ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(9):25-39
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.281.74 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-25-39

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АНКЕРНОЙ КРЕПИ ПОДВЕСНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ С МАССИВОМ ГОРНЫХ ПОРОД

Д.И. Блохин[1], И.М. Закоршменный[1], С.С. Кубрин[1], И.Л. Харитонов[2], М.Л. Холмянский[3]

[1] Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия, e-mail: dblokhin@yandex.ru
[2] АО «СУЭК-Кузбасс», Ленинск-Кузнецкий, Россия
[3] НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»», Москва, Россия

Аннотация: В связи с повсеместной интенсификацией горных работ существенно возрастает и нагрузка на вспомогательный транспорт, заметной составляющей которого на современных горнодобывающих предприятиях являются подвесные монорельсовые дороги. Для подвески монорельсовых дорог, в том числе и в сложных горно-геологических условиях шахт Кузбасса, в настоящее время широко применяется анкерная крепь. Однако вопросы, связанные с разработкой геомеханического обеспечения технологических решений анкерного крепления подвесных монорельсовых дорог, на сегодняшний день остаются недостаточно изученными. Поэтому исследования протекания геомеханических процессов в углепородных массивах, обусловленных воздействием подвижного состава на анкерную крепь, задачи обеспечения устойчивости системы «анкерная крепь — породный массив» несомненно, являются актуальными и практически значимыми. В представленной статье описывается расчетная модель взаимодействия анкерной крепи подвесной монорельсовой дороги с породным массивом для различных уровней нагружения. Для условий шахты им. В.Д. Ялевского АО «СУЭК-Кузбасс» проведено математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния системы «анкерная крепь — породный массив». На основе результатов моделирования обоснована возможность оценки параметров устойчивости оснований анкерной крепи при действии нагрузки от подвесных монорельсовых дорог.

Ключевые слова: горные выработки, массив горных пород, подвесная монорельсовая дорога, анкерная крепь, напряжения, деформации, устойчивость.

Для цитирования: *Блохин Д.И., Закоршменный И.М., Кубрин С.С., Харитонов И.Л., Холмянский М.Л.* Моделирование взаимодействия анкерной крепи подвесной монорельсовой дороги с массивом горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 25–39. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-25-39.

Modeling interaction of suspended monorail rock bolt support and rock mass

D.I. Blokhin[1], I.M. Zakorshmennyi[1], S.S. Kubrin[1], I.L. Kharitonov[2], M.L. Kholmyansky[3]

[1] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dblokhin@yandex.ru
[2] JSK «SUEK-Kuzbass, Leninsk-Kuznetskiy, Russia
[3] Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russia

© Д.И. Блохин, И.М. Закоршменный, С.С. Кубрин, И.Л. Харитонов, М.Л. Холмянский. 2020.

Abstract: In view of crossover intensification in mining, activity of auxiliary transportation also grows, and an appreciable percentage in this respect belongs to the suspended monorail transport in modern mines. Suspended monorail systems widely use rock bolt support, in complex geological conditions of underground mining in Kuzbass equally. In the meanwhile, geomechanical validation of engineering solutions on rock bolt design for the suspended monorail transportation yet remains deficient. For this reason, investigation of geomechanical processes caused in coal-and-rock mass by interaction between monorail rolling stock and rock bolting is of relevance and practical significance. This article describes the design model of interaction between the suspended monorail rock bolt support and rock mass at different load levels. A case-study of the Yalevsky Mine of SUEK-Kuzbass presents the mathematical modeling of the stress–strain behavior of the rock bolt–rock mass system. The modeling results prove estimability of rock bolt support stability under the action of load from the suspended monorail transport.

Key words: underground opening, rock mass, suspended monorail, rock bolt support, stresses, strains, stability.

For citation: Blokhin D. I., Zakorshmennyi I. M., Kubrin S. S., Kharitonov I. L., Kholmyansky M. L. Modeling interaction of suspended monorail rock bolt support and rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(9):25-39. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-25-39.

Введение

Рост энерговооруженности и надежности применяемой техники на современных горнодобывающих предприятиях привел к интенсификации горных работ, что в свою очередь существенно повлияло на объемы вспомогательных операций по транспортировке материалов оборудования и работников [1–3]. В связи с этим, одной из актуальных задач при подземной разработке угольных пластов является обеспечение устойчивости транспортных выработок [2, 4].

Одним из широко используемых на угольных шахтах видов вспомогательного транспорта являются подвесные монорельсовые дороги [2]. Для подвески монорельсовых дорог, в том числе и в сложных горно-геологических условиях шахт Кузбасса, в настоящее время широко применяется анкерная крепь [2, 5].

Исследования функционального состояния выработок, оборудованных подвесными монорельсовыми дорогами с креплением анкерной крепью, показывают, что максимальные искривления профиля трассы приурочены к зонам активного расслоения пород кровли [2, 4, 6]. Нагрузки, передаваемые анкерной крепи, при прохождении подвижного состава провоцируют расслоение пород кровли и могут служить причиной их сдвижения, искривляя при этом профиль монорельса [2, 7]. Подобные ситуации могут привести к превышению допустимого угла наклона на стыках секций монорельсового пути и сходу подвижного состава и, соответственно, являются угрозой для обслуживающего персонала. Используемые же на практике методики расчета параметров анкерной крепи не в полной мере учитывают особенности взаимодействия крепления подвесных монорельсовых дорог с породным массивом.

Тем самым подтверждается необходимость анализа напряженно-деформированного состояния системы «анкерная крепь — породный массив» и разработки расчетных моделей, позволяющих производить количественную оценку параметров устойчивости транспортных выработок с подвесными монорельсовыми дорогами.

Одним из общепринятых подходов к оценке изменений напряженно-деформированного состояния породного массива уже давно являются методы численного моделирования, основанные на использовании нелинейных моделей механики сплошных сред [8, 9]. В частности, указанные подходы реализованы в разработанном фирмой Plaxis BV (г. Делфт, Нидерланды) программном комплексе PLAXIS [10].

В настоящее время накоплен большой опыт эффективного использования указанного программного комплекса для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в сложных горно-геологических условиях и расчетов влияния этих изменений на состояние подземных сооружений. При этом отмечается высокая степень совпадения результатов прогнозных расчетов и данных натурного инструментального мониторинга [11—17]. Средства PLAXIS позволяют определить степень надежности геотехнической системы вычислением коэффициента устойчивости.

В предлагаемой работе проводится математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния системы «анкерная крепь — породный массив» при движении ходовых тележек с подвешенным к ним грузом (дизелевоз, специализированные контейнеры, вагонетки для перевозки людей и т.д.). Рассматривается прямоугольная горная выработка. Крепление монорельса осуществляется с помощью анкеров в кровле выработки.

В модельных расчетах рассматривается последовательность этапов жизненного цикла выработки от природного напряженного состояния до устройства монорельсовой дороги и передачи нагрузки на анкеры. По результатам моделирования планируется получить картину изменения напряженно-деформированного состояния массива и характер его возможного разрушения от передачи значительной нагрузки на анкеры.

Конструкция выработки и геомеханические свойства породного массива задаются исходя из данных, полученных на шахте им. В.Д. Ялевского АО «СУЭК-Кузбасс», и описываются ниже.

Описание расчетной модели

В настоящей работе для описания поведения геоматериалов используются нелинейные упругопластические модели — модель Мора-Кулона и модель трещиноватого массива горных пород.

Хорошо известная модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb) может рассматриваться как приближение первого порядка по отношению к реальному поведению геоматериалов. Эта упругопластическая модель требует знания пяти основных входных параметров, а именно, модуля Юнга E, коэффициента Пуассона ν, удельного сцепления c, угла внутреннего трения φ и угла дилатансии ψ.

Модель трещиноватого массива горных пород (Jointed Rock) — анизотропная упругопластическая модель. Предполагается, что есть ненарушенная порода с возможным направлением расслоения, которая считается трансверсально анизотропной. Анизотропия является весьма характерной особенностью горных пород [16]. Широко используемая для горных пород модель Хоека-Брауна не учитывает этого свойства массива [10]. При приложении нагрузки вдоль направления трещин предполагается, что касательные напряжения ограничены в соответствии с условием Кулона. По достижении максимального значения для напряжения сдвига в таком направлении происходит пластическое скольжение. Одна из плоскостей скольжения совпадает с направлением упругой анизотропии. Каждая плоскость может иметь различную прочность на сдвиг. В до-

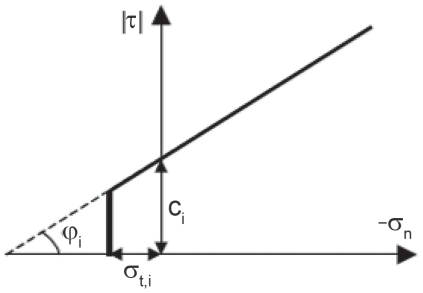

Рис. 1. Критерий текучести для i-й плоскости скольжения: c_i — удельное сцепление; φ_i — угол внутреннего трения; $\sigma_{t,i}$ — предел прочности на растяжение; σ_n, τ — нормальное и касательное напряжение на плоскости

Fig. 1. Yielding criterion for an i-th slickenside: c_i — specific cohesion; φ_i — internal friction angle; $\sigma_{t,i}$ — ultimate tensile strength; σ_n, τ — normal and shear stresses on slickenside

полнение к пластическому сдвигу ограничиваются и растягивающие напряжения (в соответствии с пределом прочности на растяжение). Критерий текучести для одной из плоскостей скольжения показан на рис. 1.

Программный комплекс Plaxis может быть использован для выполнения двумерных конечноэлементных расчетов как в модели плоской деформации, так и в осесимметричной модели. Программа позволяет моделировать геомеханические процессы, возникающие в массивах горных пород при обустройстве и эксплуатации подземных выработок, путем включения и выключения групп конечных элементов.

Анкер (свободная часть) моделируется конечным элементом [10], задающим осевую жесткость E^*A (где E — модуль Юнга материала анкера, а A — площадь его сечения. Контактирующая с горным массивом часть анкера моделируется конечными элементами — гибкими упругими элементами, также характеризуемыми осевыми жесткостями E^*A, задаваемыми из расчета на единицу ширины (в поперечном направлении) [10]. Прочность стержня анкера предполагается обеспеченной.

При расчетах общей и местной устойчивости методом конечных элементов с применением упругопластических моделей геоматериалов и процедуры снижения прочностных характеристик по п. 11.2.8 СП «Сооружения подземные. Правила проектирования» [18] находится коэффициент устойчивости K_{st}:

- параметры сдвигового сопротивления геоматериала (удельное сцепление и тангенс угла внутреннего трения) уменьшаются в K_{st} раз;
- принимается максимальное значение K_{st}, при котором не возникает предельное состояние, характеризующееся неустойчивым развитием перемещений.

Теоретические основы используемого подхода изложены в работе [11].

Высота выработки — 4,0 м; ширина — 5,2 м. Выработка пройдена по угольному пласту по всей толще. Выше и ниже — алевролиты.

Анкеры крепи имеют диаметр 20 мм и длину 2100 мм. Ампула — 1000 мм. Шаг вдоль выработки — 900 мм.

Анкеры подвеса имеют диаметр 20 мм и длину 3750 мм. Ампула — 1000 мм. Шаг вдоль выработки — 2000 мм.

Анкеры устанавливаются без натяжения.

Для применения метода конечных элементов расчетная область ограничивается сверху, снизу и сбоку. На нижней границе задаются условия отсутствия перемещений, на боковой границе — условия отсутствия горизонтальных перемещений и касательных нагрузок. Для верхней границы принято, что на выработку действует давление горных пород, соответствующее глубине 250 м.

Расчетная модель показана на рис. 2, *а* и 2, *б* (см. Приложение, с. 33) Сетка конечных элементов приводится на рис. 3 (см. Приложение, с. 34).

Принимается модель трещиноватого массива горных пород для алевролитов и модель Мора–Кулона для угля.

В расчетах берется следующая последовательность моделирования напряженно-деформированного состояния массива и взаимодействующих с ним конструкций:

Этап 1. Формируется начальное напряженное состояние массива, вызванное силами тяжести (с дополнительным приложением нагрузок, моделирующих пригруз от вышележащих пород);

Этап 2. Устраивается выработка (неподкрепленная);

Этап 3. Устраиваются анкеры крепи и монорельсовой дороги;

Этап 4. К анкерам монорельсовой дороги прикладывается нагрузка.

После каждого этапа изменения напряженно-деформированного состояния производится проверка общей и местной устойчивости основания с определением коэффициента устойчивости K_{st}.

Результаты

Для представления общего характера процессов деформирования массива и анкеров на рис. 4 (см. Приложение, с. 35) приводятся картины полных перемещений U после окончания этапов существования выработки. Здесь и далее результаты для 1-го этапа моделирования не приводятся, так как на этом этапе напряжения линейно нарастают с глубиной и интереса не представляют.

Далее показываются средние напряжения $p = 1/2(\sigma_x + \sigma_y)$ (рис. 5, см. Приложение, с. 36); девиаторы напряжения $q = |\sigma_x - \sigma_y|$ (рис. 6, см. Приложение, с. 37) и главные напряжения σ_1 и σ_2 (рис. 7, см. Приложение, с. 38) [19].

Перемещения анкеров подвесной монорельсовой дороги приводятся на рис. 8.

Механизмы потери устойчивости и коэффициенты запаса устойчивости определяются в ходе процедуры снижения прочностных характеристик после всех этапов (кроме начального этапа до устройства выемки) и приводятся на рис. 9 (см. Приложение, с. 39).

Обсуждение результатов

Общий характер изменения напряжений при устройстве анкеров меняется не очень значительно. В кровле и почве образуются приблизительно тре-

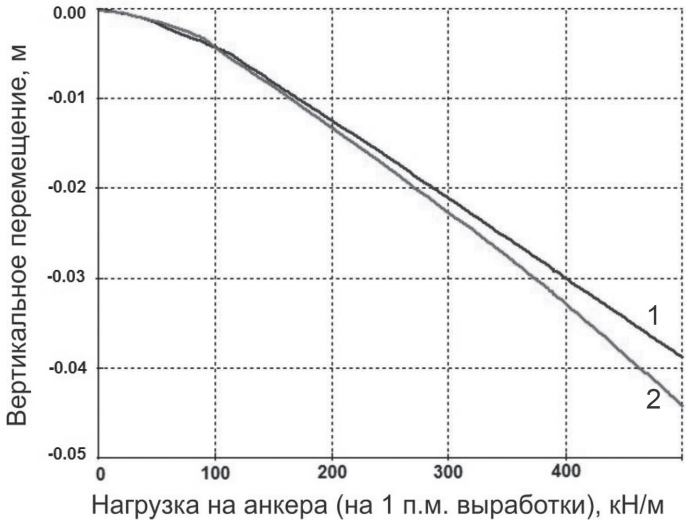

Рис. 8. Вертикальные перемещения анкеров подвесной монорельсовой дороги при приложении к ним нагрузки: левый — 1, правый — 2

Fig. 8. Vertical displacements of suspended monorail rock bolts under load application: lefthand — 1, righthand — 2

угольные области снижения напряжений.

Представляет интерес изменения механизмов разрушения массива. При отсутствии анкеров наблюдается в основном выпучивание боковых частей выработки. После их установки выпучивание перемещается в низ боковых частей выработки, где анкеры отсутствуют. Передача вертикальных нагрузок от анкеров подвесных монорельсовых дорог приводит к смене механизма разрушения: он приобретает характер вывала кровли.

Устойчивость при установке анкеров повышается не очень значительно: коэффициент K_{st} возрастает с 1,69 до 1,88. Приложение максимальной нагрузки снижает запас устойчивости практически до предела: K_{st} = 1,03.

Деформирование оснований анкеров показывает нелинейность. При максимальной приложенной погонной нагрузке 500 кН/м на каждый ряд направленные вниз перемещения анкеров составляют 38,6 мм (ближе к боковой части выработки) и 44,0 мм (ближе к центру выработки). Предельную нагрузку (несущую способность) можно оценить как 1,03×500 = 515 кН/м.

Приведенные значения значительно превосходят нагрузки на крепления монорельсового пути в реальных условиях, что свидетельствует о значительном запасе прочности указанной конструкции при ее выполнении в полном соответствии с установленными проектными и технологическими условиями.

Заключение

В результате проведенных исследований можно считать установленным, что математическое моделирование взаимодействия анкерной крепи подвесной монорельсовой дороги с массивом горных пород, выполненное на основе нелинейных упругопластических моделей геоматериалов, дает качественно верную картину процесса.

Представляется целесообразным в дальнейшем продолжить исследования, сопоставляя результаты математического моделирования и натурного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьев В. Б.* АО «СУЭК». Подземные горные работы, динамика развития // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № S48. — С. 13—22. DOI: 10.25018/0236-193-2018-11-48-13-22.

2. *Ширин Л. Н.*, *Расцветаев В. А.*, *Коваль А. И.* Повышение эффективности работы монорельсовых дорог при подготовке запасов угля к очистной выемке: монография. — Днепропетровск: НГУ, 2014. — 144 с.

3. *Пономарев В. С.*, *Кубрин С. С.* Вопросы обеспечения материалами и ресурсами производственных участков шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № S48. — С. 286—296. DOI: 10.25018/0236-193-2018-11-48-286-296.

4. *Качурин Н. М.*, *Ногих В. Р.* Взаимодействие подвесных транспортных устройств с породами и обеспечение безопасности и устойчивости горных выработок // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2015. — № 4. — С. 65—75.

5. *Инструкция* по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах России. — СПб.: ВНИМИ, 2000. — 70 с.

6. *Кузнецов Е. В.* Опыт эксплуатации подвесной монорельсовой дороги в условиях шахты ОАО «Разрез Сибиргинский» // Вестник КузГТУ. — 2005. — № 4. — С. 24—26.

7. *Ногих В. Р.* Исследования влияния анкеров и подвесных транспортных устройств в подземных выработках на деформации пород кровли / Современные тенденции и иннова-

ции в науке и производстве. Материалы IV международной научно-практической конференции. — Кемерово: КузГТУ, 2015. — С. 65—66.

8. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 544 с.

9. *Фадеев А. Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 221 с.

10. *Руководство* пользователя Plaxis 2D: Пер. с англ. — СПб.: НИП-Информатика, 2004. — 424 с.

11. *Brinkgreve R. B. J., Bakker H. L.* Non-linear finite element analysis of safety factors / Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Cairns, Australia, 1991, pp. 1117—1122.

12. *Прищепа Д. В.* Обоснование моделей напряженно-деформированного состояния трещиноватого породного массива // Проблемы недропользования. — 2017. — № 1. — С. 81—88. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.081.

13. *Zingano A., Weiss A.* Subsidence over room and pillar retreat mining in a low coal seam // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. No 1. Pp. 51—57. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.02.

14. *Radouane N., Boukelloul M., Fredj M.* Stability analysis of underground mining and their application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 15. Pp. 237—243. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.058.

15. *Vanuva M., Jaya K. P.* Design analysis of an underground tunnel in Tamilnadu // Archives of Civil Engineering. 2018. Vol. 64. No 1. Pp. 21—39. DOI: 10.2478/ace-2018-0002.

16. *Бугров А. К., Голубев А. И.* Анизотропные грунты и основания сооружений. — СПб.: Недра, 1993. — 245 с.

17. *Schweiger H. F., Fabris C., Ausweger G., Hauser L.* Examples of successful numerical modelling of complex geotechnical problems // Innovative Infrastructure Solutions. 2019. Vol. 4. No 2. Pp. 1—10. DOI: 10.1007/s41062-018-0189-5.

18. СП 248.1325800.2016. Сооружения подземные. Правила проектирования.

19. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. — 492 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Artem'ev V. B. JSK «SUEK». Underground mining, dynamics of development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no S48, pp. 13—22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-193-2018-11-48-13-22.

2. Shirin L. N., Rascvetaev V. A., Koval' A. I. *Povyshenie effektivnosti raboty monorel'sovykh dorog pri podgotovke zapasov uglya k ochistnoy vyemke*: monografiya [Improving the efficiency of monorails in the preparation of coal reserves for stoping, monograph], Dnepropetrovsk, NGU, 2014, 144 p.

3. Ponomarev V. S., Kubrin S. S. Issues provision of materials production areas of the mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no S48, pp. 286—296. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-193-2018-11-48-286-296.

4. Kachurin N. M., Nogikh V. R. Interaction underslung transport units with rocks and providing safety and stability of mining workings. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2015, no 4, pp. 65—75. [In Russ].

5. *Instruktsiya po raschetu i primeneniyu ankernoy krepi na ugol'nykh shakhtakh Rossii* [Instructions for the calculation and application of anchorage in coal mines of Russia], Saint-Petersburg, VNIMI, 2000, 70 p.

6. Kuznetsov E. V. Experience of operating a suspend monorail in mines of JSK «Razrez Sibirginsky». *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2005, no 4, pp. 24—26. [In Russ].

7. Nogikh V. R. Research of influence of anchors and suspended transport devices in underground workings on deformation of roof rocks. *Sovremennye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern

trends and innovations in science and production. Materials of the IV international scientific and practical conference], Kemerovo, KuzGTU, 2015, pp. 65 – 66. [In Russ].

8. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike*: Per. s angl. [Finite element method in engineering: English–Russian translation], Moscow, Mir, 1975, 544 p.

9. Fadeev A. B. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [Finite element method in geomechanics], Moscow, Nedra, 1987, 221 p.

10. *Rukovodstvo pol'zovatelya Plaxis 2D*: Per. s angl. [User manual Plaxis 2D: English–Russian translation], Saint-Petersburg, NIP-Informatika, 2004, 424 p.

11. Brinkgreve R. B. J., Bakker H. L. Non-linear finite element analysis of safety factors. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, Australia, 1991, pp. 1117 – 1122.

12. Prishchepa D. V. Grouding the models of fractured rock mass stressed – deformed state. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2017, no 1, pp. 81 – 88. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.081.

13. Zingano A., Weiss A. Subsidence over room and pillar retreat mining in a low coal seam. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29. No 1. Pp. 51 – 57. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.02.

14. Radouane N., Boukelloul M., Fredj M. Stability analysis of underground mining and their application on the Mine Chaabte El Hamra, Algeria. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015. Vol. 15. Pp. 237 – 243. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.058.

15. Vanuva M., Jaya K. P. Design analysis of an underground tunnel in Tamilnadu. *Archives of Civil Engineering*. 2018. Vol. 64. No 1. Pp. 21 – 39. DOI: 10.2478/ace-2018-0002.

16. Bugrov A. K., Golubev A. I. *Anizotropnye grunty i osnovaniya sooruzheniy* [Anisotropic soils and foundations of structures], Saint-Petersburg, Nedra, 1993, 245 p.

17. Schweiger H. F., Fabris C., Ausweger G., Hauser L. Examples of successful numerical modelling of complex geotechnical problems. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2019. Vol. 4. No 2. Pp. 1 – 10. DOI: 10.1007/s41062-018-0189-5.

18. *Sooruzheniya podzemnye. Pravila proektirovaniya. SP 248.1325800.2016* [Underground structures. Design rules. Russian code of practice SP 248.1325800.2016].

19. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoy sredy.* T.1 [Continuum mechanics. Vol. 1], Moscow, Nauka, 1970, 492 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Блохин Дмитрий Иванович[1] – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: dblokhin@yandex.ru,
Закоршменный Иосиф Михайлович[1] – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник,
Кубрин Сергей Сергеевич[1] – д-р техн. наук, профессор,
зав. лабораторией, e-mail: s_kubrin@mail.ru,
Харитонов Игорь Леонидович – заместитель технического директора,
начальник технического управления, АО «СУЭК-Кузбасс»,
Холмянский Михаил Львович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,
НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»,
[1] Институт проблем комплексного освоения недр РАН.
Для контактов: Блохин Д.И., e-mail: dblokhin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.I. Blokhin[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: dblokhin@yandex.ru,
I.M. Zakorshmennyi[1], Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher,
S.S. Kubrin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory, e-mail: s_kubrin@mail.ru,
I.L. Kharitonov, Deputy Technical Director, Chief of Technical Management,
JSK «SUEK-Kuzbass, 652507, Leninsk-Kuznetskiy, Russia,

M.L. Kholmyansky, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,
Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures,
JSC Research Center of Construction, 109428, Moscow, Russia,
[1] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: D.I. Blokhin, e-mail: dblokhin@yandex.ru.

Получена редакцией 22.11.2019; получена после рецензии 24.02.2020; принята к печати 20.08.2020.
Received by the editors 22.11.2019; received after the review 24.02.2020; accepted for printing 20.08.2020.

Приложение

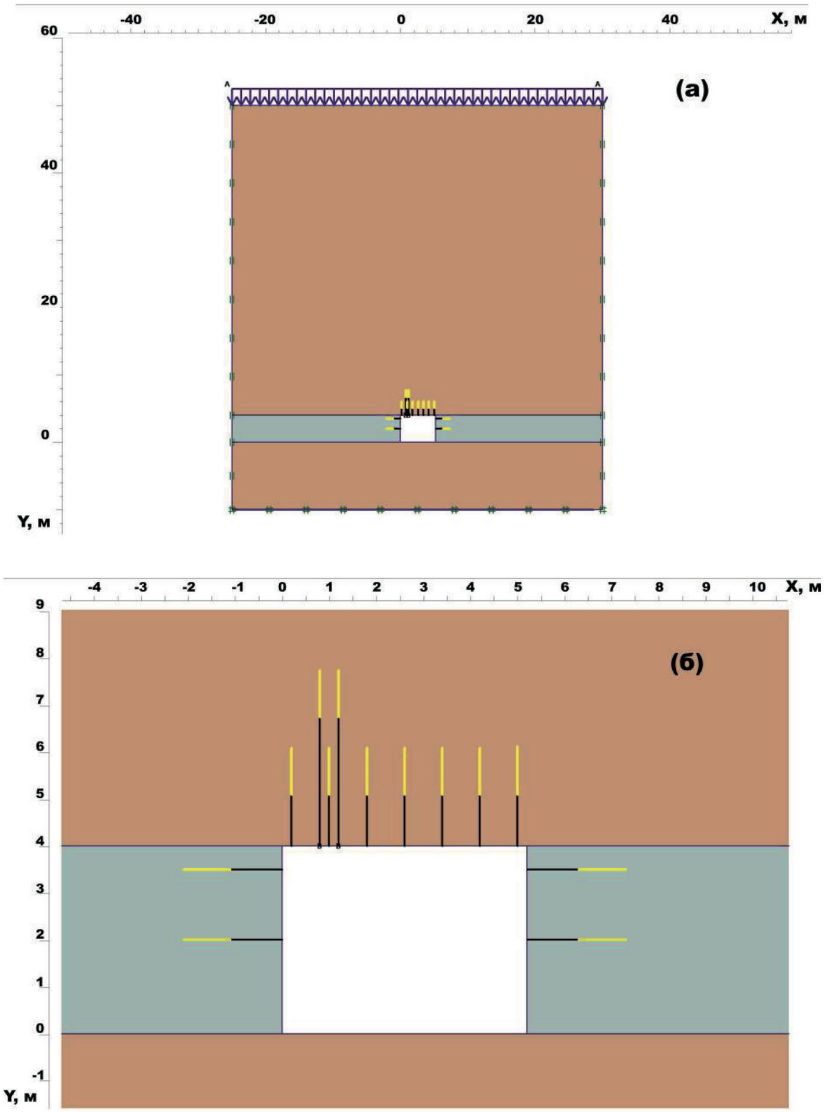

Рис. 2. Расчетная модель выработки: общий вид (а); центральная часть (б)
Fig. 2. Design mode of mine excavation: (a) general view; (b) center

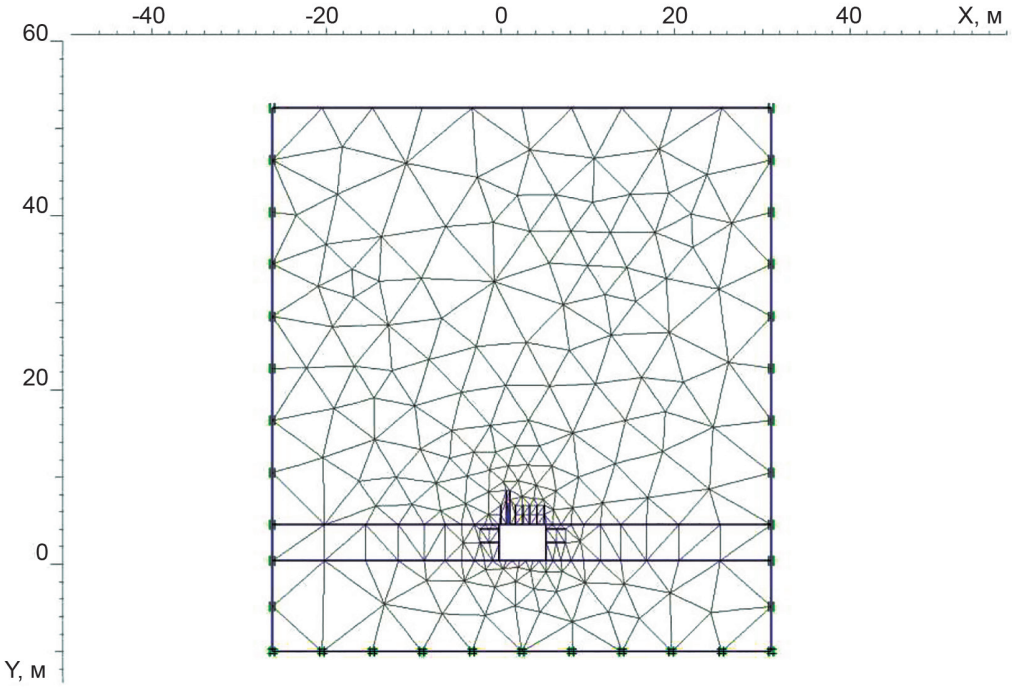

Рис. 3. Сетка конечных элементов
Fig. 3. Finite element mesh

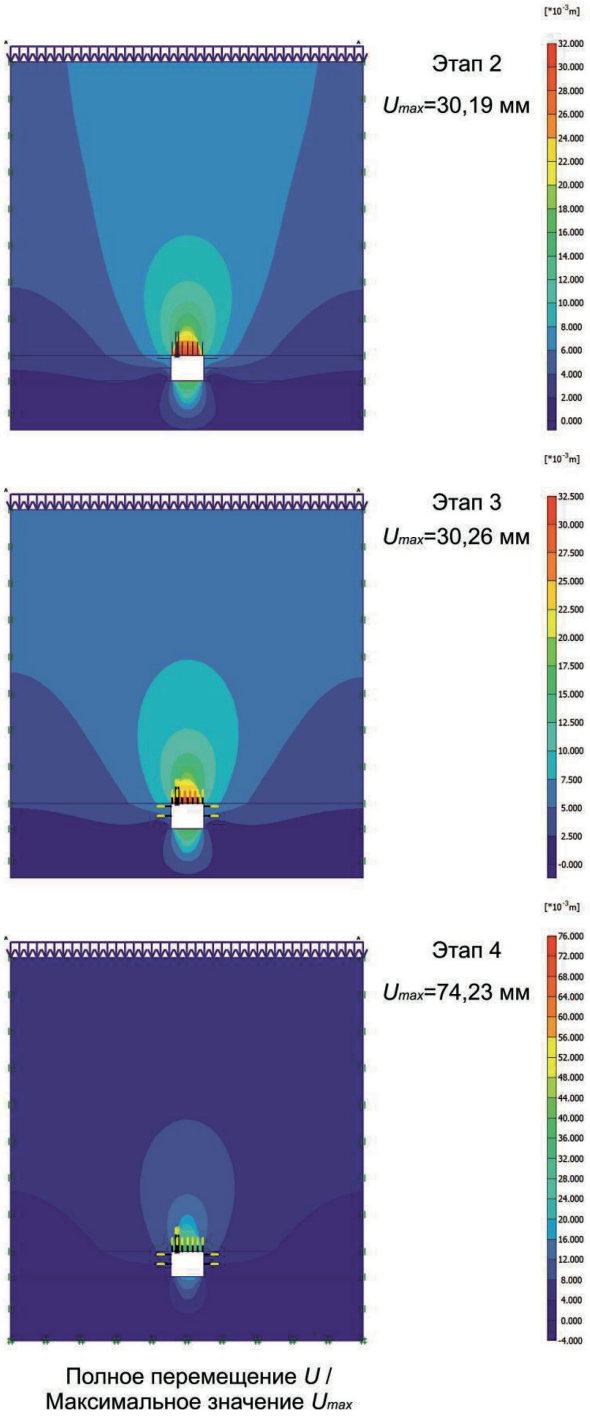

Рис. 4. Изолинии полных перемещений U [мм] в конце каждого этапа
Fig. 4. Contour lines of total displacements U [mm] at the end of each stage

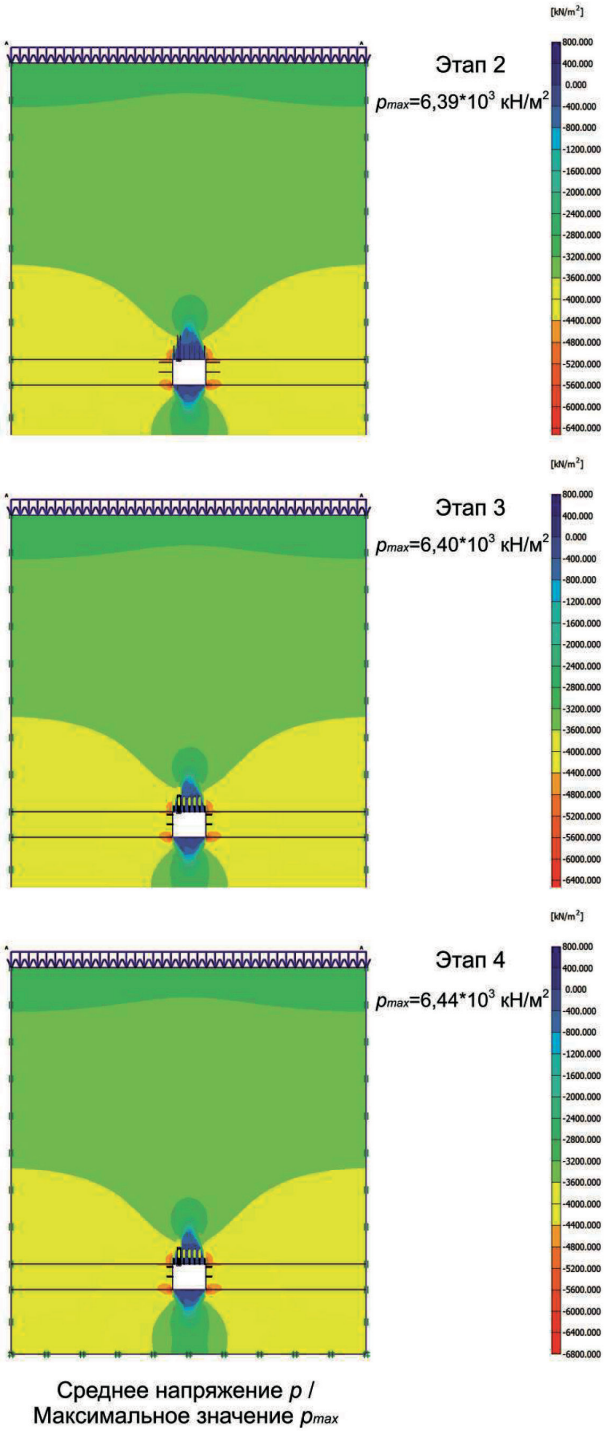

Рис. 5. Изолинии средних напряжений p [кН/м^2] в конце каждого этапа
Fig. 5. Contour lines of mean stresses p [kN/m^2] at the end of each stage

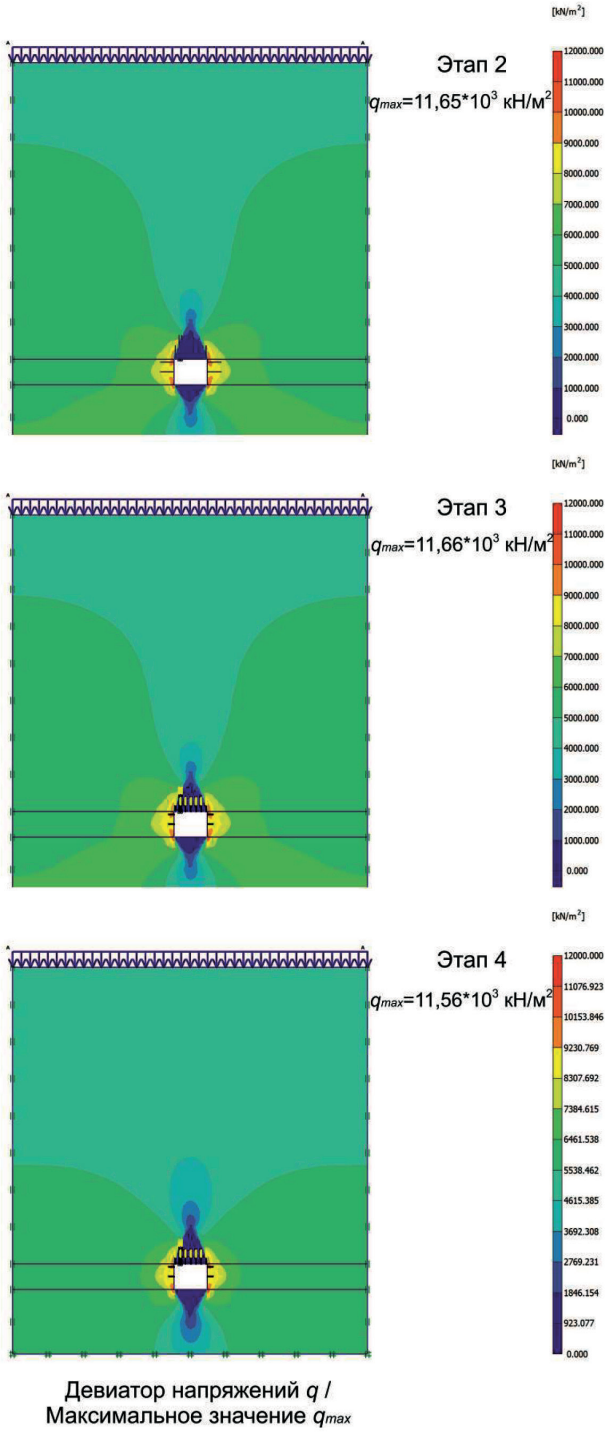

Рис. 6. Изолинии девиаторов напряжений q [кН/м²] в конце каждого этапа
Fig. 6. Contour lines of stress deviators q [kN/m²] at the end of each stage

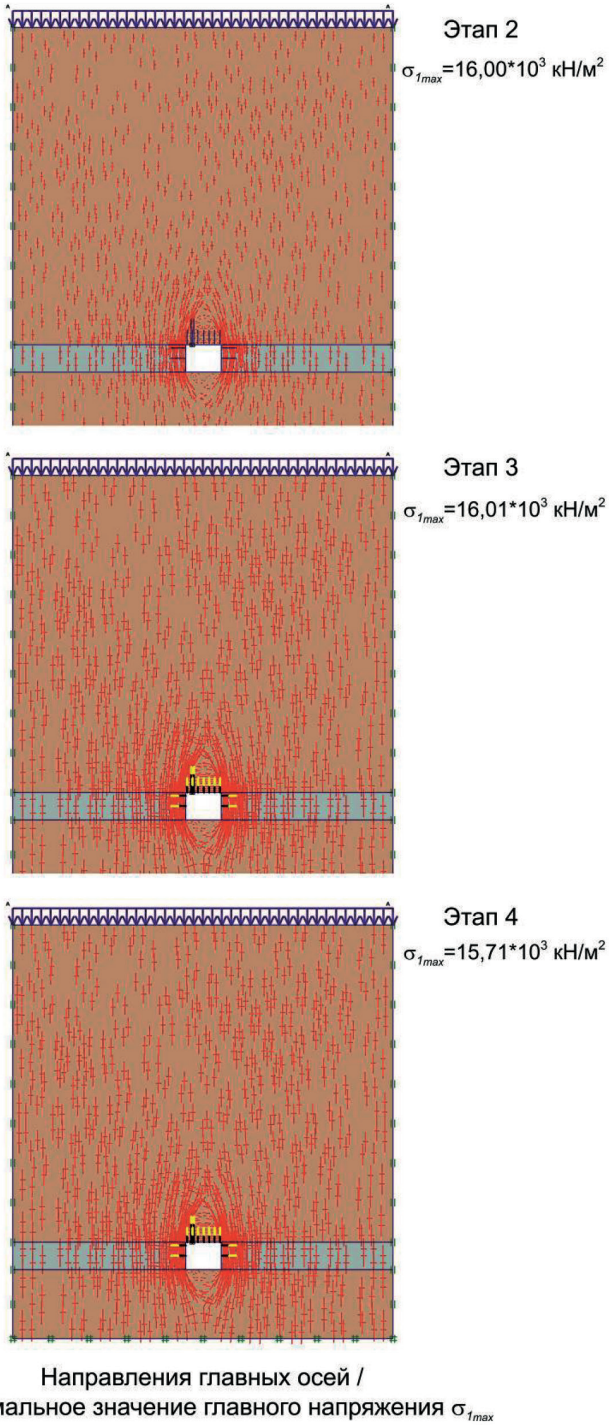

Рис. 7. Направления главных осей и величины главных напряжений σ_1 и σ_2 в конце каждого этапа
Fig. 7. Directions of major axes and values of principal stresses σ_1 and σ_2 at the end of each stage

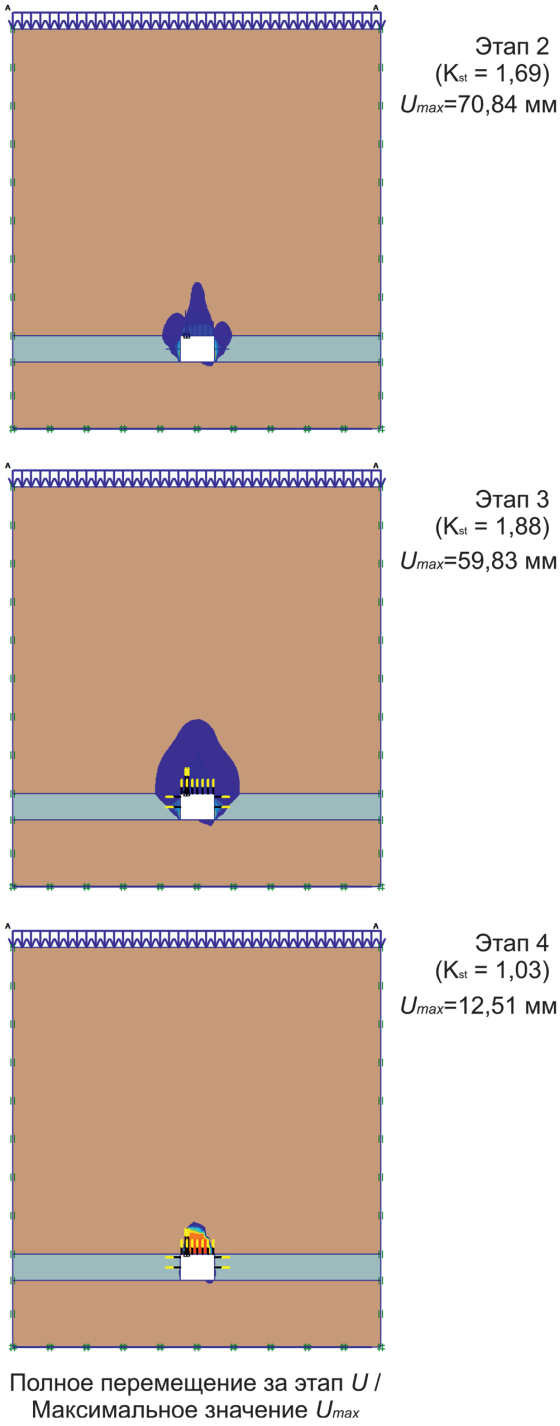

Рис. 9. Механизмы потери устойчивости и коэффициенты запаса устойчивости K_{st}
Fig. 9. Instability mechanisms and safety factors K_{st}