

УДК 622.016:658.012.122:51.001.57 © К.В. Халкечев¹,
Ю.М. Левкин², Н.И. Абрамкин², 2024

UDC 622.016:658.012.122:51.001.57 © K.V. Khalkechev¹,
Yu.M. Levkin², N.I. Abramkin², 2024

¹ НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"),
Moscow, 119049, Russian Federation

² Московский политехнический университет,
107023, г. Москва, Россия

² Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

✉ e-mail: h_kemal@mail.ru

✉ e-mail: h_kemal@mail.ru

Разработка математической модели поля напряжений в окрестности магистральной трещины продольного сдвига в кровле горной выработки

Development of a mathematical model of the stress field in the vicinity of a longitudinal shear main crack in the mine roof

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-52-54>

ХАЛКЕЧЕВ К.В.

Доктор физ.-мат. наук, доктор техн. наук,
профессор кафедры Геологии и
маркшейдерского дела
НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: h_kemal@mail.ru

ЛЕВКИН Ю.М.

Доктор техн. наук,
член Союза маркшейдеров России,
профессор кафедры
«Техника и технология горного
и нефтегазового производства»
Московского
политехнического университета,
107023, г. Москва, Россия,
e-mail: lev5353@bk.ru

АБРАМКИН Н.И.

Доктор техн. наук, профессор кафедры
«Техника и технология горного и
нефтегазового производства» Московского
политехнического университета,
107023, г. Москва, Россия,
e-mail: abramkin57@mail.ru

В представленной статье разработана математическая модель, позволяющая осуществить анализ аварийных горных выработок на предмет их восстановления в случае реализации в кровле магистральной трещины продольного сдвига. Применение данной модели на практике заключается в следующем. В начале посредством методов дистанционного зондирования необходимо установить наличие магистральной трещины продольного сдвига в кровле. В случае обнаружения такой трещины установить ее длину и с помощью математической модели определить поле напряжений в ее окрестности. Далее, если касательные компоненты тензора напряжений будут превышать пределы прочности на сдвиг горных пород, то будет наблюдаться дальнейший рост исследуемой трещины, что впоследствии приведет к обвалу кровли. В этом случае аварийная горная выработка не может быть восстановлена. В противном случае – существует малая вероятность обвалов кровли, а следовательно, в этом случае горная выработка восстановлению подлежит.

Ключевые слова: восстановление горной выработки, лидар, математическое моделирование, касательные напряжения, предел прочности, горная порода, кровля выработки, обвал кровли.

Для цитирования: Халкечев К.В., Левкин Ю.М., Абрамкин Н.И. Разработка математической модели поля напряжений в окрестности магистральной трещины продольного сдвига в кровле горной выработки // Уголь. 2024;(7):52-54. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.

Abstract

In the presented article, it has been developed a mathematical model allowing to analyze an emergency mining working when a longitudinal shear main crack is found in the roof. The practical application of this model is as follows. First, using

remote sensing methods, it is necessary to establish the presence of a longitudinal shear main crack in the mine roof. If this kind of crack is detected, determine its length and, using a mathematical model, define the stress field in its vicinity. Furthermore, if the tangential components of the stress tensor exceed the shear strength limits of the rocks, the growth of the main crack will be observed, which will subsequently lead to a collapse of the mine roof. In this case, the emergency mine working cannot be restored. Otherwise, there is a low probability of roof collapse, and therefore, the mine working can be restored.

Keywords

Mine restoration, LiDAR, mathematical modeling, shear stresses, tensile strength, rock, mine roof, mine roof collapse.

For citation

Khalkechev K.V., Levkin Yu.M., Abramkin N.I. Development of a mathematical model of the stress field in the vicinity of a longitudinal shear main crack in the mine roof. *Ugol*. 2024;(7): 52-54. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-52-54.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе подземной добычи угля достаточно часто возникает потребность в анализе состояния аварийных горных выработок на предмет возможности их восстановления. Как правило, такие участки ведения горных работ либо недоступны, либо опасны для жизни человека. В такой ситуации большое значение имеют дистанционные методы зондирования, позволяющие безопасным способом получить информацию о состоянии конструктивных элементов горных выработок. В основе таких методов лежит применение различных беспилотных летательных аппаратов и робототехнических систем, на которых размещены лазерные сканеры, лидары и другие технические средства [1, 2, 3, 4]. В то же время одних лишь результатов дистанционного зондирования явно недостаточно для принятия решения о возможности восстановления аварийных горных выработок. Практика показывает, что для решения данной задачи необходимо использовать комплексный подход, включающий применение результатов дистанционного зондирования как основы для математического моделирования напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов горных выработок. На данный момент существует большое количество математических моделей, которые потенциально могут быть использованы для решения данной задачи [5, 6, 7, 8, 9 и др.]. Однако на сегодняшний момент отсутствуют математические модели, позволяющие принимать решения о восстановлении аварийной горной выработки в случае обнаружения в кровле магистральной трещины продольного сдвига (скольжения в направлении, параллельном краю трещины). В сложившейся ситуации приобретает актуальность разработка математической модели поля напряжений в окрестности магистральной трещины продольного сдвига в кровле как основы для принятия решений о восстановлении аварийной горной выработки.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

В соответствии с классической методологией математического моделирования разработаем содержательную

модель для поставленной задачи. Как правило, в случае анализа степени аварийности горной выработки необходимо выбрать наиболее слабое звено (конструкционный элемент), состояние которого определяет устойчивость остальных элементов. В результате, исследовав такое слабое звено на предмет устойчивости, можно принять решение о восстановлении горной выработки после аварии. Достаточно часто в качестве такого слабого звена выступает кровля аварийной горной выработки. Причем устойчивость такого рода конструктивных элементов во многих случаях зависит от характера роста магистральной трещины продольного сдвига, вызванного изменением внешнего поля напряжений, действующего на кровлю.

Рассмотрим кровлю, слагаемую горными породами, величина представительного объема которых является достаточной для адекватного описания макроскопически однородной изотропной упругой сплошной средой. Не теряя общности, будем рассматривать процессы разрушения, обусловленные хрупкими смещениями горных пород, составляющих кровлю. При этом справедливо предположим, что разрушение горных пород в кровле преимущественно обусловлено неоднородным полем напряжений, реализуемым в окрестности магистральной трещины продольного сдвига под действием внешнего поля.

В таком случае, применяя экспертную систему [10], установим, что разработку рассматриваемой математической модели необходимо осуществлять в рамках механики линейно-упругого разрушения [11].

В итоге, основываясь на разработанной содержательной модели, а также применяя метод аналогий с работами [12, 13, 14], получим следующую математическую модель:

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1) \quad \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0, \quad (3)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений;

$K_{III} = \sigma \sqrt{\pi l}$ – коэффициент интенсивности поля напряжений у вершины трещины; l – половина длины трещины; σ – внешнее поле напряжений; r – радиус вектор; θ – угол, отсчитываемый от вершины трещины, $-\pi < \theta < \pi$.

Компьютерные эксперименты с полученной математической моделью показывают, что в случае превышения значений компонентов тензора напряжений соответствующих величин предела прочности на сдвиг (для каждой горной породы в кровле данная величина индивидуальна), будет наблюдаться дальнейший рост исследуемой трещины, что в последствии приведет к обвалу кровли, а следовательно, в этом случае аварийная горная выработка восстановлению не подлежит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования предложена новая математическая модель, позволяющая осуществить анализ аварийных горных выработок на предмет их восстановления в случае реализации в кровле магистральной трещины продольного сдвига. Применение данной модели на практике заключается в следующем. В начале посредством методов дистанционного зондирования

необходимо установить наличие магистральной трещины продольного сдвига в кровле. В случае ее обнаружения – установить длину трещины и с помощью выражений (1, 2, 3) определить поле напряжений в ее окрестности. Далее, если хотя бы один из компонентов тензора напряжений превысит предел прочности горных пород, составляющих кровлю, то аварийная горная выработка восстановлению не подлежит. В противном случае аварийная горная выработка может быть восстановлена.

Список литературы • References

1. Evaneck N., Slaker B., Iannacchione A., Miller T. LiDAR mapping of ground damage in a heading re-orientation case study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021;31(1):67-74. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.12.018.
2. Singh S.K., Banerjee B.P., Raval S. Three-Dimensional Unique-Identifier-Based Automated Georeferencing and Coregistration of Point Clouds in Underground Mines. *Remote Sensing*. 2021;13(16):3145. DOI: 10.3390/rs13163145.
3. Kim H., Choi Y. Location estimation of autonomous driving robot and 3D tunnel mapping in underground mines using pattern matched LiDAR sequential images. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021;31(5):779-788. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.07.007.
4. Kumar Singh S., Pratap Banerjee B., Raval S. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023;33(2):133-154. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.09.022.
5. Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Халкечев К.В. Разработка математической модели поля напряжений в целиках слоистой текстуры на угольных месторождениях // Уголь. 2023. № 8. С. 84-96. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86. Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V. Mathematical model development of the stress field in the pillars stratified texture in coal deposits. *Ugol'*. 2023;(8): 84-86. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-84-86.
6. Математическое обеспечение информационной системы анализа процесса разрушения трещиноватой кровли на угольных месторождениях / Р.К. Халкечев, К.В. Халкечев, Ю.М. Левкин и др. // Уголь. 2023. № 12. С. 64-66. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-64-66. Khalkechev R.K., Khalkechev K.V., Levkin Yu.M., Kuzmenko S.Yu. Mathematical support of the information system for analyzing the process of fractured roof destruction in coal fields. *Ugol'*. 2023;(12):64-66. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-8-64-66.
7. Нечеткая модель определения формы устойчивого целика в углевмещающих породах / Р.К. Халкечев, Ю.М. Левкин, К.В. Халкечев и др. // Уголь. 2024. № 1. С. 61-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-61-63. Khalkechev R.K., Levkin Yu.M., Khalkechev K.V., Kuzmenko S.U. Fuzzy model of the shape determining of a stable pillar in coal-bearing rocks. *Ugol'*. 2024;(1):61-63. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-61-63.
8. Bai X., Zhu P. Research on roof caving mechanism and influencing factors in inclined ore body caving mining. *Results in Engineering*. 2024;(22):102048. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102048.
9. Халкечев Р.К. Применение теории мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов с целью краткосрочного прогнозирования внезапных выбросов угля и газа // Уголь. 2019. № 7. С. 48-50. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-48-50. Khalkechev R.K. Multifractal modeling theory application of rock mass deformation and destruction processes with the aim of short-term forecasting sudden coal and gas outbursts. *Ugol'*. 2019;(7): 48-50. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-48-50.
10. Халкечев Р.К. Экспертная система разработки математических моделей геомеханических процессов в породных массивах // Горный журнал. 2016. № 7. С. 96-98. DOI: 10.17580/gzh.2016.07.21. Khalkechev R.K. Expert system to develop mathematical models of geomechanical processes in rock massifs. *Gornyj zhurnal*. 2016;(7): 96-98. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.07.21.
11. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М: Наука, 1974. 640 с.
12. Халкечев Р.К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 6. С. 97-105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105. Khalkechev R.K. Fuzzy mathematical model of fracture concentration changes in a mineral under external load. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2019;(6):97-105. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.
13. Халкечев Р.К. Теория мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов как основа автоматизации технологии буровзрывных работ на угольных разрезах // Уголь. 2019. № 11. С. 32-34. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-32-34. Khalkechev R.K. Multifractal modeling theory of rock mass deformation and destruction as the basis for automation of drilling and blasting technologies in coal open-pit mines. *Ugol'*. 2019;(11):32-34. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-32-34.
14. Халкечева Л.К., Халкечев Р.К. Автоматизированная система мониторинга состояния транспортных берм на предмет оползневой опасности в виде проседания // Уголь. 2022. № 4. С. 50-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52. Khalkecheva L.K., Khalkechev R.K. Automated monitoring system of transport berms condition for landslide danger in the form of subsidence. *Ugol'*. 2022;(4):50-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

Authors Information

Khalkechev K.V. – Doctor of Physico-Mathematical Science, Doctor of Engineering Science, Professor, Department of Geology and mine surveying, National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: h_kemal@mail.ru

Levkin Yu.M. – Doctor of Engineering Science, Member of the Russian Union of Surveyors, Professor of the Department of Mining and Oil and Gas Production Technique and Technology, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: lev5353@bk.ru

Abramkin N.I. – Doctor of Engineering Science, Professor of the Department of Mining and Oil and Gas Production Technique and Technology, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: abramkin57@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.06.2024

Поступила после рецензирования: 16.06.2024

Принята к публикации: 25.06.2024

Paper info

Received June 12, 2024

Reviewed June 16, 2024

Accepted June 25, 2024