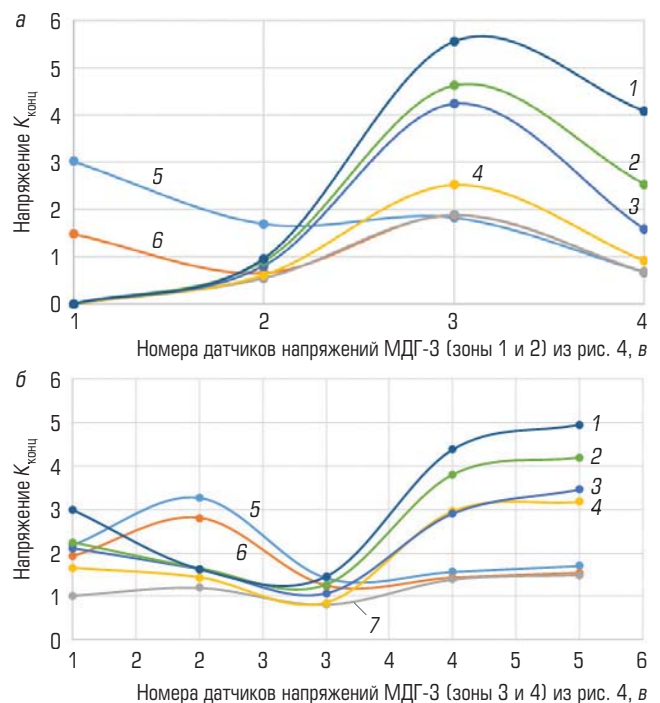


Рис. 5. Распределение средних напряжений в зонах 1, 2 (а) и 3, 4 согласно рис. 4, в:

1–3 – выдерживание соотношения $\sigma_y:\sigma_x = 35:60$ МПа с увеличением нагрузки 40, 20 и 10 % соответственно; 4, 5 – создание соотношения $\sigma_y:\sigma_x = 35:60$ и $\sigma_y:\sigma_x = 25:35$ МПа соответственно; 6 – моделирование разгрузочных скважин при $\sigma_y:\sigma_x = 25:35$ МПа; 7 – окончание моделирования всех разгрузочных скважин при $\sigma_y:\sigma_x = 25:35$ МПа

Таким образом, разработанные типы ЭМ на основе принятых критериев подобия, комплекса стендового оборудования и ИИС обеспечили воспроизведение заданной структуры массива, его физико-механических свойств, формирование заданных граничных условий, обусловленных действием заданных гравитационных и тектонических сил, а также воспроизведение бурения скважин.

В результате проведенных исследований установлены следующие основные закономерности изменения деформаций и напряжений в окрестности горной выработки при бурении скважин с частотой 2D при заданных диапазонах изменения гравитационных и тектонических напряжений:

- при воспроизведении бурения скважин (при $\sigma_x = 35$ МПа, $\sigma_y = 25$ МПа, где σ_x, σ_y – тектоническая и гравитационная составляющие тензора напряжений) установлена существенная разгрузка в кровле выработки ($K_{\text{конц}}$ с 3 до 1,48) и увеличение максимума относительных деформаций ϵ в окрестности образованной щели с $1 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$;
- при увеличении тектонических напряжений с 35 до 60 МПа в почве и кровле выработки произошло изменение концентраций напряжений $K_{\text{конц}}$ с 1,5 до 3,18 и с 2,73 до 3,61 соответственно, а также увеличение относительных деформаций ϵ с $3 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$.

Заключение

Полученные результаты при комбинированном численном и физическом моделировании показали практически идентичные качественные оценки эффективности бурения разгрузочных скважин, проявляемой в удалении зон концентраций напряжений в сторону от контура выработки, и оценки изменения относительных деформаций в области расположения выработки.

Незначительное различие в количественных оценках этих параметров с помощью рассмотренных выше методов является следствием специфики применения различных методических подходов, однако оставляет путь к их совершенствованию при взаимном тестировании для повышения надежности прогноза эффективности проводимых технологических мероприятий.

Дальнейшее развитие метода комбинированного подхода к прогнозу напряженно-деформированного состояния массива позволяет обеспечить высокую степень подобия модели

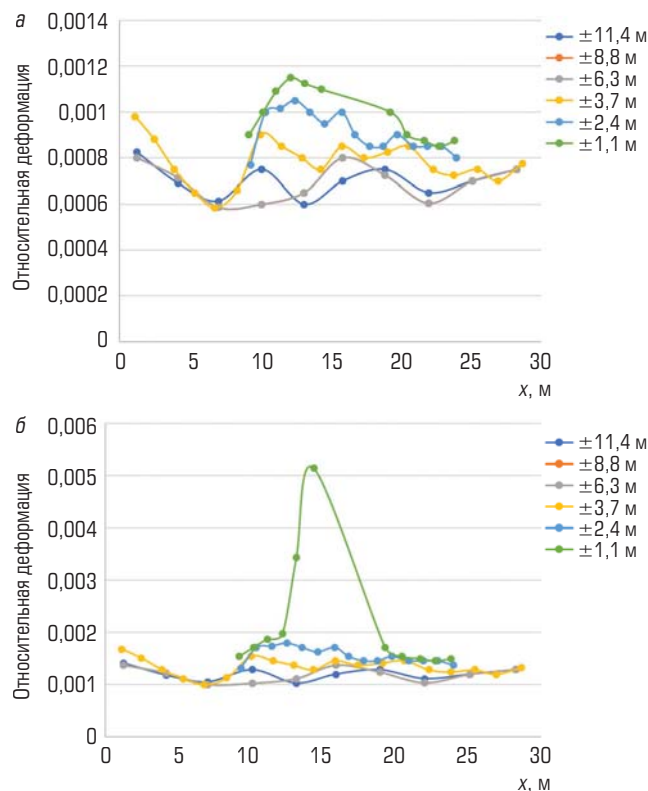


Рис. 6. Относительные горизонтальные деформации при моделировании напряжений 25 и 35 МПа (а) и при 25 и 60 МПа (б) на различном расстоянии x от плоскости расположения скважин

из ЭМ численной конечно-элементной модели. Достижение близких количественных и качественных показателей между двумя методами на этой стадии, по мнению авторов настоящей статьи, открывает широкие возможности при изучении процессов разрушения массива, с разрывом его сплошности, обусловленных влиянием техногенных факторов [30–35].

Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 33–39
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.05

Efficiency evaluation of destressing drilling by numerical and physical modeling toward rockburst nonhazardous conditions in mines

Information about authors

I. I. Bagautdinov¹, Leading Researcher of Laboratory for Rock Pressure at Metalliferous and Nonmetalliferous Deposits, Candidate of Engineering Sciences

B. Yu. Zuev¹, Head of Modeling Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, b.zuev2010@yandex.ru

A. A. Streshnev², Head of Department of Rockburst Forecasting and Prevention

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²Kirovsk Branch of Apatit, PhosAgro, Kirovsk, Russia

Abstract

The article puts forward and describes an integrated numerical/physical modeling procedure to improve evaluation efficiency of destressing drilling aimed at creating rockburst unhazardous conditions in underground openings. When rocks in the interwall space reaches the limit state under the action of rock pressure, the zones of stress concentration displace from the boundary of an underground opening into the depth of rock mass. As a result of the proposed activity implemented in underground mines of Apatit's Division in Kirovsk, the risk of an underground rock burst was reduced essentially

upon condition of effective project and actual designs of destress boreholes. The 3D axially symmetric numerical modeling of a destress hole at the boundary of a single roadway used the certified Bentley Systems PLAXIS 3D software package. Furthermore, the same process of destressing drilling at the boundary of a single roadway was reproduced in physical modeling using equivalent materials. The source data of the physical modeling were the data assumed in the numerical modeling. Combining the strongest points of the numerical modeling in the geomechanical research of 2D and 3D problems at the extensive variation of rock characteristics with the strongest points of the physical modeling when investigating nonlinear processes of rock fracture can provide a more complete idea of the subject and can enhance reliability of prediction of geodynamic phenomena induced by rock pressure. The described studies prove the promising nature of integration of the numerical and physical modeling methods toward research reliability improvement.

Keywords: numerical modeling, physical modeling, lab-scale testing, equivalent materials, destress boreholes.

References

- Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 162–166.
- Shabarov A. N., Zubkov V. V., Mishin N. I., Arshavskiy V. V., Badtiev B. P. Geodynamical simulation of the ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2004. No. 12. pp. 32–35.
- Semenova I. E., Avetisyan I. M. Geomechanical foundation for mining in rockburst-hazardous conditions: Concept development. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 1. pp. 28–33. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.05
- Baojie Fan, Fujun Zhao, Bin Wang, Qihong Wu, Zongtang Zhang. Rockburst Occurrence Mechanism Based on the Self-Sustaining Time-Varying Structure of Surrounding Rock. *Shock and Vibration*. 2020. Vol. 2020. ID 8864336. DOI: 10.1155/2020/8864336
- Zuev B. Yu. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 542–552.
- Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
- Sergunin M. P., Darbinyan T. P., Mushtekenov T. S., Balandin V. V. Assessment of destressing drilling efficiency using numerical methods: A case-study of Oktyabrsky deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2021. No. 2. pp. 26–31. DOI: 10.17580/gzh.2021.02.03
- Lovchikov A. V., Zemtzovsky A. V. Rockburst prevention in deep ore pillars by forming relieve slots (for the Lovozero raremetal deposit). *Vestnik MGU*. 2019. No. 1. pp. 158–166.
- Pestrenin V. M., Pestrenina I. V., Kostromina P. P. Influence of unloading slots on the stressed state and creep of a rock mass in the vicinity of an excavation. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2011. Vol. 4, No. 2. pp. 110–118.
- Marysyuk V. P., Darbinyan T. P., Andreev A. A., Noskov V. A. Efficiency of modification of the copper–nickel sulfide ore mining system in the Oktyabrsky mine. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 11. pp. 19–23. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.02
- Shabarov A., Kuranov A., Popov A., Tsirel S. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass. *Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Massifs: Proceedings of the 1st International Scientific Conference. E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 129. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901011
- Bagautdinov I., Kuranov A., Belyakov N., Streshnev A. The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite–nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state. *Problems of Complex Development of Georesources: Proceedings of VII International Scientific Conference. E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 56. 01019. DOI: 10.1051/e3sconf/20185601019
- Rasskazov I. Yu., Kursakin G. A., Potapchuk M. I., Rasskazov M. I. Geomechanical assessment of technological decisions for designing mining operations in of burst hazardous conditions. *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 198. pp. 80–85.
- Kiselev V., Guseva N., Kuranov A. Creating Forecast Maps of the Spatial Distribution of Dangerous Geodynamic Phenomena Based on the Principal Component Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 666. 032071. DOI: 10.1088/1755-1315/666/3/032071
- Hoek E., Brown E. T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1980. Vol. 106, Iss. 9. pp. 1013–1035.
- PLAXIS 2D. Bentley Systems, Inc., 2022. Available at: <https://www.bentley.com/software/plaxis-2d/> (accessed: 15.06.2022).
- Sergunin M. P., Alborov A. E., Andreev A. A., Buslova M. A. Stress assessment ahead of stoping front with widening stress relief zone—A case study of the Oktyabrsky and Talnakh deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 6. pp. 38–41. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.06
- Marysyuk V. P., Shilenko S. Yu., Andreev A. A., Shabarov A. N. Interwell area design procedure to generate safe zones in rockburst-hazardous conditions of Talnakh deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 1. pp. 106–112. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18
- Zubov V. P., Phuc L. Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 795–806.
- Zubov V. P., Golubev D. D. Prospects for the use of modern technological solutions in the flat-lying coal seams development, taking into account the danger of the formation of the places of its spontaneous combustion. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 534–541.
- Protosenya A., Vilne M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37, No. 2. pp. 137–147.
- Nguyen Tai Tien, Karasev M. A., Vilner M. A. Study of the stress-strain state in the sub-rectangular tunnel. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Proceedings of the 4th International Conference*. Ser.: Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer, 2020. Vol. 62. pp. 383–388.
- Vilner M., Nguen T. T., Korchak P. The assessment of the roof beam stability in mining workings. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues: Proceedings of the Russian–German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2019. pp. 53–57.
- Guoxiang Yang, Leung A. K., Nengxiong Xu, Kunxiang Zhang, Kunpeng Gao. Three-Dimensional Physical and Numerical Modelling of Fracturing and Deformation Behavior of Mining-Induced Rock Slopes. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. 1360. DOI: 10.3390/app9071360
- Hongtao Liu, Linfeng Guo, Guangming Cao, Xidong Zhao, Pengfei Wang et al. Comprehensive Study of Strata Movement Behavior in Mining a Longwall Top Coal Caving Panel of a Composite Coal Seam with Partings. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. 5311. DOI: 10.3390/app10155311
- Mighe Ju, Dapeng Wang, Jingcheng Shi, Jianchun Li, Qiangling Yao et al. Physical and numerical investigation of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2021. Vol. 7, Iss. 1. 24. DOI: 10.1007/s40948-020-00209-2
- Pengfei Wang, Jingli Zhao, Yoginder P. Chugh, Zhiqiang Wang. A Novel Longwall Mining Layout Approach for Extraction of Deep Coal Deposits. *Minerals*. 2017. Vol. 7, Iss. 4. 60. DOI: 10.3390/min7040060
- Wan-rong Liu. Experimental and Numerical Study of Rock Stratum Movement Characteristics in Longwall Mining. *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. ID 5041536. DOI: 10.1155/2019/5041536
- Weiming Guan, Qi Qi, Zhiyi Zhang, Senlin Nan. Effect of Sand Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum-Cemented Similar Materials. *Materials*. 2020. Vol. 13, Iss. 3. 765. DOI: 10.3390/ma13030765
- Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V., Trushko V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022. Vol. 32, Iss. 1. pp. 113–119.
- Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Dvoynikov M. V., Buslaev G. V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 428–438.
- Gospodarikov A. P., Morozov K. V., Revin I. E. A method of data interpretation in seismicity and deformation monitoring in underground mining in terms of the Kukisvumchorr deposit of Apatit company. *GIAB*. 2019. No. 8. pp. 157–168.
- Morozov K. V. Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development—Full Papers: Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering*. London: CRC Press, 2020. pp. 1318–1323.
- Gospodarikov A. P., Revin I. E., Morozov K. V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorr deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023. DOI: 10.31897/PMI.2023.9
- Morozov K. V., Demekhin D. N., Bakhtin E. V. Multicomponent strain gauges for assessing the stress-strain state of a rock mass. *GIAB*. 2022. No. 6–2. pp. 80–97.