

www.rudmet.ru

ISSN 0017-2278

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

198 лет

Издается с 1825 года
(№ 2306)

1.2023

Геотехническое моделирование в горном деле:
задачи, методы и современная практика



СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГЕОМЕХАНИКИ

Лушников В. Н., Селиванов Д. А., Бережной В. П. Надежность прогнозирования геотехнических рисков при ведении открытых горных работ	4
Галченко Ю. П. Геомеханика экологического кризиса	13
Панкратенко А. Н., Машин А. Н., Насонов А. А., Паринов Д. С. Особенности оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации	20
Господариков А. П., Киркин А. П., Трофимов А. В., Ковалевский В. Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий	26
Гречишкин П. В., Малова С. А. Природа и механизм выбросов газа и породы	35
Васичев С. Ю., Щукин С. А., Кудря А. О., Нуршайкова Г. Т. Устойчивость выработок для выпуска руды при разработке по системе этажного принудительного обрушения	40
Васичев С. Ю., Конурин А. И., Неверов С. А., Неверов А. А. Исследование показателей извлечения руды при системе подэтажного обрушения с торцовым выпуском на больших глубинах	47
Лейзер В. И. Система ориентированного нагружения и разрыва стенок скважины для оценки напряжений в массиве горных пород	54
Ерёменко В. А., Хажыылай Ч. В., Умаров А. Р., Лагутин Д. В. Количественная оценка напряженно-деформированного состояния горного массива Северомуйского тоннеля	58
Федотов Г. С., Курцев Б. В., Янбеков А. М., Умаров А. Р. Создание блочной геомеханической модели района Северомуйского тоннеля в ГИС Micromine Origin & Beyond	64
Акматов Д. Ж., Маневич А. И., Татаринов В. Н., Шевчук Р. В. Трёхмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив)	69
Рассказов И. Ю., Батугин А. С., Федотова Ю. В., Потапчук М. И. Оценка склонности месторождения к проявлению горно-тектонических ударов (на примере месторождения Южное)	74
Козырев А. А., Журавлева О. Г., Жукова С. А. Пространственно-временные вариации сейсмичности в районе Саамского разлома (Хибинский массив, Кольский полуостров)	79
Шадрин М. А., Сидоров Д. В., Корнаушенко А. П., Минзарибов Р. Г. Обоснование безопасных параметров междукammerных податливых целиков при применении технологической схемы со скважинной отбойкой руды и принудительной посадкой кровли в сложных удароопасных условиях шахт СУБРа	85
ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
Марысюк В. П., Муштекенов Т. С., Трофимов А. В., Колганов А. В. Применение модифицированного метода Мэтьюза–Потвина при геотехническом обосновании параметров очистных камер с учетом эквивалентного линейного перебора сечения	92
Дарбинян Т. П., Муштекенов Т. С., Румянцев А. Е., Головченко Ю. Ю. Адаптация геометрии сложных геологических структур вкрапленных руд для построения конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния залежей рудника «Комсомольский»	97
Дарбинян Т. П., Уваров И. И., Федосеев А. В., Трофимов А. В. Оценка сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные охраняемые объекты карьера рудника «Заполярный» ООО «Медвежий ручей»	102
Марысюк В. П., Шиленко С. Ю., Андреев А. А., Шабаров А. Н. Методика расчета межскважинных целиков для формирования защищенных зон в условиях удароопасных месторождений Талнаха	106
Дарбинян Т. П., Муштекенов Т. С., Цымбалов А. А., Пleshко М. С. Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива и крепи сверхглубоких выработок рудника «Скалистый» с учетом технологического фактора	113
Ильясев Б. Т., Кульсайтов Р. В., Неугомонов С. С., Солюянов Н. О. Оценка устойчивости закрепленной выработки на основе численного моделирования методом конечно-дискретных элементов	118
Пацкевич П. Г., Айбиндер И. И., Григорьев Н. В., Красюкова Е. В. Учет состояния и строения массива при выборе способов поддержания подземных горных выработок в условиях разработки жильных месторождений Крайнего Севера	124
Разумов Е. А., Калинин С. И., Петрова О. А. Методика оценки комплексного влияния анкеров разных типов на напряженно-деформированное состояние пород кровли подготовительных выработок	130
Вьюников А. А., Ворожцов С. Г., Пуль Э. К., Ковешников П. Ю. Способы профилактики внезапных выбросов породы и газа при ведении горных работ на сверхглубоких горизонтах подземного рудника «Интернациональный»	133
Ермошкин Д. Н., Ермошкин Н. Н., Курманалиев К. З., Мансуров В. А. Обоснование применения геотехнологий в неоднородной геомеханической среде золоторудного месторождения Джамгыр	138
Межеловский В. И., Джуманбаев В. В., Мансуров В. А., Курманалиев К. З. Геотехнические и горно-геологические условия разработки золоторудного месторождения Ширальджин	144
ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ	
Лушников В. Н., Ерёменко В. А., Селиванов Д. А. 1000 англо-русских терминов, наиболее употребляемых в горной геомеханике: глоссарий современного горного инженера-геомеханика	149
РЕКЛАМА	
<i>На обложке:</i>	
НИЦ «Прикладная геомеханика и конвергентные геотехнологии» Горного института НИТУ «МИСиС» ООО «ГЕОБРУГГ»	
ООО НПО «АЛЗАМИР»	89
ООО «СПб-Гипрошахт». Проектно-консалтинговая компания	90
ООО «УралЭнергоРесурс»	91

MONTHLY SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

The basic edition of the Intergovernmental council of CIS countries in exploration, usage and protection of the earth bowels

With participation of “ALROSA” PJSC, “Apatit” JSC,
 PJSC “MMC “NORILSK NICKEL”, “Mekhanobr-Technica” JSC
 With assistance of IPKON RAN, Ural State Mining University, State enterprise Navoi mining
 and metallurgical works, “Gornopromyshlenniki Rossii” non-commercial partnership,
 State Hermitage Museum
 Information coordinator in the area of mineral mining technologies – VNIIPromtekhologii
 (National Research and Design Institute for Industrial Technology) – Engineering Center of Rosatom
 State Atomic Energy Corporations’ Mining Division
 Founders: “Ore & Metals” Publishing house, National University of Science
 and Technology “MISIS”, Autonomous Noncommercial Organization
 “TV News Channel “Khibiny TV”

Chairman of the managing board,
 Editor-in-Chief: **Alexander Vorobiev**

Actual address: Moscow, Leninsky prospekt 6 bld. 2, office 619
Mailing address: Russia, 119049, Moscow, P.O. Box # 71
Phone/fax: +7 (499) 236-10-62, +7 (499) 236-11-86
E-mail: gornjournal@rudmet.com
Internet: www.rudmet.com

The journal has been published since 1825
 at Mining military school

Publisher: “Ore & Metals” publishing house
 Phone/fax: +7 (495) 638-45-18
 E-mail: rim@rudmet.com

Leading editor: **Lyudmila Kostina**
 Editor: **Vera Elistratova**
 Junior editor: **Margarita Matveeva**
 Advertising manager: **Natalia Kolykhalova**
 Responsible for pre-printing work: **Daria Vorobyeva**

Printed in “Viva Star” printing house

CONTENTS

GENERAL ISSUES OF GEOMECHANICS

Lushnikov V. N., Selivanov D. A., Berezhnoy V. P.
 Reliable prediction of geotechnical risks in open pit mining 4

Galchenko Yu. P. Geomechanics of ecological crisis 13

Pankratenko A. N., Mashin A. N., Nasonov A. A., Parinov D. S.
 Features of structural assessment of long life mine shafts 20

**Gospodarikov A. P., Kirkin A. P., Trofimov A. V.,
 Kovalevsky V. N.** Determination of physical and mechanical
 properties of rocks using anti-burst destress measures 26

Grechishkin P. V., Malova S. A. Nature and mechanism of rock
 and gas outbursts 35

Vasichev S. Yu., Shchukin S. A., Kudrya A. O., Nurshaiykova G. T.
 Stability of ore chutes in block caving 40

Vasichev S. Yu., Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A.
 Ore extraction efficiency in sublevel caving with front-face ore
 drawing at great depths 47

Leizer V. I. System of directed loading and rupture of borehole
 walls for stress assessment in rock mass 54

Eremenko V. A., Khazhyylai Ch. V., Umarov A. R., Lagutin D. V.
 Quantitative assessment of rock mass stress–strain behavior at
 Severomuysky Tunnel 58

Fedotov G. S., Kurtsev B. V., Yanbekov A. M., Umarov A. R.
 Creation of geomechanical block model of Severomuysky Tunnel
 area in Micromine Origin & Beyond 64

Akmatov D. Zh., Manevich A. I., Tatarinov V. N., Shevchuk R. V.
 3D structure tectonics model of Yenisei site of the Nizhnekansk
 Massif 69

**Rasskazov I. Yu., Batugin A. S., Fedotova Yu. V.,
 Potapchuk M. I.** The proneness assessment of a mineral deposit
 to tectonic rockburst: A case-study of Yuzhnoe deposit 74

Kozyrev A. A., Zhuravleva O. G., Zhukova S. A. Seismicity
 variations in space and time in the area of the Saamy fault,
 Khibiny Massif, Kola Peninsula 79

**Shadrin M. A., Sidorov D. V., Kornaushenko A. P.,
 Minzaripov R. G.** Substantiation of safe parameters for yielding
 rib pillars in mining technology of ore breaking with induced
 roof subsidence in complex rockburst-hazardous conditions
 in Severouralsk bauxite mines 85

APPLIED RESEARCHES

**Marysyuk V. P., Mushtekenov T. S., Trofimov A. V.,
 Kolganov A. V.** The modified Mathews–Potvin method in
 geotechnical substantiation of stope design with equivalent linear
 cross-sectional search 92

**Darbinyan T. P., Mushtekenov T. S., Rumyantsev A. E.,
 Golovchenko Yu. Yu.** Adapting geometry of complex geological
 structures to finite-element stress–strain modeling of impregnated
 ore bodies in Komsomolsky Mine 97

Darbinyan T. P., Uvarov I. I., Fedoseev A. V., Trofimov A. V.
 Blasting-induced seismic impact on protected objects on ground
 surface at Zapolyarny Mine of Medvezhyi Ruchei LLC 102

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 106

**Darbinyan T. P., Mushtekenov T. S., Tsybalov A. A.,
 Pleshko M. S.** Stress–strain behavior assessment in rock mass
 and mine support systems on super deep levels in Skalisty Mine
 with regard to technology factor 113

Ilyasov B. T., Kulsaitov R. V., Neugomonov S. S., Soluyanov N. O.
 Stability estimation in underground opening with support system
 using finite–discrete element method-based modeling 118

**Patskevich P. G., Aynbinder I. I., Grigoriev N. V.,
 Krasnyukova E. V.** Selection of mine support system with regard
 to rock mass structure and behavior in mining lode deposits in the
 Far North 124

Razumov E. A., Kalinin S. I., Petrova O. A. Methodology for
 assessing the complex effect of anchors of different types on the
 stress-strain state of the roof rocks of preparatory workings . . . 130

Vyunikov A. A., Vorozhtsov S. G., Pul E. K., Koveshnikov P. Yu.
 Prevention of rock and gas outbursts in super deep-level mining in
 Internatsionalny Mine 133

**Ermoshkin D. N., Ermoshkin N. N., Kurmanaliev K. Z.,
 Mansurov V. A.** Justification of geotechnology for nonuniform
 geomechanical medium of Dzhamgyr gold ore deposit 138

**Mezhelovskiy V. I., Dzhumanbaev V. V., Mansurov V. A.,
 Kurmanaliev K. Z.** Geological and geotechnical conditions
 of Shiraldzhin gold ore mining 144

References

1. Pleshko M. S., Lobanov E. A., Mushtekenov T. S., Volkov D. S. Experience of heading and support in super-deep openings in Skalisty Mine of Nor Nickel's Polar Division. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 7. pp. 32–37. DOI: 10.17580/gzh.2022.07.05
2. Kazikaev D. M., Kozyrev A. A., Kaspariyev E. V., Iofis M. A. Geomechanical behavior control in mineral mining: Teaching aid. Moscow: Gornaya kniga, 2016. 490 p.
3. Marysyuk V. P., Sabyanin G. V., Andreev A. A., Vasiliev D. A. Stress assessment in deep-level stoping in Talnakh mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 6. pp. 17–22. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.02
4. Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 539–548.
5. Bulychev N. S., Fotieva N. N., Streltsova E. V. Mine support design for permanent roadways. Moscow: Nedra, 1986. 288 p.
6. Baklashov I. V., Kartoziya B. A., Shashenko A. N., Borisov V. N. Geomechanics: Tutorial. Moscow: MGGU, 2004. Vol. 2. Geomechanical processes. 249 p.
7. Levit V. V., Borshchevskiy S. V. Geologo-geomechanical developments of structures of deep vertical shafts at coal mines in Donbass. *Journal of Mining Institute*. 2010. Vol. 188. pp. 74–78.
8. Pleshko M. S., Kurnakov V. A. Analysis of normative base and scientific investigations in the area of support of vertical shafts. Ways of their further development. *GIAB*. 2011. No. 4. pp. 49–53.
9. Xingdong Zhao, Lei Deng, Xin Zhou, Yifan Zhao, Zhenpeng Guo. A Primary Support Design for Deep Shaft Construction Based on the Mechanism of Advanced Sequential Geopressure Release. *Processes*. 2022. Vol. 10, Iss. 7. 1376. DOI: 10.3390/pr10071376
10. Xingdong Zhao, Yangyang Li. Estimation of support requirement for a deep shaft at the Xincheng Gold Mine, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. Vol. 80, Iss. 9. pp. 6863–6876.
11. Yuezhen Zhang, Hongguang Ji, Hanhua Xu. Study on the Law of Rock Anelastic Recovery and the Characteristics of In Situ Stress Field of 2000 m Deep Stratum in Metal Mines of Coastal Area. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 2022. ID 2152814. DOI: 10.1155/2022/2152814
12. Chengwei Zhao, Xiaoming Sun, Yong Zhang, Shangkun Zhang, Jiaxuan Zhang. Optimization analysis of NPR cable support considering bearing structure in the NSF condition of deep shaft based on Daqiang coal mine. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. 1942. DOI: 10.1007/s12517-021-08274-x
13. Shengrong Xie, Zaisheng Jiang, Dongdong Chen, En Wang. Study on Zonal Cooperative Control Technology of Surrounding Rock of Super Large Section Soft Rock Chamber Group Connected by Deep Vertical Shaft. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022. ID 4220998. DOI: 10.1155/2022/4220998
14. Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao. Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling. *Processes*. 2019. Vol. 7, Iss. 1. 2. DOI: 10.3390/pr7010002
15. Fan Wu, Yueping Qin, Hao Xu, Fengjie Zhang, Xiangyu Chu. Numerical Simulation of Deformation and Failure Mechanism of Main Inclined Shaft in Yuxi Coal Mine, China. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Iss. 11. 5531. DOI: 10.3390/app12115531
16. Shuai Li, Chao Zheng, Yong Zhao. Numerical Modeling on Blasting Stress Wave in Interbedding Rheological Rockmass for the Stability of the Main Shaft of Mine. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. 930013. DOI: 10.3389/feart.2022.930013
17. Silchenko Yu. A., Pleshko M. S. Shaft lining design with regard to sinking technology. *GIAB*. 2020. No. 11. pp. 96–107.
18. Scientific supervision and geomechanical guidance of heading of horizontal openings RV-1 and RV-2 in Skalisty Mine of Nor Nickel's Polar Division: Report. Apatity: Gornyi institut KNTs RAN, 2020.

УДК 622.281.74:004.942

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЗАКРЕПЛЕННОЙ ВЫРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*



Б. Т. ИЛЬЯСОВ¹,

зав. лабораторией, канд. техн. наук,
bt.ilyasov@gmail.com



Р. В. КУЛЬСАЙТОВ²,

доцент, канд. техн. наук



С. С. НЕУГОМОНОВ³,

технический директор, канд. техн. наук



Н. О. СОЛЮЯНОВ⁴,

главный геомеханик

Описана предлагаемая авторами схема моделирования анкерного крепления линейными (1D) элементами методом конечно-дискретных элементов. Приведена методика, которую можно применять для обоснования параметров крепления выработок. В реальных условиях отработки месторождения выполнено сравнение трех схем численного моделирования для определения параметров искусственного поля напряжений. Показаны примеры моделирования напряженно-деформированного состояния массива вокруг выработок, когда действует неравнокомпонентное поле напряжений. Отражены особенности и преимущества предлагаемого подхода к расчету анкерных креплений.

Ключевые слова: анкерное крепление, метод конечно-дискретных элементов, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, трещиноватость горных пород, разрушение, запредельное деформирование

DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20

Введение

Наиболее распространенные способы расчета крепей подземных выработок можно представить в виде трех групп: аналитических, эмпирико-аналитических методов и численного моделирования [1].

Недостатки применяющихся аналитических и эмпирико-аналитических способов расчета крепи заключаются в сложности

¹ Уральский филиал АО «ВНИИМ», Екатеринбург, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия

³ ООО «Уралэнергоресурс», Магнитогорск, Россия

⁴ ООО «Норникель Технические Сервисы», Санкт-Петербург, Россия

*Работа выполнена при содействии руководителя проектной группы НИО ООО «Уралэнергоресурс» М. В. Котика (Магнитогорск, Россия).

учета геологической неоднородности массива, недостаточной достоверности оценки горизонтальных напряжений и различных особенностей трещиноватых горных пород [1–3]. В моделях, основанных на вычислительных методах механики, можно учесть эти факторы, поэтому в последнее время все более широкое распространение получило численное моделирование для решения задач, связанных с креплением выработок [2–6]).

Однако методы механики сплошной среды, получившие наибольшее распространение, не воспроизводят запредельные деформации растяжения (и в меньшей мере – сдвиговые) в горных породах и трещинах, из-за чего возникают проблемы с корректным отражением напряженно-деформированного состояния массива вокруг выработки. Примеры подобных типичных ситуаций – это вывалы в кровле или в боку выработки по трещинам, вывалы в кровле очистного пространства (могут происходить частично по породе), сжатие целика или стенки выработки с вертикальными трещинами, любое сжатие участка породы с концентрацией усилий вдоль одной линии (аналогично бразильскому диску). Возникновение деформаций растяжения вследствие клинового эффекта в зернистой распорной среде отмечает, например, И. И. Кандауров [7]. Обзор результатов исследований, описывающих образование трещин отрыва в неоднородной среде, приводит А. А. Ставрогин [8]. Зарубежные ученые уже с середины прошлого века утверждают, что существенное значение при разрушении скальных пород имеет образование трещин отрыва [9]. Широко известно, что при разрушении образца сжатием может происходить образование параллельных направлению сжатия трещин отрыва, аналогичные процессы можно наблюдать и в целиках [10].

Подобные деформации в моделях при применении сплошных методов должны приводить либо к ошибке вычислений, либо к недопустимости принятия результатов подобного моделирования. В последнем случае это объясняется тем, что в месте, где не реализовался разрыв, возникает фактически несуществующее взаимовлияние между элементами.

Всё вышеперечисленное обуславливает актуальность разработки и применения инструментов, которые позволят корректно учитывать перечисленные особенности деформирования массивов скальных пород. На это указывает также продолжающееся увеличение глубины горных работ и размеров выработок.

Деформирование с разрывами и большими сдвигами может воспроизводиться дискретно-элементными (ДЭ) и гибридными (метод конечно-дискретных элементов (МКДЭ)) [11]) моделями, но не может быть смоделировано конечно-элементными методами [12–14]. Относительно дискретно-элементных методов следует добавить, что их способность воспроизводить деформации растяжения ограничена из-за абсолютной жесткости элементов.

МКДЭ позволяет воспроизводить процессы разрывного и сдвигового дезинтегрирования массива, а также учитывать любые исходные напряжения и особенности трещинообразования горных пород [11–15].

Следует отдельно отметить, что необходимость применения дискретно-элементных моделей при расчетах устойчивости выработок часто подчеркивает Н. Бартон, однако объясняет он это значительным влиянием трещин на смещения и напряжения, а также

необходимостью учета снижения напряжений связи до остаточной прочности в запредельной стадии деформирования [16].

В связи со всем вышеперечисленным в программе Prorock разработан и реализован новый разрушающийся разрывом 1D (линейный) элемент, с помощью которого можно учитывать влияние анкеров на устойчивость выработок.

Необходимо отметить, что ранее различные способы моделирования анкерных крепей МКДЭ уже предлагались [4, 17, 18]. В указанных исследованиях демонстрировали способ моделирования изгиба преднатяженной бетонной балки [17], показывали применимость метода для симуляции выработки, закрепленной анкерами [4, 18]. В работе А. Лисьяка [4] кривую деформирования анкера аппроксимировали линейно-кусочной функцией, что менее точно отражает реальную механику деформирования, чем предлагаемая далее схема.

Механика 1D-линейных элементов

Анкеры реализованы в Prorock в виде разрушающихся линейных (1D) элементов, которые работают на растяжение и разрушаются при достижении максимальной деформации. Элементы претерпевают нелинейное упругое допредельное (т. е. до достижения прочности) и нелинейное запредельное деформирование.

В программе Prorock график деформирования элементов максимально приближен к реальному графику деформирования. Диаграмму деформирования строят аналогично схеме, определяющей напряжения связи в трещинных элементах в зависимости от деформации [11, 12]. Параметры данного графика уточнены в соответствии с фактическими данными, представленными для анкеров типа split-set (зарубежный аналог самозакрепляющихся анкеров (СЗА)) [19].

Важная особенность реализованной схемы моделирования анкера заключается в том, что он будет разрушаться при достижении предельной деформации растяжения. Это важное преимущество МКДЭ, который позволяет в явном виде моделировать процессы разрушения. При превышении максимального смещения анкер перестает удерживать элементы модели.

Принятая для модели аппроксимирующая фактические данные функциональная зависимость напряжений связи σ от деформаций выглядит следующим образом [11].

При деформациях меньше пиковой величины ($\sigma < \sigma_p$) напряжения связи определяются как

$$\sigma = [2\sigma/\sigma_p - (\sigma/\sigma_p)^2]f_t,$$

где σ – текущая деформация растяжения; σ_p – предельная деформация растяжения (в момент достижения предела прочности); f_t – прочность на разрыв (вырывание).

При деформировании в запредельной стадии, т. е. при превышении пиковых деформаций ($\sigma_r > \sigma > \sigma_p$) используют следующую функцию:

$$\sigma = f(D)f_t,$$

где

$$f(D) = \left[1 - \frac{A+B-1}{A+B} \exp\left(D \frac{A+CB}{(A+B)(1-A-B)} \right) \right] [A(1-D) + B(1-D)^C];$$

$$D = (\sigma - \sigma_p)/(\sigma_r - \sigma_p),$$

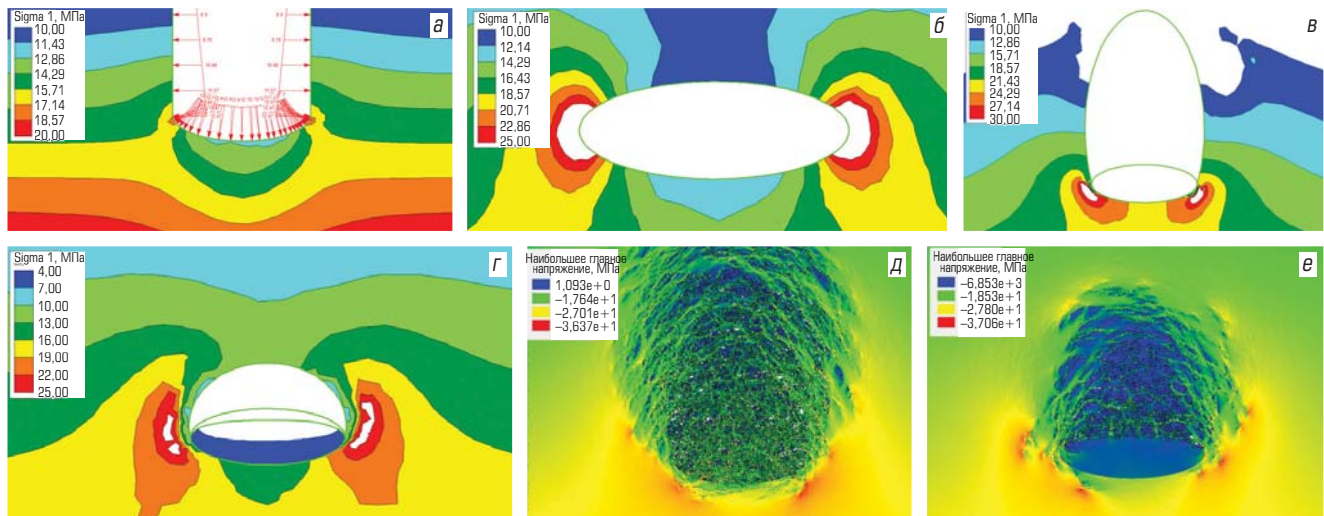


Рис. 1. Результаты моделирования отработки месторождения для определения параметров искусственного поля напряжений:
 а, в, д – по системе с обрушением; б, г, е – по системе с закладкой; а, б – схема 1; в, г – схема 2; д, е – схема 3

где D – показатель степени разрушения; A, B, C – константные параметры функции запредельного деформирования; σ_r – деформация растяжения, соответствующая окончательной потере несущей способности анкера.

Параметры функции $f(D)$ следующие: $A = 0,63$; $B = 1,8$; $C = 11$. Величина C изменена в сравнении с исходными параметрами [12], чтобы обеспечить наиболее точную аппроксимацию фактических данных.

Закрепление 1D-элемента выполняют на концах анкера к определенной точке в треугольном конечном элементе. Для этого используют барцентрическую систему координат.

Применение метода

С учетом условий отработки одного из месторождений полезных ископаемых выполнено обоснование параметров крепления выработок посредством МКДЭ-моделирования. Горно-геологические условия месторождения характеризуются относительно слабыми, размягчающимися под действием влаги породами. При этом глубина ведения горных работ достаточно большая, из-за чего имеются сложности с обеспечением устойчивости выработок. Необходимо выявить условия, при которых допустимо применение СЗА [20, 21] с торкретированием как значительно более дешевой крепи по сравнению с применявшейся на подземном руднике на момент выполнения работы.

С этой целью выполнено зонирование месторождения по параметрам искусственного поля напряжений. Построены шесть упрощенных моделей отработки месторождения, которые позволили определить параметры наведенного поля напряжений: три схемы моделирования на два варианта системы разработки (с закладкой и обрушением). Первые две схемы предполагали применение МКЭ (реализация в программе RS2), третья – МКДЭ. По схеме 1 обрушенный массив заменяли распределенными нагрузками, рассчитанными с учетом разрыхления горных пород, закладку учитывали только путем замены свойств руды на

Таблица 1. Параметры искусственного поля напряжений вокруг выработанного пространства

Система разработки	Под выработанным пространством		Сбоку от выработанного пространства	
	σ_1 (гор.), МПа	σ_3 (верт.), МПа	σ_1 (верт.), МПа	σ_3 (гор.), МПа
<i>Схема 1 (МКЭ)</i>				
С закладкой	15	7	27	9
С обрушением	14	11	18	13
<i>Схема 2 (МКЭ)</i>				
С закладкой	17	6	24	7
С обрушением	25	7	29	9
<i>Схема 3 (МКДЭ)</i>				
С закладкой	17	6	27	10
С обрушением	17	7	27	10
Примечание. σ_1, σ_3 – главные наибольшее и наименьшее напряжения соответственно				

свойства закладочного массива. По схеме 2 в моделях задавали свод обрушения над отработанным пространством, высоту свода рассчитывали эмпирически как $H_0 = 4m$, m – мощность отработываемого рудного тела [22]. При закладке вместо мощности рудного тела принимали эффективную мощность, учитывающую недозакладку закладочного материала ($m_3 = 0,2m$). По схеме 3 исключали элементы руды или заменяли ее свойства на свойства закладочного массива в зависимости от системы разработки. Природное поле напряжений принимали близким к гидростатическому в соответствии с ранее выполненными исследованиями.

На рис. 1 показаны результаты выполненного моделирования. Усредненные полученные параметры искусственного поля напряжений представлены в табл. 1.

Результаты выполненного моделирования показали, что при применении схемы 1 разница между главными напряжениями при

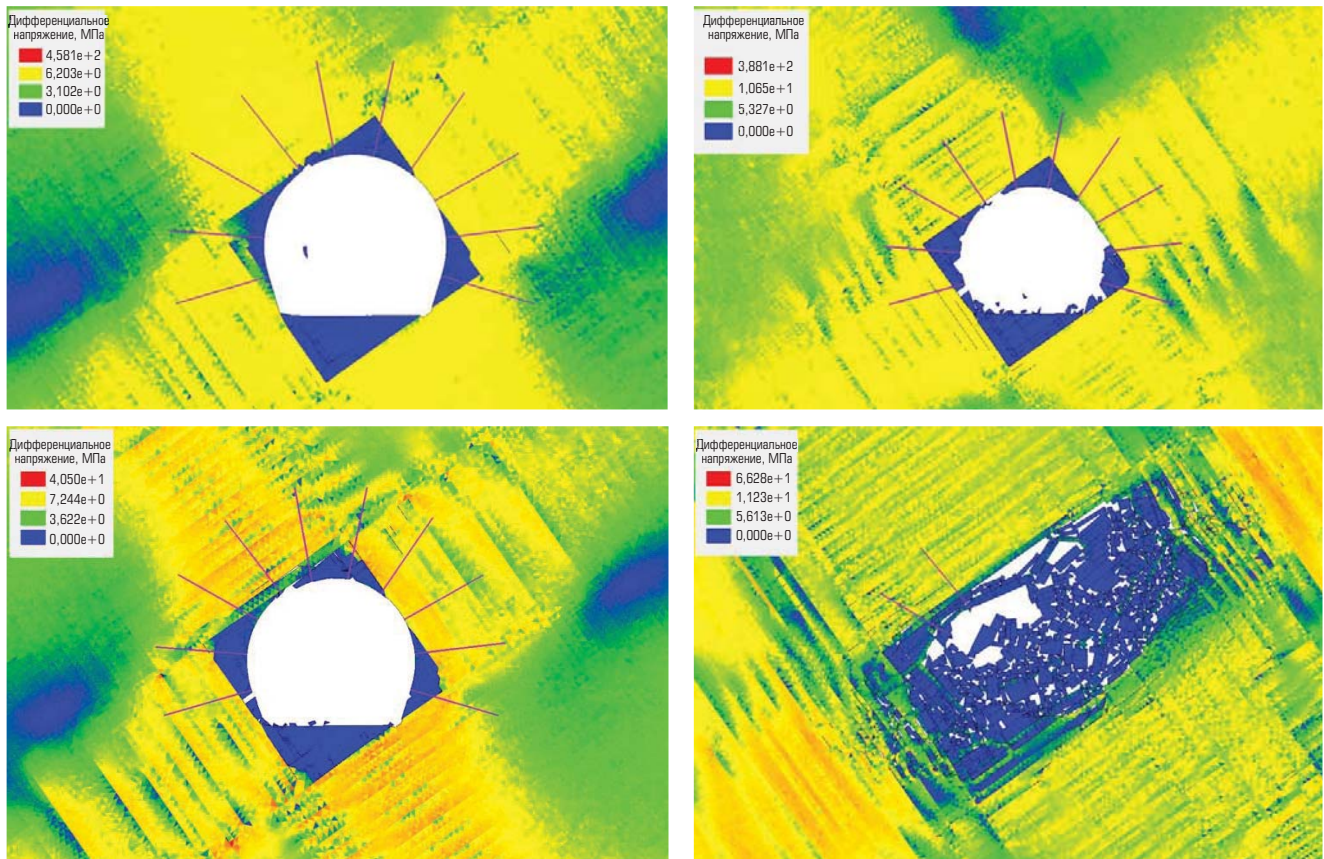


Рис. 2. Дифференциальные напряжения в закрепленном массиве вокруг выработки:

а, в – под выработанным пространством; *б, г* – сбоку от выработанного пространства; *а, б* – вмещающие породы; *в, г* – руда

отработке запасов с обрушением оказывается значительно ниже, чем при отработке с закладкой. Это достаточно противоестественный результат, в связи с чем и было проведено дополнительное моделирование по двум другим схемам. Результаты моделирования всеми тремя способами достаточно хорошо соотносились в случае закладки выработанного пространства, моделирование же обрушения вмещающих пород приводит к достаточно неоднозначным результатам. Можно заметить, что параметры поля напряжений, определенные МКДЭ-моделированием, находятся посередине между значениями, полученными при применении различных схем МКЭ-моделирования. В схемах 2 и 3 соотношения главных напряжений при различных системах разработки выглядят более реалистичными. При этом схема 2 имеет недостаток, обусловленный необходимостью эмпирического расчета высоты свода обрушения.

Сравнение трех способов моделирования показало, что наиболее достоверные результаты получаются при применении МКДЭ-моделирования. Поэтому для моделирования НДС массива вокруг выработки в искусственном поле напряжений выбраны его компоненты, определенные по схеме 3.

Достоинством, по мнению авторов, является то, что вокруг выработанного пространства в МКДЭ-модели образуются протяженные трещины, которые разделяют массив на области концентрации и разгрузки напряжений. Это показывает, насколько искусственное поле напряжений может варьироваться

в пространстве, что, по-видимому, следует учитывать при проведении замеров.

Для построения модели для расчета параметров крепления приняты следующие характеристики анкеров СЗА: несущая способность 50 кН при диаметре анкера 48 мм; длина анкеров 2,25 м (уточняли в ходе моделирования). Расстояние между анкерами 0,9 м, смещение до установки анкера 10 мм.

Моделирование выполняли для двух вариантов размещения выработки: во вмещающих породах и в руде. Таким образом получились четыре модели: по два варианта исходного НДС и вмещающих пород. Установлено, что руда обладает более низкой прочностью. Для выработок под выработанным пространством не учитывали возможное отклонение векторов главных напряжений, которое достигает 20°. Породный массив блочный, с близким к диагональному расположению двух систем трещин.

На **рис. 2** показаны результаты выполненного в программе Proгоск моделирования НДС массива.

Из **рис. 2** наглядно видно, что устойчивость выработки при принятых параметрах крепления обеспечивается во вмещающих породах в любых условиях, а в руде – только под выработанным пространством. Устойчивость выработки не будет обеспечиваться в руде при расположении выработки в боковых участках очистного пространства, т. е. в этих условиях следует применять другую схему крепления.

Таблица 2. Суммарные нагрузки на анкеры по зонам действия, кН

Условия	Левый бок (анкеры 1–3)	Кровля (анкеры 4–7)	Правый бок (анкеры 8–10)	Суммарно (анкеры 1–10)
Порода под выработанным пространством	160,8	232,5	151,3	544,6
Порода в боку выработанного пространства	203,1	275,9	167,5	646,5
Руда под выработанным пространством	203,0	174,1	189,6	566,7

Наблюдается сравнительно большой объем вывалов в руде, обладающей худшими прочностными свойствами, а также при больших напряжениях в массиве.

Контур выработки в породе под выработанным пространством не будет претерпевать значительных смещений, которые в модели едва достигают 4 см. В боку выработанного пространства смещения будут превышать 5 см. В руде под выработанным пространством смещения на контуре превышают 7 см, что по результатам сравнения с другими, не описанными в данной статье моделями, является опасной величиной.

При потере несущей способности анкеров происходит прогрессирующее разрушение выработки.

Анализ смещений контура выработки позволяет сделать вывод, что крепление выработок, пройденных во вмещающих породах под очистным пространством, можно несколько оптимизировать. В то же время выработки, пройденные там же по руде, по-видимому, будут обладать низким запасом устойчивости.

Также следует обратить внимание на области разгрузки (см. рис. 2). Это блоки вокруг выработки, обособившиеся от массива, а также области в глубине массива, где происходит изгиб породных перемычек (балок). Последнее подчеркивает отличие МКДЭ от методов дискретных элементов, которые не могут воспроизводить изгибы и другие упругие деформации. Влияние данных упругих деформаций на устойчивость, по-видимому, достаточно велико, так как свойства породы и руды различаются значительно только сцеплением и модулем упругости, при этом степень устойчивости выработки в них варьирует значительно.

Результаты расчета деформаций анкеров и нагрузок, действующих на них, представлены по зонам действия в табл. 2.

Анализ деформаций показал, что в основном анкеры находятся в допредельной стадии деформирования или близки к предельному состоянию. В руде при действии наведенных горизонтальных напряжений в кровле выработки отмечаются анкеры (2–7), находящиеся в запредельном деформированном состоянии, однако имеется некоторый запас растяжения по ним.

Характерно, что по результатам моделирования фиксируется повышение интенсивности вывалов и разрушений за контуром выработки в областях концентрации напряжений. При вертикальных максимальных напряжениях интенсивное трещинообразование происходит в боках выработки (рис. 3). Это косвенно свидетельствует о корректности и реалистичности моделей, а также о том, что МКДЭ-модели могут быть использованы для обратного анализа напряженного состояния массива по результатам съемки вывалов и деформаций в выработках.

Также установлено, что разрушения происходят не только по системным трещинам, но и по породным перемычкам между ними. Накопление и объединение этих локальных разрушений



Рис. 3. Трещинообразование вокруг выработки, пройденной в массиве с преобладающими вертикальными напряжениями

приводит к потере устойчивости выработок. Очевидно, что данный процесс нельзя воспроизвести МКЭ- и аналогичными методами.

Заключение

Авторами описаны причины, обуславливающие необходимость применения МКДЭ для расчета устойчивости подземной выработки, сооруженной в скальных горных породах.

Описана механика 1D-элементов, реализованная в программе Prorock, для МКДЭ-моделирования анкеров.

На примере реального подземного рудника показано действие методики, основанной на методе конечно-дискретных элементов, которая может применяться для определения допустимых параметров крепления с учетом влияния очистного пространства.

Для определения параметров искусственного поля напряжений по трем различным схемам выполнено моделирование отработки месторождения, которое показало, что более достоверные результаты показали схемы 2 и 3. Схема 2 представляет собой конечно-элементное моделирование с явным заданием в модели свода обрушения на основе эмпирических расчетов. Схема 3 предполагает моделирование методом конечно-дискретных элементов. На примере схемы 1 показано, как применение метода конечных элементов может приводить к занижению прогнозируемых наведенных напряжений при моделировании отработки с обрушением.

Особенностью симуляции методом конечно-дискретных элементов является то, что в модели отражаются зоны концентрации напряжений, приуроченные к образовавшимся протяженным трещинам вокруг отработанного пространства.

МКДЭ-моделирование выработки в различных условиях позволило определить условия, в которых допустимо применение крепления горных выработок анкерами СЗА и торкретированием.

В отличие от МКЭ-моделей, использование МКДЭ-моделей дает четкое представление о том, происходит ли разрушение выработки или она находится в предельном состоянии, что позволяет не закладывать дополнительный запас устойчивости свыше принятого в моделях. Благодаря этому возможна оптимизация параметров крепей на основе МКДЭ-моделирования. На фактическом примере показано, как МКДЭ-моделирование позволило

определить условия, в которых возможно применение более экономичного способа крепления выработок.

Библиографический список

См. англ. блок. **Ж**

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 1, pp. 118–123
DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20

Stability estimation in underground opening with support system using finite–discrete element method-based modeling

Information about authors

B. T. Ilyasov¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, bt.ilyasov@gmail.com

R. V. Kulsaitov², Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

S. S. Neugomonov³, Chief Technical Officer, Candidate of Engineering Sciences

N. O. Soluyanov⁴, Chief Geomechanic

¹VNIMI's Ural Division, Yekaterinburg, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Ural EnergoResource, Magnitogorsk, Russia

⁴Normickel Technical Services, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article substantiates the relevance of modeling rock bolt support by the finite–discrete element method for calculating stability of underground mine workings. The mechanics of 1D elements implemented in Prorock program is described.

For the real conditions of an underground mine, the method for determining the permissible parameters of support is shown, taking into account the influence of the mining area.

The parameters of the artificial stress field were found from the numerical simulation of mining using three different schemes. Schemes 2 and 3 showed more realistic and closer to each other results. Scheme 2 is a finite element simulation with an explicit specification in the caving arch model based on empirical calculations. Scheme 3 assumes modeling by the finite–discrete element method. Scheme 1 shows how the use of FEM can lead to an underestimation of the predicted induced stresses when simulating mining with caving.

FDEM modeling of mine workings in various conditions made it possible to determine permissive provisions for the use of compound support systems based on self-attaching frictional rock bolts (manufactured by Ural EnergoResource, Magnitogorsk). The conditions for ensuring stability during construction of mine workings in heavily disturbed and fractured rock masses are demonstrated taking into account the influence of the stopping area.

The examples show that, in contrast to FEM, the FDEM models can distinguish between the conditions under which a mine working is in the limiting state and under which it fails. Due to this, the stability reserve as a result of the simulation is determined more accurately, which makes it possible to optimize the parameters of mine support systems based on the FDEM simulation. A case-study describes how FDEM-based modeling allows finding conditions for using a more economical method of supporting underground excavations in comparison with the techniques adopted in the mine.

The study was carried out in cooperation with M. V. Kotik, Project Group Manager at Ural EnergoResource, Magnitogorsk, Russia.

Keywords: rock bolt support, self-attaching frictional rock bolt, finite–discrete element method, finite element method, stress–strain behavior, rock fracturing, failure, post-limiting deformation.

References

- Liskovets A. S., Tatsienko V. P. Analysis of support and tamping methods of the behind-anchoring space of mine workings and methods for calculating the interaction of the support with the rock massif. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*. 2021. No. 1(12). pp. 27–52.
- Lushnikov V. N., Sandy M. P., Eremenko V. A., Kovalenko A. A., Ivanov I. A. Method of definition of the zone of rock massif failure range around mine workings and chambers by numerical modeling. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 12. pp. 11–16.
- Rumyantsev A. E., Trofimov A. V., Vilchinsky V. B., Marysiuk V. P. Finite-element analysis as a means of solving geomechanics problems in deep mines. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses* :

Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. pp. 895–902.

- Lisjak A., Young-Schultz T., Li B., He L., Tatone B. S. A. et al. A novel rockbolt formulation for a GPU-accelerated, finite-discrete element method code and its application to underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020. Vol. 134. 104410. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104410
- Trofimov A. V., Kirkin A. P., Rumyantsev A. E., Yavarov A. V. Use of numerical modelling to determine optimum overcoring parameters in rock stress-strain state analysis. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 12. pp. 22–27. DOI: 10.17580/tsm.2020.12.03
- Tyupin V. N. Estimation of critical depth of deposits by rock bump hazard condition. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 167–171.
- Kandaurov I. I. *Mechanics of Granular Media and Constructional Application*. 2nd revised and enlarged edition. Leningrad : Stroyizdat, 1988. 280 p.
- Stavrogin A. N., Tarasov B. G. *Experimental physics and mechanics of rocks*. Saint-Petersburg : Nauka, 2001. 343 p.
- Fairhurst C., Cook N. G. W. The Phenomenon of Rock Splitting Parallel to the Direction of Maximum Compression in the Neighborhood of a Surface. *Proceeding of the 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics*. Lissabon, 1966. pp. 687–692.
- Makarov A. B. *Practical geomechanics: guidance for mining engineers*. Moscow : Gornaya kniga, 2006. 391 p.
- Munjiza A. *The combined finite-discrete element method*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004. 350 p.
- Ilyasov B. T. Rock mass deformation kinetics analysis using the finite–discrete element method : Thesis of Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Yekaterinburg, 2016. 138 p.
- Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014. Vol. 6, Iss. 4. pp. 301–314.
- Stead D., Eberhardt E., Coggan J. S. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Engineering Geology*. 2006. Vol. 83, Iss. 1-3. pp. 217–235.
- Ilyasov B. T. Prognostication of rock mass deformations with using PROROCK software. *Problemy nedropolzovaniya*. 2018. No. 1. pp. 39–51.
- Živaljić N., Nikolić Ž., Smoljanović H. Computational aspects of the combined finite–discrete element method in modelling of plane reinforced concrete structures. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 131. pp. 669–686.
- Weiqin Wang, Quansheng Liu, Hao Ma, Haifeng Lu, Zhongwei Wang. Numerical analysis of material modeling rock reinforcement in 2D FDEM and parameter study. *Computers and Geotechnics*. 2020. Vol. 126. 103767. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103767
- Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. Vol. 5, Iss. 4. pp. 249–261.
- Louchnikov V. N., Eremenko V. A., Sandy M. P., Kosyrev M. A. Support Design for Mines Exposed to Rockburst Hazard. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53, No. 3. pp. 504–512.
- Volkov P. V., Kulsaitov R. V., Magitov A. M. Technology for fixing mine workings with friction anchors of the SZA type with a new type of anticorrosive coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 966. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012017
- Zubkov A. A., Neugomonov S. S., Volkov P. V. Improvement of mine support technology with frictional rock bolts in difficult geological conditions. *Mining Industry in the 21st Century—Challenges and Reality : Proceedings of Int. Conference to Commemorate ALROSA Yakutniproalmaz Institute's 60th Anniversary*. Mirny : Pero, 2021. pp. 102–103.
- Temporal guidance on conservation of constructions and natural objects from harmful impact of underground mining of non-ferrous metals deposits with unstudied process of rock movement. Leningrad : VNIMI, 1986. 74 p.