



Выявление особенностей распределения напряженно-деформированного состояния массива при вариации контактной жесткости разлома

С.В. Дмитриев✉, И.Э. Семенова

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ s.dmitriev@ksc.ru

Резюме: Для увеличения адекватности результатов моделирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород требуется учет не только прочностных характеристик вмещающего массива, но и сдвиговой составляющей. Сдвиг по структурным неоднородностям в нарушенном массиве представляет собой относительные смещения разномодульных блоков друг относительно друга. В рамках конечно-элементного анализа геологических структур возможно применение особых контактных элементов, позволяющих учитывать прочностные параметры интерфейса между блоками.

Основной задачей представленных исследований являлась оценка изменений параметров поля напряжений участка массива горных пород как во вмещающем массиве, так и в разломной структуре при внедрении контактных элементов в плоскости данной структурной неоднородности. С использованием созданной модели участка месторождения в окрестности разломной структуры проведен ряд численных экспериментов, позволяющих оценить эффект введения контактных элементов на границе структурной неоднородности при варьировании значений нормальной и тангенциальной жесткости. На основании результатов данной работы можно выделить те классы моделей, в которых внедрение контактных элементов по поверхности контакта разлома на конкретном масштабном уровне даёт ощутимый эффект, и отсесть те случаи, когда вполне достаточно будет воспользоваться эквивалентным замещающим материалом разлома.

Ключевые слова: численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, неоднородность, метод конечных элементов, контактный элемент, разломная структура

Для цитирования: Дмитриев С.В., Семенова И.Э. Выявление особенностей распределения напряженно-деформированного состояния массива при вариации контактной жесткости разлома. *Горная промышленность*. 2023;(S1):110–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-110-115>

Identification of specific features in distribution of the stress-and-strain state of a rock mass with variation in the contact stiffness of fault

S.V. Dmitriev✉, I.E. Semenova

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ s.dmitriev@ksc.ru

Abstract: In order to enhance the adequacy of the stress-and-strain modelling results in rock masses, it is necessary to consider not only the strength properties of the host rock mass, but also the shear component. A shear along the structural inhomogeneities in the disturbed rock mass is a relative displacement of blocks of various modules relative to each other. In the finite element analysis of geological structures, it is possible to apply special contact elements to account for the strength parameters of the interface between the blocks.

The main purpose of presented research was to estimate the stress field changes of a rock mass, both in the host rock mass and in the fault structure, when introducing the contacting elements in the plane of the given structural inhomogeneity. A number of numerical experiments have been carried out using the created model of the field section in vicinity of the fault structure to assess the effect of introducing the contact elements at the boundary of the structural inhomogeneity with variation of the normal and tangential stiffness. Based on the results of this work, it is possible to identify those model classes in which introduction of the contact elements along the fault contact surface at a particular scale level produces a tangible effect as well as to screen out those cases where using an equivalent fault substitute material would be sufficient.

Keywords: numerical modelling, stress-and-strain state, inhomogeneity, finite element method, contact element, fault structure

For citation: Dmitriev S.V., Semenova I.E. Identification of specific features in distribution of the stress-and-strain state of a rock mass with variation in the contact stiffness of fault. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):110–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-110-115>



Введение

Высокая степень неоднородности Хибинского массива накладывает дополнительные требования к прогнозируемому моделированию напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождений, особенно в условиях действия высоких тектонических напряжений.

Влияние крупных региональных разломов может быть учтено с помощью использования композитного замещающего материала, характеризующегося сниженными прочностными характеристиками. Такое представление дает достаточную достоверность моделирования на масштабном уровне месторождения. При более детальном моделировании, например, при изучении отдельного блока месторождения желательнее учитывать контактные характеристики на границе блоков.

Моделирование объемного напряженно-деформированного состояния с учетом неоднородностей возможно в следующих программных продуктах: ANSYS, Fidesys, Salome (CodeAster) и других. В настоящее время проведена модернизация программного комплекса Sigma GT [1; 2] с дополнением математического аппарата контактными элементами, позволяющими моделировать напряженно-деформированное состояние массива с учетом нарушений его сплошности. Учет влияния межблоковых интерфейсов в методе конечных элементов возможен с использованием предложенных Р. Гудманом [3] контактных элементов и их модификаций. Данные элементы характеризуются нормальной и тангенциальной жесткостью. Для выявления целесообразности использования контактных элементов при различных горно-геологических условиях оценивали влияние значений контактных характеристик разлома на изменение параметров поля напряжений участка массива горных пород, включающего разломную структуру.

Построение вариантов для численного моделирования

В качестве исходного напряженно-деформированного состояния было принято расчетное распределение для участка месторождения Кукисвумчорр в Хибинском тектонически напряженном массиве, полученное с учетом многолетних натурных исследований параметров НДС. Тектонические напряжения в массиве увеличиваются с глубиной. Отношение максимальной компонентой главных напряжений к средней составляет 0.6. Минимальная компонента соответствует гравитационной составляющей (рис. 1).

Для большей детализации расчетов сгенерирована уточненная модель с разломной структурой одного из блоков месторождения. Для данной процедуры в программном комплексе реализовали функционал, позволяющий вырезать отдельные участки модели с одновременным уплотнением сетки конечных элементов, сохраняя соответствие граничных условий между исходной и уплотненной моделью¹.

Деформационные характеристики для разломной структуры и вмещающего массива представлены в табл. 1.

Влияние крупных региональных разломов в рамках численного моделирования может быть учтено с помощью использования композитного замещающего материала, характеризующегося сниженными прочностными (деформационными) характеристиками. Такое представле-

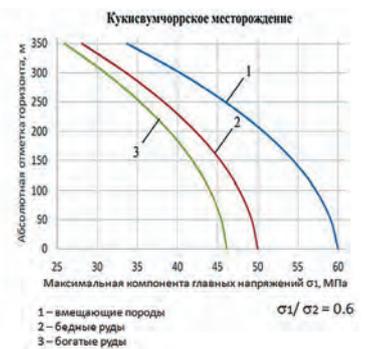
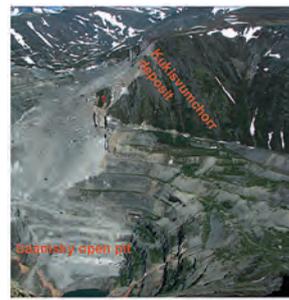


Рис. 1
Объект исследования с расчетным распределением значений компонент напряженно-деформированного состояния

Fig. 1
The survey object with the calculated distribution of the stress-and-strain component values

Таблица 1
Деформационные характеристики для разломной структуры и вмещающего массива

Table 1
Deformation properties of the fault structure and the host rock mass

Тип элемента	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Вмещающий массив	70	0.2
Рудное тело	40	0.35
Разломная структура	7	0.3

ние дает достаточную достоверность моделирования на уровне модели месторождения. При более детальном моделировании, например, при изучении отдельного блока месторождения необходимо учитывать контактные характеристики на границе блоков.

Трехмерная модификация контактного элемента является обобщением двумерного контактного элемента на объемный случай [4]. Изначально имеет нулевую толщину и координаты пар его узлов идентичны. Обладает сравнительно большой нормальной жесткостью k_n и низкой тангенциальной k_s . Они позволяют моделировать деформации, проходящие на поверхности структурной неоднородности, и получать более адекватные результаты моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

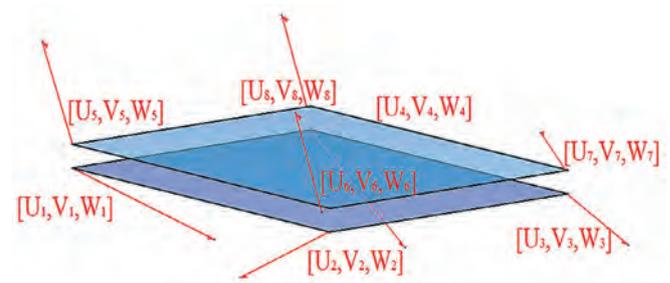


Рис. 2
Обобщенный вид объемного контактного элемента

Fig. 2
A generalized view of a volumetric contact element

¹ Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022664884, 05.08.2022. Заявка № 2022664225 от 21.07.2022.

Трёхмерный контактный элемент является обобщением линейного контактного элемента Гудмана на трёхмерный вид. Для интегрирования использовали функции формы объёмного элемента. Сам контактный элемент рассматривали в локальных координатах в виде восьмиузловой пластины (рис. 2).

На основе проанализированных источников [5–12] был принят диапазон значений контактных характеристик для разломной структуры разрабатываемой модели (табл. 2).

Ввиду относительно равномерного поля напряжений вблизи разлома в реальной модели месторождения было принято решение о создании дополнительной серии численных экспериментов. В них разломная структура характеризуется более низкими деформационными характери-

стиками, в частности, модулем Юнга (рис. 3). Это должно было дать более полное представление о влиянии параметров контактных элементов на поле НДС вблизи разлома.

Результаты численных экспериментов

Для оценки абсолютных значений главных напряжений были выбраны равноудалённые от разлома участки массива. Всего было сгенерировано 12 численных моделей с вариацией нормальной и тангенциальной жесткостей (рис. 4). Наиболее показательными являются варианты, в которых относительные значения главных напряжений близки к единице как во вмещающем массиве, так и в самой разломной структуре.

В случае когда заполняющий материал разлома близок по свойствам к вмещающему массиву (1-й этап), внедрение контактных элементов по её поверхности оказало большее влияние на напряженно-деформированное состояние вмещающего массива. Значения максимальной компоненты напряжений в самой структуре при внедрении контактных элементов по её поверхности подвергаются более существенным изменениям.

При внедрении контактных элементов по поверхности разломной структуры, представленной более ослабленными породами (2-й этап), ранжирование нормальной и тангенциальной жесткостей, даже в пределах двух порядков, не оказывает существенного влияния на НДС вмещающего массива.

Исходя из анализа графиков и табличных значений были выбраны две серии численных экспериментов, дающих наиболее контрастные картины полей напряжений. При более низких значениях нормальной и тангенциальной жесткости деформации по контакту структуры уве-

Таблица 2
Значения нормальной и тангенциальной жесткостей для серий численных экспериментов

1-й этап			2-й этап (дополнительная серия)		
Модуль Юнга, 7000 МПа			Модуль Юнга, 700 МПа		
Номер модели	k_n , МПа/м	k_s , МПа/м	Номер модели	k_n , МПа/м	k_s , МПа/м
1	0.7e6	0.35e6	1	0.7e6	0.35e6
2	0.2e6	0.1e6	2	0.2e6	0.1e6
3	0.7e5	0.35e5	3	0.7e5	0.35e5
4	0.2e5	0.1e5	4	0.2e5	0.1e5
5	0.7e4	0.35e4	5	0.7e4	0.35e4
6	0.2e4	0.1e4	6	0.2e4	0.1e4

Table 2
Values of the normal and tangential stiffness for the series of numerical experiments

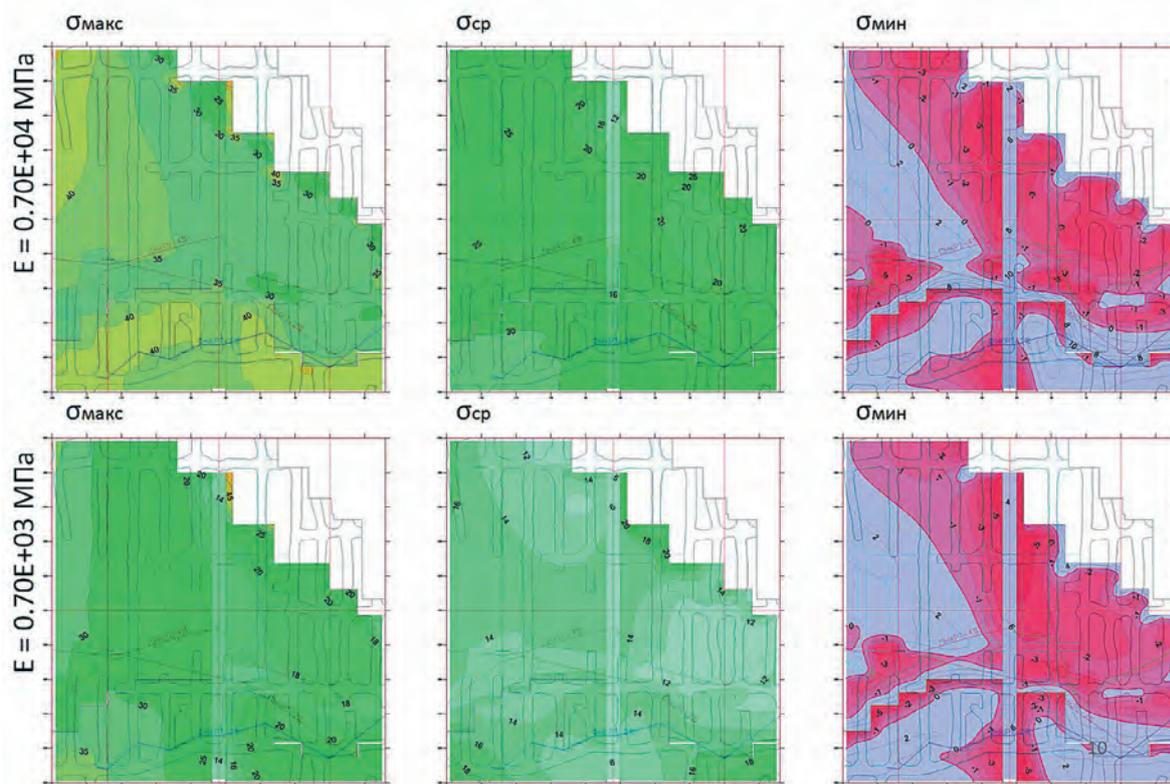


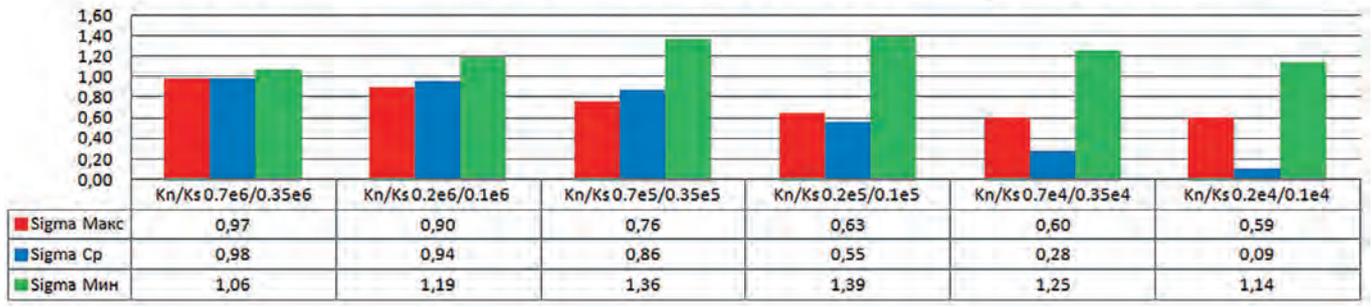
Рис. 3
Компоненты исходного тензора напряжений моделей первого и второго этапов

Fig. 3
Components of the initial stress tensor of the first and second stage models



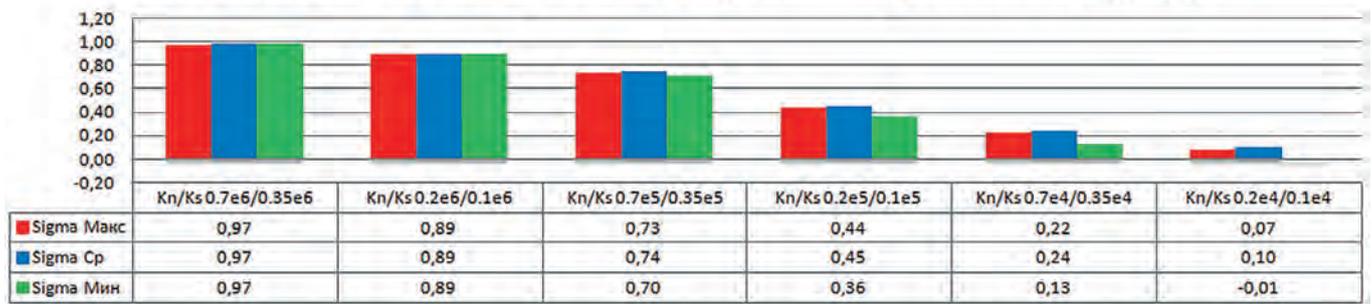
1 этап.

Относительные значения главных напряжений во вмещающем массиве



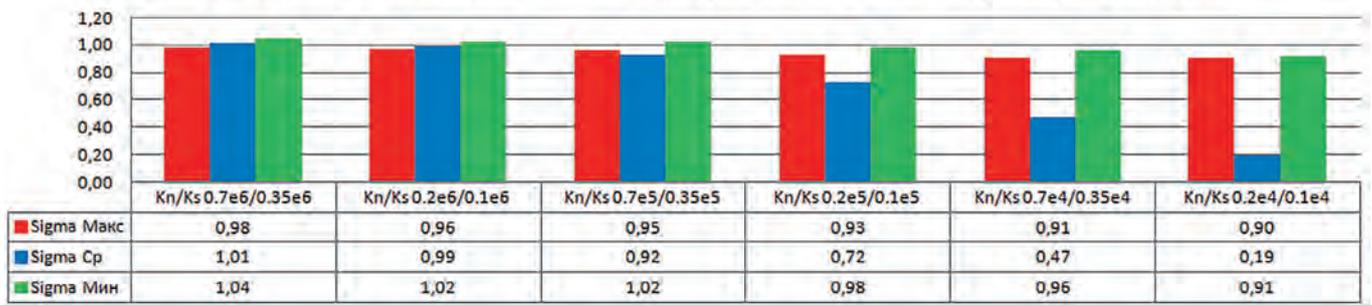
1 этап.

Относительные значения главных напряжений в разломной структуре



2 этап.

Относительные значения главных напряжений во вмещающем массиве



2 этап.

Относительные значения главных напряжений в разломной структуре

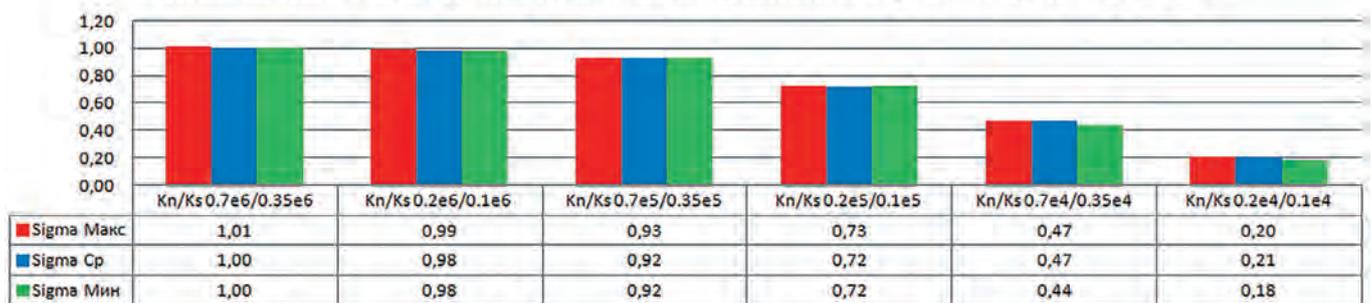


Рис. 4
Табличные результаты моделирования первого и второго этапов

Fig. 4
Tabular results of the first and second stage modelling

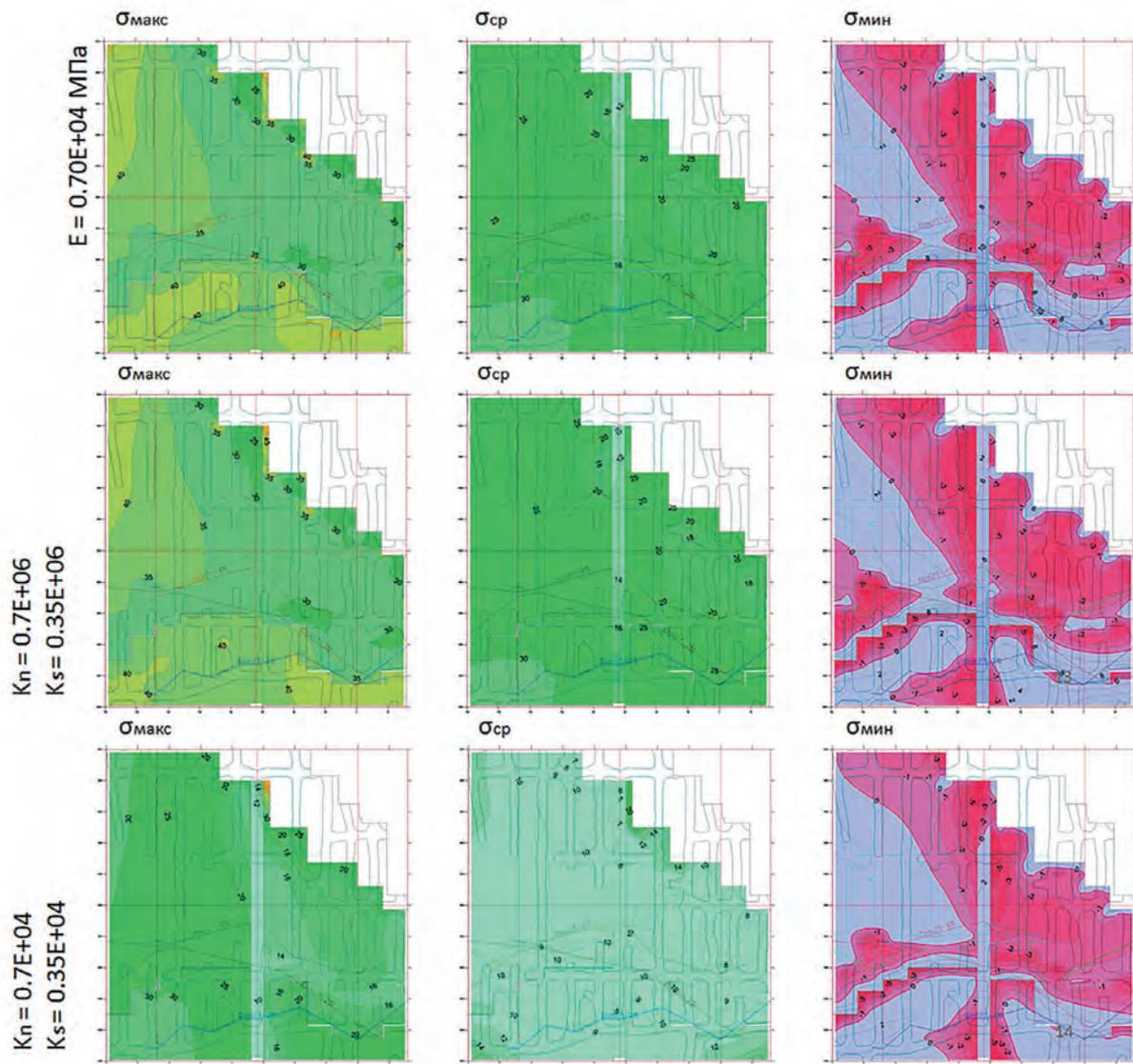


Рис. 5
Распределение полей компонент главных напряжений моделей с различными параметрами жесткости разлома (1-й этап)

Fig. 5
Distribution of the principal stress component fields for models with different fault stiffness parameters (Stage 1)

личились, что привело к более существенному изменению полей напряжений в окрестности разлома (рис. 5).

Заключение

Анализ результатов расчетов двенадцати вариантов контактных жесткостей и деформационных характеристик блоков показал:

- В случае, когда заполняющий материал разломной структуры близок по свойствам к вмещающему массиву, внедрение контактных элементов по её поверхности оказывает больший эффект на поле напряжений в самом массиве.
- При внедрении контактных элементов по поверхности разломной структуры, представленной более ослабленными породами, ранжирование нормальной и тангенциальной жесткостей (даже в пределах двух порядков) не оказывает особого влияния на поле напряжений вмещающего массива.

- Значения компоненты напряжений, вектора которой близки к простиранию самой разломной структуры, при внедрении контактных элементов по её поверхности подвергаются более существенным изменениям. Данный эффект становится менее заметным при снижении прочностных характеристик разломной структуры.

Наиболее эффективным является учет контактных характеристик при моделировании НДС в окрестности структурной неоднородности с деформационными свойствами, близкими к вмещающему массиву. Если же свойства разломной структуры отличаются от вмещающего массива на порядок и более, то изменения НДС при включении контакт-элементов не превышают 10%. То есть в этом случае моделирование контакт-элементов на границах разнородных сред не является обязательным условием корректности расчетов.

Список литературы

1. Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А. Трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на рудниках ОАО «Апатит». В кн.: *Геодинамика и напряженное состояние недр земли: сб. науч. тр.* Новосибирск: ИГД СО РАН; 2008. С. 272–278.



2. Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: труды Всерос. науч. конф. с междунар. участием, г. Апатиты, 23–26 сент. 2008 г.* СПб.: Реноме; 2009. С. 251–256.
3. Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L. A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1968;94(3):637–660. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001133>
4. Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Шестов А.А. Численное моделирование неоднородностей в трехмерной постановке метода конечных элементов. *Горный журнал*. 2020;(12):35–39. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.12.07>
5. Barton N. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. London, UK: CRC Press; 2006. <https://doi.org/10.1201/9780203964453>
6. Shen B., Barton N. Rock fracturing mechanisms around underground openings. *Geomechanics and Engineering*. 2018;16(1):35–47. <https://doi.org/10.12989/GAE.2018.16.1.035>
7. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба. *Физическая мезомеханика*. 2002;5(5):23–42. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2002-00034>
8. Кочарян Г.Г. *Геомеханика разломов*. М.: ГЕОС; 2016. 424 с.
9. Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1956;23(9):805–823. <https://doi.org/10.2514/8.3664>
10. Юфин С.А., Ламонина Е.В. Анализ напряженно-деформированного состояния трещиноватых скальных пород с использованием численных методов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(10):268–277. https://giab-online.ru/files/Data/2008/10/6_YUfin4.pdf
11. Li J. *Numerical Simulation of Interfaces in Geomaterials: Development of a New Zero-thickness Interface Element*. University of Delaware; 1993. 154 p.
12. Shahverdiloo M.R., Zare S. Studying the normal stress influential factor on rock joint stiffness using CNL direct shear test. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14(20):2082. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08449-6>

References

1. Kozыrev A.A., Semenova I.E., Shestov A.A. 3D modeling of the stress-and-strain state of the rock mass as a basis for predicting the rock-bump hazard in underground mines of the Apatite JSC. In: *Geodynamics and the stressed state of the Earth's subsoil: a collection of scientific papers* Novosibirsk: Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2008, pp. 272–278. (In Russ.)
2. Kozыrev A.A., Semenova I.E., Shestov A.A. Numerical modeling of the stress-strain state of the rock mass as a basis for predicting the rock-bump hazard at different stages of field development. In: Melnikov N.N. (ed.) *Computer technologies in designing and planning of mining operations: Proceedings of the All-Russian Research Conference with international participation, Apatity, September 23–26, 2008*. St. Petersburg: Renome; 2009, pp. 251–256.
3. Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L. A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1968;94(3):637–660. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001133>
4. Semenova I.E., Dmitriev S.V., Shestov A.A. 2020 3D finite element-based modeling of discontinuities. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(12):35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.12.07>
5. Barton N. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. London, UK: CRC Press; 2006. <https://doi.org/10.1201/9780203964453>
6. Shen B., Barton N. Rock fracturing mechanisms around underground openings. *Geomechanics and Engineering*. 2018;16(1):35–47. <https://doi.org/10.12989/GAE.2018.16.1.035>
7. Kostyuchenko V.N., Kocharyan G.G., Pavlov D.V. Strain properties of the inter-block gaps of different sizes. *Physical Mesomechanics Journal*. 2002;5(5):23–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2002-00034>
8. Kocharyan G.G. *Fault geomechanics*. Moscow: GEOS; 2016. 424 p. (In Russ.)
9. Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1956;23(9):805–823. <https://doi.org/10.2514/8.3664>
10. Yufin S.A., Lamoina E.V. Analysis of the stress-and-strain state of fractured rocks using numerical methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(10):268–277. (In Russ.) https://giab-online.ru/files/Data/2008/10/6_YUfin4.pdf
11. Li J. *Numerical Simulation of Interfaces in Geomaterials: Development of a New Zero-thickness Interface Element*. University of Delaware; 1993. 154 p.
12. Shahverdiloo M.R., Zare S. Studying the normal stress influential factor on rock joint stiffness using CNL direct shear test. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14(20):2082. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08449-6>

Информация об авторах

Дмитриев Сергей Владимирович – научный сотрудник лаборатории прогноза удароопасности рудных месторождений, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: s.dmitriev@ksc.ru

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, зав. лабораторией прогноза удароопасности рудных месторождений, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: i.semenova@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.02.2023

Поступила после рецензирования: 15.03.2023

Принята к публикации: 21.03.2023

Information about the authors

Sergey V. Dmitriev – Research Associate, Sector of Prediction of rock burst hazard of rock deposits, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: s.dmitriev@ksc.ru

Inna E. Semenova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Prediction of rock burst hazard of rock deposits, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: i.semenova@ksc.ru

Article info

Received: 23.02.2023

Revised: 15.03.2023

Accepted: 21.03.2023