Оригинальная статья

Original Paper

УДК 622.023.23 © Н.В. Черданцев✉, 2025

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», 650065, Кемерово, Россия
✉ e-mail: nvch2014@yandex.ru

UDC 622.023.23 © N.V. Cherdantsev✉, 2025

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650056, Russian Federation
✉ e-mail: nvch2014@yandex.ru

Напряженное состояние слоистого породного массива около выработки квадратного сечения*

Mathematical modeling of the stress state in the shaft bridge installed in the development of a circular cross-section

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-83-85

Упругопластическая задача о напряженном состоянии слоистого массива, вмещающего протяженную одиночную выработку, решается в следующей последовательности. Сначала строится поле напряжений в части массива, примыкающей непосредственно к выработке, которая образует предельно напряженную зону (зону неупругих деформаций), которая строится методом характеристик, разработанным В.В. Соколовским применительно к расчету сыпучих и связных сред. Затем путем замены предельно напряженной зоны напряжениями на ее границе упругопластическая задача сводится к краевой задаче теории упругости для среды с подкрепленным вырезом с размерами, равными размерам предельно напряженной зоны. Задача теории упругости решается методом граничных элементов.

Ключевые слова: *массив горных пород, горная выработка, критерии Кулона – Мора, метод характеристик, метод граничных элементов.*

Для цитирования: Черданцев Н.В. Напряженное состояние слоистого породного массива около выработки квадратного сечения // Уголь. 2025;(12):83-85. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-83-85.

ЧЕРДАНЦЕВ Н.В.
Доктор техн. наук, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: nvch2014@yandex.ru

Abstract

The elastically plastic problem of the stress state of a layered massif containing an extended single mine is solved in the following sequence. First, a stress field is constructed in the part of the array adjacent directly to the mine, which forms an extremely stressed zone (zone of inelastic deformations), which is constructed by the method of characteristics developed by V.V. Sokolovsky in relation to the calculation of bulk and cohesive media. Then, by replacing the extremely stressed zone with stresses at its boundary, the elastically plastic problem is reduced to the boundary value problem of elasticity theory for a medium with a reinforced cutout with dimensions equal to the dimensions of the extremely stressed zone. The problem of elasticity theory is solved by the boundary element method.

Keywords

Massif of rocks, mine working, the Coulomb-Mohr criterions, method of characteristics, the boundary element method.

Acknowledgements

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2024-0013 «Creation of multipurpose systems for monitoring and

** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024-2025 гг.» (рег. № 1022041300134-5-1.5.1;2.7.5).*

forecasting of gas-dynamic phenomena, control of the stress state, development of methods for their prevention and efficiency assessment during underground development of coal deposits. 2024-2025» (Reg. No. 1022041300134-5-1.5.1;2.7.5).

For citation

Cherdantsev N.V. Mathematical modeling of the stress state in the shaft bridge installed in the development of a circular cross-section. *Ugol'*. 2025;(12):83-85. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-83-85.

ВВЕДЕНИЕ

На больших глубинах разработки месторождений полезных ископаемых вокруг выработок образуются предельно напряженные зоны, от размеров которых зависят выбор типа крепи, ее расчет и технология возведения [1, 2, 3, 4]. Кроме этого, на больших глубинах возникают горные удары, обусловленные повышенным уровнем напряженного состояния массива [5].

В этой связи проблемы выбора модели массива, обоснование методов расчета его геомеханического состояния, к которому, прежде всего, относится напряженное состояние, являются актуальной производственной задачей, поскольку позволяют обосновать надежность, долговечность, оптимальную конструкцию или тип крепи и эффективные методы борьбы с горными ударами. Решение этой задачи имеет также важное научное значение, поскольку позволяет учесть новые важные характеристики среды, ранее не использующиеся в геомеханических моделях массива, и применять фундаментальные методы механики деформируемого твердого тела, как, например, это делается с другими моделями [4, 6, 7, 8, 9, 10].

Целью данной статьи является решение задачи о напряженном состоянии анизотропного массива горных пород, представленного слоистой средой, в котором зона предельно напряженного состояния с неупругими деформациями определяется на основе общего и специального критериев прочности Кулона – Мора, наиболее точно отражающих переход горных пород в это состояние.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

На глубине H в анизотропном по прочности массиве горных пород, представленном однородными породами с горизонтальными поверхностями ослабления в виде регулярной горизонтальной слоистости, проведена протяженная выработка квадратного сечения с размером стороны h. Система координат $y0z$ расположена в центре тяжести ее сечения.

Поскольку длина выработки превышает размеры ее сечения, то массив находится в условиях плоской деформации, и поэтому задача решается в двумерной постановке. В этой связи массив заменяется плоскостью, нагруженной равномерным гравитационным давлением γH (γ – средневзвешенный объемный вес налегающих пород).

Основными параметрами среды являются: коэффициент Пуассона m, предел прочности породы на одноосное сжатие σ_0 или коэффициент сцепления K, угол внутреннего трения ρ, коэффициент сцепления K' и угол внутреннего трения ρ' по контактам слоев. Здесь принято, что временное сопротивление всестороннему растяжению, равному отрезку, отсекаемому на оси абсцисс диаграммы Мора прямой линией предельных состояний, определяемому формулой $K \times \mathrm{ctg}\rho$, для пород массива и по поверхности ослабления одинаково, т.е. $K \times \mathrm{ctg}\rho = K' \times \mathrm{ctg}\rho'$.

Подход к решению подобной задачи о напряженном состоянии массива в окрестности пластовой выработки, пройденной по угольному пласту с прочными боковыми породами, изложен в работах [1, 2, 11].

При наличии в массиве слоистости, по которой характеристики прочности ниже, чем по самому массиву, в предельно напряженной зоне возникают участки, в которых выполняются условия специального критерия Кулона – Мора. В этой связи задача распределения напряжений в непосредственной окрестности выработки, в которой породы находятся в предельно напряженном состоянии, решается методом характеристик, разработанным В.В. Соколовским применительно к сыпучим и связным средам [12].

Граница раздела пластической зоны и упругой области массива находится из решения упругопластической задачи. В ее решении используется аксиома статики о замене связей реакциями в них. Замена предельно напряженных зон угольного пласта усилиями на его границах с окружающим массивом [13] позволяет данную задачу свести ко второй внешней краевой задаче теории упругости, представленной интегральным уравнением Фредгольма второго рода [14]. Это уравнение решается методом механических квадратур [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты решения задачи о предельно напряженном состоянии массива вокруг выработки квадратного сечения получены при следующих параметрах массива: $H = 900$ м, $\gamma = 25$ кН/м^3, $m = 0{,}25$; $\sigma_0 = 10$ МПа ($K = 3{,}5$ МПа), $K' = 1{,}7$ МПа, $\rho = 20°$, $\rho' = 10°$, $h = 3$ м.

В силу симметрии задачи на *рис. 1* приведена компьютерная модель сетки линий скольжения, построенная только для первой полчетверти сечения выработки.

Она представлена узлами пересечения двух систем линий скольжения. На *рис.* 1 видны полосы, разделяющие сетку. Они соответствуют участкам массива специального предельного состояния, которое реализуется по поверхностям ослабления, в отличие от остальных ее участков, где предельное состояние наступает по основной породе, расположенной между ними.

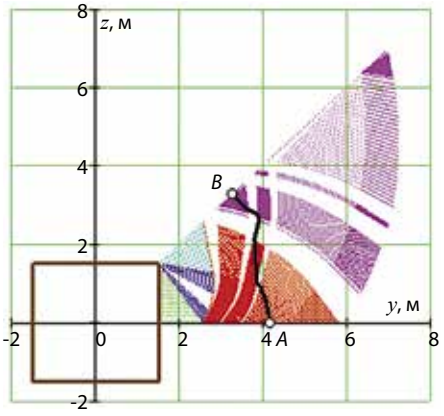

Рис. 1. Компьютерная модель сетки линий скольжения в слоистом массиве

Fig. 1. Computer model of a grid of sliding lines in a layered massif

На этом рисунке линией *AB* обозначена граница раздела зоны пластичности и упругой области.

На *рис. 2* построены эпюры вертикальных напряжений σ_z вдоль оси y.

Линии *1* и *2* обозначают эпюру напряжений σ_z, причем линия *1* – эпюра напряжений в предельно напряженной зоне, представляющая ступенчато-переменный график, а линия *2* – в упругой области массива.

Из сравнения результатов расчетов слоистого и изотропного массивов следует, что, во-первых, размеры пластической зоны в слоистом массиве превышают размеры зоны в изотропном массиве более чем на 20% (размер от борта выработки до точки *A* составляет 2,64 м, а аналогичный размер в изотропном массиве получается равным 2,19 м). Во-вторых, из *рис. 2* следует, что максимальное напряжение σ_z, действующее на границе пластической зоны, составляет 1,383 γH, и оно превышает напряжение в изотропном массиве более чем на 11%.

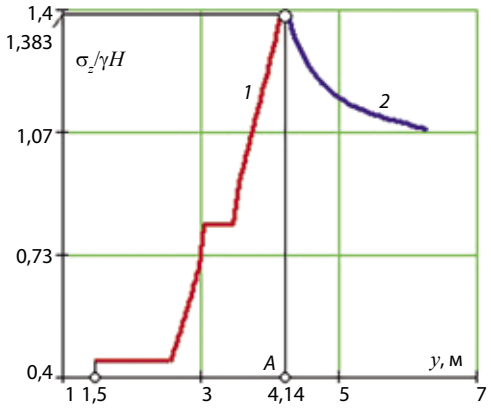

Рис. 2. Эпюра распределения напряжений σ_z вдоль оси y

Fig. 2. The plot of the stress distribution σ_z along the y axis

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наличие в массиве поверхностей ослабления существенно изменяет картину линий скольжения в предельно напряженной зоне массива около выработки. Так, непрерывная сетка линий скольжения в изотропном массиве, построенная на основе только общего критерия Кулона – Мора, в слоистом массиве является комбинированной, в ней участки с предельным состоянием основных пород сменяются полосами различной толщины, в которых предельное состояние наступает по поверхностям ослабления согласно специальному критерию прочности.

2. Компоненты поля напряжений в предельно напряженной зоне изменяются неравномерно, а представляют собой вид ступенчато-переменных функции, у которой участки постоянных значений попеременно сменяются участками слабовыраженного нелинейного роста, близкими к линейным функциям.

3. Параметры предельно напряженной зоны около квадратного выреза в слоистом массиве превышают параметры аналогичной зоны в изотропном массиве: разница в размере предельной зоны составляет порядка 20%, а в максимальных напряжениях – около 11%.

Список литературы • References

1. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 384 с.
2. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
3. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1984. 382 с.
4. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.
5. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
6. Mohammadi H., Pietruszczak S. Description of damage process in fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;(113):295-302.
7. Xufeng Liu, Peng-Zhi Pan, Zhaofeng Wang et al. Three-dimensional transversely isotropic equivalent continuum model for layered rock and numerical implementation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2024;(175):105661.
8. Haonan Wang, Tianshou Ma, Yang Liu et al. Numerical and experimental investigation of the anisotropic tensile behavior of layered rocks in 3D space under Brazilian test conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023;(170):105558.
9. Wenjing Wang, Douglas R. Schmitt, Wei L.A. Program to forward model the failure pattern around the wellbore in elastic and strength anisotropic rock formations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022;(151):105035.
10. Ross Seedsman. Assessing the conditions at the boundary of excavations in bedded or foliated rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;(148):104983.
11. Черданцев Н.В. Исследование предельно напряженного состояния пласта в его краевой зоне методами механики сыпучей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 3. С. 45-57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-45-57.
    Cherdantsev N.V. Investigation of the extremely stressed state of the formation in its marginal zone by methods of loose medium. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020;(3):45-57. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-45-57.
12. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
13. Cherdantsev N.V. A Certain Approach to Constructing the Solution to the Problem of Coal and Methane Outburst from a Marginal Seam Zone. *Mechanics of Solids*. 2022;57(8):2128–2150. DOI: 10.3103/S0025654422080301.
14. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
15. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688с.

Authors Information
Cherdantsev N.V. – Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650056, Russian Federation, e-mail: nvch2014@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info
Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025