

УДК 622.1

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД БЛОЧНОГО СТРОЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Асилова Зулфия Атамырзаевна¹, Никольская Ольга Викторовна²

¹Жалал-Абадский международный университет, Кыргызская Республика

²Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, Кыргызская Республика

Аннотация

В статье рассматривается метод моделирования геомеханического состояния массива горных пород блочного строения с использованием эквивалентных материалов. Предложен обоснованный подход, позволяющий учитывать структурные и механические особенности массива при проведении исследований. Описаны принципы подбора эквивалентных материалов, методика их применения и анализ достоверности полученных результатов. Приведены примеры моделирования, демонстрирующие эффективность разработанного метода для прогнозирования напряженно-деформированного состояния горных пород. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании горнотехнических объектов, а также для оценки устойчивости массивов при различных техногенных воздействиях. Обоснованный метод может быть адаптирован для изучения сложных геомеханических процессов, включая сейсмическое воздействие и добычные работы. Проведенные исследования способствуют развитию более точных инструментов прогнозирования и снижения рисков в горнодобывающей отрасли.

Ключевые слова: Геомеханика, массив горных пород, блочное строение, эквивалентные материалы, моделирование

JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR MODELING THE GEOMECHANICAL STATE OF A BLOCK-STRUCTURED ROCK MASS USING EQUIVALENT MATERIALS

Zulfia Atamyrzaevna Asilova¹, Olga Viktorovna Nikolskaya²

¹Jalal-Abad International University, Kyrgyz Republic

²Institute of Machine Science, Automation, and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (NASKR), Kyrgyz Republic

Abstract

The article examines a method for modeling the geo-mechanical state of a block-structured rock mass using equivalent materials. A well-founded approach is proposed that takes into account the structural and mechanical characteristics of the rock mass during research. The principles for selecting equivalent materials, the methodology for their application, and an analysis of the reliability of the obtained results are described. Examples of modeling are presented, demonstrating the effectiveness of the developed method for predicting the stress-strain state of rock formations. The results obtained can be used in the design of mining and engineering structures, as well as for assessing the stability of rock masses under

various anthropogenic influences. The proposed method can be adapted to study complex geo-mechanical processes, including seismic impact and mining operations. The conducted research contributes to the development of more accurate forecasting tools and risk reduction in the mining industry.

Keywords: Geomechanics, rock mass, block structure, equivalent materials, modeling

© 2025. The Authors. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License, CC BY, which allows others to freely distribute the published article, with the obligatory reference to the authors of original works and original publication in this journal.

Correspondence: Zulfiia Atamyrzaevna Asilova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Jalal-Abad International University, Jalal-Abad, Kyrgyzstan, Email: aslova.zulfiya@mai.ru

Введение

Блочная геомеханическая модель – это модель, основанная на геологической (литологической) модели, включающей сведения о структурных особенностях массива, рейтинговые показатели и необходимые параметры. Она содержит геомеханические характеристики, используемые для оценки устойчивости подземных горных выработок, а также безопасные значения элементов горных работ и конструктивные параметры систем разработки.

Литологическая модель – это модель, содержащая информацию о различиях в литологии и параметрах рудных тел, отражающая основные структурные и литологические особенности участка недр. Она обеспечивает комплексное представление о его геологическом строении. В состав модели входят блочная литологическая модель, каркасная модель литотипов и тектонических нарушений. Модель состоит из ячеек стандартного размера, определяемого предприятием для построения модели минерализации, каждая из которых содержит сведения о литотипах (кодировка), плотности, степенях окисления, влажности и параметрах RQD (при их наличии).

Практический опыт применения различных методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) блочных и слоистых горных массивов показывает, что одним из наиболее перспективных подходов для изучения подобных нелинейных процессов в различных горнотехнических условиях является моделирование с использованием эквивалентных материалов (ЭМ). Данный метод, разработанный Г.Н. Кузнецовым и получивший практическое применение в его исследованиях, а также в работах М.Ф. Шклярского, М.Н. Будько, М.С. Злотникова, Ф.П. Глушихина, А.А. Борисова и В.П. Зубова, позволил решить ряд научных и прикладных задач. В результате были выявлены основные качественные закономерности между параметрами НДС горного массива и различными геологическими и горнотехническими факторами.

В работах Ф.П. Глушихина, М.В. Курлени, В.Н. Ревы, М.А. Розенбаума, Г.Л. Фисенко, Е.И. Шемякина, М.Ф. Шклярского установлено «явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок» [1]. Этот метод, основанный на базе критериев подобия Г.Н. Кузнецова, получил распространение более чем в 30 странах мира: Германии, Китае, Франции и др. В последнее время метод наиболее часто применяется в Китае при решении различных геомеханических задач. Например, решение проблем разработки глубоко залегающих месторождений [2, 3], исследование процессов динамических сдвижений при разработке полезных ископаемых, влияния трещиноватости кровли на параметры мульды сдвижений, дисперсного состава

материалов на их деформационные характеристики [4], процессов разрушения целиков [5].

Постановка проблемы. Современный уровень развития метода моделирования с использованием эквивалентных материалов (ЭМ) не в полной мере раскрывает его потенциал для точного воспроизведения и надежного изучения сложных глубинных динамических процессов, связанных с трансформацией структур и физических полей при подземной добыче твердых полезных ископаемых. Долгосрочные исследования, проведенные во ВНИМИ и Санкт-Петербургском горном университете, показали, что решение этой проблемы возможно лишь путем разработки новой методологии, основанной на более универсальных критериях подобия. Это включает создание соответствующих типов ЭМ и технических решений, обеспечивающих соответствие начальных и граничных условий моделируемой области массива, достоверное воспроизведение различных горных работ, а также исследование взаимодействия физических полей, динамических процессов и энергообмена.

Основы моделирования на эквивалентных материалах. Современные научные представления о подобных физических явлениях начали формироваться в середине XIX века. В трудах Ж. Бертрана, Рэлея, Т. А. Афанасьевой-Эренфест, Ж. Букингема и А. Федермана были определены основные принципы подобия физических процессов, основанные на анализе размерностей, теореме Ньютона о динамическом подобии и соотношении между числом безразмерных комплексов и размерными величинами, их определяющими.

В дальнейшем теория подобия получила развитие в работах М. В. Кирпичева, Л. И. Седова, П. К. Кондакова. Ее применение в геомеханических исследованиях активно развивалось благодаря трудам Г. Н. Кузнецова, А. А. Борисова и других ученых, что способствовало совершенствованию методов моделирования напряженно-деформированного состояния горных массивов с использованием эквивалентных материалов.

Основная часть

Ключевыми элементами теории подобия являются связанные между собой константы подобия, величины которых определяются основными физическими законами. Выведенное еще Ж. Бертранием математическое выражение для инварианта динамического подобия основывалось на общем понятии динамического подобия, высказанном Ньютоном, поэтому это математическое выражение называют обычно «законом подобия Ньютона». В работе [6], приводится математический вывод этого закона, основанного на обеспечении геометрического, кинематического и динамического подобия, который в конечной форме может быть выражен в виде уравнения:

$$\frac{P_n t_n^2}{\rho_n l_n^4} = \frac{P_m t_m^2}{\rho_m l_m^4} = idem \text{ или } \frac{P_m}{\rho_m a_m l_m^3} = \frac{P_n}{\rho_n a_n l_n^3} = inv$$

где

P, t, ρ, l, a – соответственно сила, время, плотность, размер элемента, ускорение;

m и n – индексы, соответствующие модели и натуре;

idem – обозначение числа Ньютона;

inv – некоторое безразмерное число (определяющий критерий подобия).

В дальнейшем делается предположение, что «деформации и разрушения породы происходят в результате действия сил тяжести» и вывод, что $a_m = a_n = g = \text{const}$, после чего для выбора эквивалентных материалов определяется их характеристика N , имеющая размерность «сила, деленная на площадь» [6]. В этом случае:

$$P_m / (\gamma_m l_{m3}) = P_n / (\gamma_n l_{n3}) = \text{inv}; \text{ или } N_m / (\gamma_m l_m) = N_n / (\gamma_n l_n) = \text{idem}$$

Данное уравнение и соответствующие ему критерии подобия используются в неизменном виде практически во всех работах при использовании данного метода [7]. На основании этих критериев подбираются типы ЭМ [8,9], определяются параметры технических устройств и стендов для обеспечения начальных и граничных условий в исследуемой области массива [9]. Из подобранных типов ЭМ изготавливаются модели горных массивов, моделируются различные типы горных работ, исследуются процессы деформирования и разрушения горных пород [10], осуществляется взаимное тестирование методов численного и физического моделирования.

Выведенное Г.Н.Кузнецовым соотношение относится к любому однородному по «плотности» и «изотропности» элементу горного массива в форме куба с размерами, позволяющими считать его квазиоднородным. Для блочного массива необходимо вводить подобия не только для подобия гравитационного, но и подобие свойств заполнителя межблокового пространства.

В настоящее время в практику оценки состояния массива горных пород применяют численные методы моделирования.

Заключение

Проведенный анализ подтверждает эффективность метода моделирования геомеханического состояния массива горных пород блочного строения с использованием эквивалентных материалов. Данная методика позволяет учитывать структурные и механические особенности массива, обеспечивая более точное воспроизведение реальных процессов деформирования и разрушения горных пород.

Результаты моделирования показывают, что использование эквивалентных материалов способствует повышению достоверности прогнозирования напряженно-деформированного состояния горных массивов, что особенно важно при проектировании горнотехнических объектов и оценке их устойчивости к различным техногенным воздействиям.

Кроме того, предложенный метод обладает высокой адаптивностью, что делает его перспективным для изучения сложных геомеханических процессов, включая сейсмические воздействия и добычные работы. В дальнейшем данный метод может быть усовершенствован за счет расширения базы экспериментальных данных и разработки новых типов эквивалентных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Таким образом, исследования в данной области способствуют развитию точных инструментов моделирования и прогнозирования, что позволит повысить безопасность горных работ и минимизировать техногенные риски.

Список литературы

1. Zuev, B.Yu. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals / B.Yu.Zuev, V.P.Zubov, A.S.Fedorov // Eurasian mining. 2019. № 1. - P. 8-12
2. Ground cracks development and characteristics of strata movement under fast excavation: a case study at Bulianta coal mine, China / Yuankun Xu, Kan Wu, Liang Li et al. // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. Vol. 78. P. 325-340.DOI: 10.1007/s10064-017-1047-y.
3. Seam with Partings / Hongtao Liu, Linfeng Guo, Guangming Cao, Xidong Zhao et al. // Applied sciences. 2020. Vol. 10. Iss. 10. № 5311. DOI:10.3390/app10155311.
4. Effect of Sand Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum-Cemented Similar Materials / Weiming Guan, Qi, Zhiyi Zhang, Senlin Nan // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 3. № 765. DOI: 10.3390/ma13030765.
5. Зуев, Б.Ю. Физическое моделирование геомеханических процессов в блочно-иерархических массивах на основе единого комплексного условия подобия / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 4. - С. 356-360.
6. Моделирование проявлений горного давления / Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Васильев Ю.И. и др М: Недра, 1968. - 280с
7. Басов, В.В. Исследование характера деформирования эквивалентного материала для тестирования численной модели прогноза устойчивости сопряжений горных выработок / В.В.Басов, С.В.Риб, В.Н.Фрянов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. Вып. 2. - С. 134-145.
8. Развитие систем моделирования и проектирования горных машин в КузГТУ и КарГТУ Российской Федерации и Казахстана / Г.Д.Буялич, Г.С.Жетесова, К.М.Бейсембаев, Н.С.Малыбаев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 5. Ч. 1. - С. 8-13.
9. Сергиенко А.И. Исследование поведения породного массива на моделях из эквивалентных материалов / А.И.Сергиенко, Ю.С.Мостыка // Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості збірник матеріалів: VII регіональної науково-практичної конференції. Красноармейск: КІІ ДонНТУ, 2015. - С. 76-82.
10. Хоменко О.Е. Лабораторные исследования зонального структурирования массива вокруг горных выработок / О.Е.Хоменко, М.Н.Кононенко, А.П.Дронов // Физико-технические проблемы горного производства. 2016. Вып. 18. - С. 103-110.

Received / Получено 28.01.2025

Revised / Пересмотрено 20.02.2025

Accepted / Принято 20.03.2025