

Создание трехмерной геомеханической модели для оценки устойчивости породного массива

Д.Ж. Акматов^{1,2}✉, Р.В. Шевчук^{1,2}, Е.А. Тухель², В.В. Николайчук², Р.Р. Галиева²

¹ Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ dastan.akmatov.1994@mail.ru

Резюме: В современных исследованиях распространено использование трехмерных геомеханических моделей для оценки устойчивости горных пород. Создание трехмерной геомеханической модели представляет собой ключевой этап в исследованиях напряженно-деформированного состояния горных пород. В статье представлен теоретический обзор расчета напряженно-деформированного состояния горных пород. Основная цель работы заключается в создании геомеханической численной модели, направленной на описание напряженно-деформированного состояния горных пород. В ходе моделирования напряженно-деформированного состояния определяется распределение компонент тензора напряжений для различных направлений силового воздействия и других граничных условий с целью определения пределов их изменений. Моделирование напряженно-деформированного состояния в трехмерной постановке осуществляется с использованием метода конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics, что является широко распространенным подходом среди исследователей.

Ключевые слова: геомеханическое моделирование, трехмерная модель, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, прочность горных пород, устойчивость массива

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра Российской академии наук, утвержденного Минобрнауки России.

Для цитирования: Акматов Д.Ж., Шевчук Р.В., Тухель Е.А., Николайчук В.В., Галиева Р.Р. Создание трехмерной геомеханической модели для оценки устойчивости породного массива. *Горная промышленность*. 2024;(1):145–148. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-145-148>

Creation of a 3D geomechanical model to assess rock mass stability

D.Zh. Akmatov^{1,2}✉, R.V. Shevchuk^{1,2}, E.A. Tuchel², V.V. Nikolaichuk², R.R. Galieva²

¹ Geophysical Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² NUST MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ dastan.akmatov.1994@mail.ru

Abstract: The use of 3D geomechanical models to assess rock stability is a common practice in present-day research. Creation of a 3D geomechanical model represents a key stage in studying the stress-and-strain state of rocks. The paper presents a theoretical overview of the rock stress-and-strain state calculation. The main objective of the research is to create a geomechanical numerical model aimed at describing the stress-and-strain state of rocks. Distribution of the stress tensor components for different directions of the forces applied and other boundary conditions was determined during the stress-and-strain modeling in order to determine the limits of their changes. Modeling of the stress-and-strain state in a 3D formulation was performed using the finite element method in the COMSOL Multiphysics software suite, which is a common approach among the researchers.

Keywords: geomechanical modeling, a 3D model, stress-and-strain state, finite element method, rock strength, rock mass stability-----

Acknowledgements: This work was conducted in the framework of budgetary funding of the Geophysical Center of Russian Academy of Sciences, adopted by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Akmatov D.Zh., Shevchuk R.V., Tuchel E.A., Nikolaichuk V.V., Galieva R.R. Creation of a 3D geomechanical model to assess rock mass stability. *Russian Mining Industry*. 2024;(1):145–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-145-148>

Введение

Геомеханическое моделирование представляет собой вариационный процесс определения реакции породного массива на внешние природные и техногенные воздействия [1–3] в виде изменения первоначального поля напряжений.

Разработка геомеханических моделей базируется на ряде дисциплин из области наук о Земле, каждая из которых имеет свой предмет исследований, методические подходы к его изучению, способы получения, интерпретации и представления данных и т.д. Геомеханика – это наука о механических состояниях породных массивов и процессах, развивающихся в них вследствие различных естественных

и техногенных физических воздействий, включая внедрение в массив самого подземного объекта. Отсюда геомеханическая модель – это упрощенное отражение наиболее существенных признаков, свойств и процессов в породном массиве и оценка его реакции на внешние воздействия. Она несет информацию о структуре среды, о физико-механических свойствах пород, НДС оценку устойчивости в виде численных параметров.

Для оценки механического состояния породного массива, в т.ч. в математических моделях, широко используется термин «устойчивость геологической среды»,

определение которого приводится в работах [4–8].

Устойчивость геологической среды – это неизменность или изменение свойств, процессов и состояния в таких пределах, которые не приведут к опасным деформациям, напряжениям и структурным нарушениям во вмещающем горные выработки породном массиве в заданном интервале времени [4; 5].

Для определения величин и направлений напряжений имеется большое количество методов и их модификаций, со своими свои преимуществами и недостатками. Их можно условно разделить на три группы: геологические, геомеханическое, геофизические.

Современные программно-аппаратные средства позволяют в рамках создаваемой 3D-модели насыщать и объединять огромные информационные массивы разнородных данных, в том числе физико-механических параметров, в результате чего появляется возможность объемного твердотельного моделирования. В универсальных системах проектирования (AutoCAD, SolidWorks и др.) хорошо реализуется ядро геометрической обработки и твердотельного моделирования. Программные комплексы инженерного анализа методом конечных элементов (COMSOL Multiphysics, PLAXIS, CAE Fidesys, Abaqus, RFEM, SigmaGT, ANSYS, NASTRAN и др.) предоставляют достаточно полный функциональный набор для инженерных расчетов, включая моделирование напряженно-деформированного состояния, НДС собственных частот и форм колебаний, механики деформируемого твердого тела, но ограничены в инструментах интерактивного построения или изменения модели.

Методология

Математическое моделирование НДС определяется решением краевой задачи упругости, вязко-упругости, упругопластичности и т.п. В условиях, когда константы, определяющие деформации и прочность горной породы, либо неизвестны, либо заданы приближенно, упругие модели позволяют получить качественную картину распределения полей напряжений с учетом его структурных неоднородностей. Для расчетов применяют точные аналитические методы и приближенные численные методы. Приближенные численные методы расчетов обладают большой универсальностью, кроме того, они могут быть выполнены с любой заданной точностью [9].

Для большого количества разломов и наличия локальных неоднородностей, а также анизотропии свойств оптимальным с точки зрения точности расчетов является метод конечных элементов (МКЭ). По нему имеется весьма обширный список публикаций, где описаны примеры приложения МКЭ для различных задач [9–11].

МКЭ основан на вариационном исчислении и механике деформированного твердого тела. Краевая задача для упругого потенциала пород, находящегося под действием сил гравитации и тектонических сил, рассматривается как функционал Лагранжа. Расчетная область разбивается на большое количество малых элементов, внутри которых потенциал изменяется линейно. Решается система линейных алгебраических уравнений с большим количеством неизвестных – узловых перемещений, после чего вычисляются деформации и из обобщенного закона Гука напряжения в узлах элементов. При этом в качестве исходных данных используются геометрия модели, упругие свойства и плотность пород, кинематические связи и силовые воздействия [9].

Результатом моделирования является пространственное распределение тензора напряжений, деформаций и параметров, характеризующих устойчивость массива. При этом набор (как исходных, так и на выходе) параметров модели может быть достаточно разнообразным в зависимости от наличия исходных данных и поставленной задачи.

Расчет НДС проводился с МКЭ в трёхмерной постановке:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

Напряжение бокового отпора принимается по А.Н. Динику как:

$$\sigma_{от} = \sigma_z \cdot \frac{\mu}{1-\mu}$$

Расчет интенсивности напряжений производился по формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \sigma_z) + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yz}^2 + 3\tau_{xz}^2}$$

Таблица 1
Исходные данные для трехмерного моделирования

Table 1
Input data for 3D modeling

Параметр	Размерность	Значение
Модуль Юнга	Па	2·10 ¹⁰
Коэффициент Пуассона	-	0,25
Усредненная плотность геоматериала	кг/м ³	2500

Результаты

Основной задачей на данном этапе является создание каркасной трехмерной модели (рис. 1, а), включающей литологическую компоненту, разрывные зоны и физико-механические характеристики исследуемого массива [12]. На последующем этапе определяются граничные условия, где вертикальное напряжение σ_1 соответствует объемному весу горных пород H , а горизонтальные напряжения σ_2 и σ_3 определяются как произведение коэффициента бокового давления λ на объемный вес γ и глубину H . Модель разбивается на четырехугольные конечные элементы (пирамиды) с использованием метода триангуляции Делоне. Размер конечного элемента постепенно увеличивался

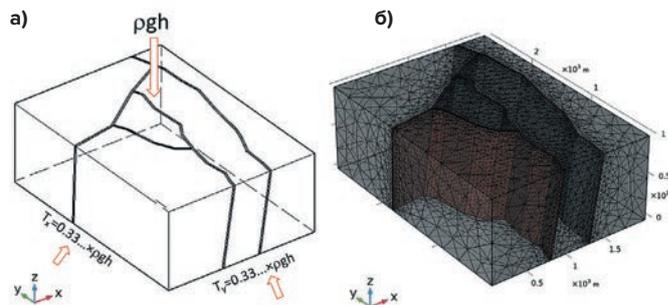


Рис. 1
Расчетно-геологическая модель: а – трёхмерная структурная модель; б – трёхмерная конечно-элементная модель

Fig. 1
A computational geological model: а – a 3D structural model; б – a 3D finite element model

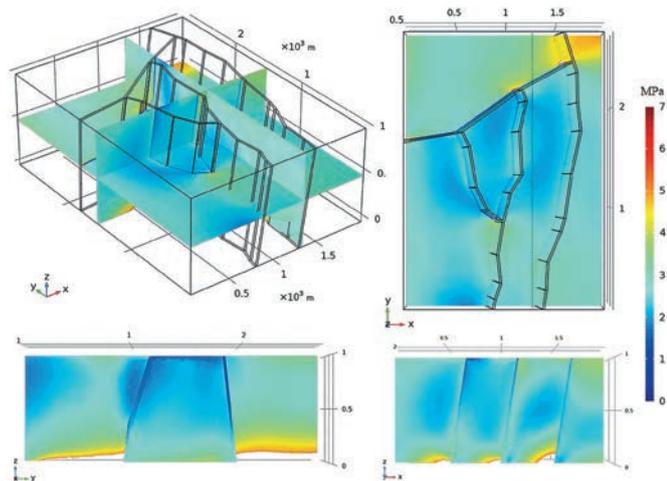


Рис. 2
Пример модели интенсивности напряжений σ_i

Fig. 2
Example of the stress intensity model σ_i

к границам каркасной модели, где геометрия модели принимала прямоугольные формы, и ее структура становилась более однородной. Общий вид конечно-элементной модели, наложенной на каркасную модель, представлен на рис. 1, б.

На рис. 2 приведен расчет интенсивности напряжений σ_i . В реальных условиях поле тектонических напряжений существенно осложняет приведенную картину распределения напряжений. Нами было показано, что наличие тектонических разломов в массиве под действием тектонических напряжений приводит к локальной концентрации напряжений, создающей области высоких градиентов

тектонических напряжений [13–16]. Учет этих факторов должен быть включен в прогнозирование и оценку устойчивости породного массива.

Выводы

Из результатов анализа опыта проведения геомеханических исследований и построения моделей для оценки устойчивости породных массивов можно сделать следующие выводы:

1. Геомеханические исследования играют принципиально важную роль в обеспечении безопасности при эксплуатации подземного сооружения. Современная концепция геомеханических исследований включает в себя следующие компоненты:

- выбор контролируемых параметров;
- разработку математических моделей НДС;
- оценку и прогноз устойчивости породного массива.

2. Необходимым условием решения этой задачи является обеспечение максимальной достоверности оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, которая может быть повышена: а) путем учета влияния структурных элементов породного массива; б) использования геомеханических 3D-моделей.

Существующие методические подходы и современные программно-аппаратные средства создания 3D-моделей позволяют объединять огромные массивы разнородных данных, в том числе физико-механических параметров, в результате чего появляется возможность трехмерного моделирования распределения полей напряжений и параметров, характеризующих устойчивость пород. Программный комплекс инженерного анализа методом конечных элементов (COMSOL Multiphysics) предоставляет достаточно полный функциональный набор для инженерных расчетов.

Список литературы / References

1. Ляпин И.Н., Королев Д.О., Коровин И.Ю., Корнев А.Ю., Коваль М.Е., Попов А.А. Опыт применения геомеханического моделирования на этапе проектирования скважин. *Нефть. Газ. Новации*. 2019;(10):17–20.
Liapin I.N., Korolev D.O., Korovin I.Yu., Kornev A.Yu., Koval M.E., Popov A.A. Experience in application of geo-mechanical simulation at the stage of well designing. *Neft. Gaz. Novatsii*. 2019;(10):17–20. (In Russ.)
2. Павлов В.А., Поляков Д.А., Субботин М.Д., Меликов Р.Ф., Павлюков Н.А., Поспелова Т.А. К вопросу импортозамещения в геомеханическом моделировании. *Технологии нефти и газа*. 2019;(2):3–9.
Pavlov V.A., Polyakov D.A., Subbotin M.D., Melikov R.F., Pavlyukov N.A., Pospelova T.A. On the issue of import substitution in geomechanical modelling. *Oil and Gas Technologies*. 2019;(2):3–9. (In Russ.)
3. Хлопцова М.В. Задачи геомеханического моделирования при разработке месторождений и эксплуатаций. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(4):107–116. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/107_116_4_2017.pdf (дата обращения: 09.01.2024).
Khloptsova M.V. Problems of geomechanical modeling in mineral mining and underground storage operation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(4):107–116. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/4/107_116_4_2017.pdf (accessed: 09.01.2024).
4. Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринов В.Н. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике. *Физика Земли*. 2019;(1):42–60. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>
Gvishiani A.D., Kaftan V.I., Krasnoperov R.I., Tatarinov V.N., Vavilin E.V. Geoinformatics and systems analysis in geophysics and geodynamics. *Fizika Zemli*. 2019;(1):42–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>
5. Гвишиани А.Д., Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Лосев И.О., Маневич А.И. ГИС-ориентированная база данных для системного анализа и прогноза геодинамической устойчивости Нижне-Канского массива. *Исследования Земли из космоса*. 2021;(1):53–66. <https://doi.org/10.31857/S020596142101005X>
Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Losev I.V., Manevich A.I. Gis-oriented database for the system analysis and prediction of the geodynamic stability of the Nizhne-Kansky massif. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(9):1151–1161. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090486>
6. Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринов В.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния и геодинамическое районирование в сейсмически активных районах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(8):123–132. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-123-132>
Morozov V.N., Manevitch A.I., Tatarinov V.N. Stress state modeling and geodynamic zoning in seismically active regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(8):123–132. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-8-0-123-132>
7. Manevich A.I., Kolikov K.S., Egorova E.A., Geoecological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). *Russian Journal of Earth Science*. 2019;(19):ES4002. <https://doi.org/10.2205/2019ES000663>

8. Коваленко А.А., Захаров Н.Е., Пул Е.К., Золотин В.Г. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубки «Интернациональная». *Горный журнал*. 2019;(2):27–31. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.05>
Kovalenko A.A., Zakharov N.E., Pul E.K., Zolotin V.G. Geomechanical aspects of the Internatsionalnaya kimberlite pipe mining. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(2):27–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.05>
9. Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Иране (26 декабря 2003 г. Mw = 6.6). *Физика Земли*. 2018;(4):68–78. <https://doi.org/10.1134/S0002333718040087>
Morozov V.N., Tatarinov V.N., Kolesnikov I.Y., Manevich A.I. Modeling the stress-strain state in the epicentral zone of a strong earthquake in Iran (December 26, 2003, Mw = 6.6). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2018;54(4):602–611. <https://doi.org/10.1134/S1069351318040080>
10. Акматов Д.Ж., Евлоев Х.Ю., Меллер А.Д., Манукян Т.А., Чадин В.Н. Методика численного моделирования полей напряжений в районе размещения угольных шахт. *Горная промышленность*. 2023;(1):39–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>
Akmatov D.Zh., Evloev H.Y., Meller A.D., Manukyan T.A., Chadin V.N. Methodology for numerical modeling of stress fields in vicinities of coal mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):39–44. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-39-44>
11. Акматов Д.Ж., Кулешов А.М., Чадин В.Н. Богачук А.Г., Колесников К.А. Анализ напряженно-деформированного состояния моделей разрывных нарушений. *Горная промышленность*. 2023;(5):119–123. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-119-123>
Akmatov D.J., Kuleshov A.M., Chadin V.N., Bogachuk A.G., Kolesnikov K.A. Stress-strain state of fault models analysis. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):119–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-119-123>
12. Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Морозов О.А. Трёхмерная структурно-тектоническая модель участка «Енисейский» (Нижнеканский массив). *Горный журнал*. 2023;(1):69–74. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.11>
Akmatov D.Zh., Manevich A.I., Tatarinov V.N., Shevchuk R.V. 3D structure tectonics model of Yenisei site of the Nizhnekansk Massif. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):69–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.11>
13. Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect. *Eurasian Mining*. 2019;(2):19–22. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.04>
14. Тарасов Б.Г. Веерный механизм динамических трещин сдвига как источник парадоксов прочности и хрупкости горных пород. *Горный журнал*. 2020;(1):18–23. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.03>
Tarasov B.G. Fan mechanism of dynamic shear fractures as a source of strength and brittleness paradoxes in rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.03>
15. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание. *Горный журнал*. 2020;(1):42–48. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.08>
Biryuchev I.V., Makarov A.B., Usov A.A. Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):42–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.08>
16. Сьедина С.А., Балтиева А.А., Шамганова Л.С. Разработка 3D геомеханических моделей для подземных рудников и карьеров. *Проблемы недропользования*. 2018;(1):60–65. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.060>
Syedina S.A., Baltiyeva A.A., Shamganova L.S. Development of 3D geomechanical models for underground mines and open pits. *Problems of Subsoil Use*. 2018;(1):60–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.060>

Информация об авторах

Акматов Дастан Женишбекович – младший научный сотрудник, Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dastan.akmatov.1994@mail.ru

Шевчук Роман Васильевич – младший научный сотрудник, Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: shevchuk.002@mail.ru

Тухель Екатерина Андреевна – кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: tukhel.ea@misis.ru

Николайчук Виктор Вадимович – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Nikovitek@gmail.com

Галиева Рита Ришатовна – аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Институт технологий НИТУ МИСИС г. Москва, Российская Федерация; e-mail: jebulcan@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.11.2023

Поступила после рецензирования: 26.12.2023

Принята к публикации: 10.01.2024

Information about the authors

Dastan Zh. Akmatov – Junior Researcher, Geophysical Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying, Mining Institute of NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: dastan.akmatov.1994@mail.ru

Roman V. Shevchuk – Junior Researcher, Geophysical Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying, Mining Institute of NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: shevchuk.002@mail.ru

Ekaterina A. Tichel – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Geology and Surveying at the Mining Institute of NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: tukhel.ea@misis.ru

Viktor V. Nikolaichuk – Postgraduate Student of the Department of Geology and Surveying, Mining Institute of NUST MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Nikovitek@gmail.com

Rita R. Galieva – Postgraduate Student of the Department of Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies Institute of Technologies of NUST MISIS; Moscow, Russian Federation; e-mail: jebulcan@gmail.com

Article info

Received: 29.11.2023

Revised: 26.12.2023

Accepted: 10.01.2024