

Код МРНТИ 52.13.25

А.А. Мусин, *А.Ж. Имашев, Н.Қ. Шәйке, А.М. Суимбаева

Қарағандинский технический университет имени Абылқаса Сағинова (г. Қарағанда, Қазақстан)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБНАЖЕНИЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАКЛОННЫХ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ СИСТЕМОЙ РАЗРАБОТКИ

Аннотация. Статья посвящена разработке ресурсосберегающих технологий отработки наклонных залежей с применением камерно-столбовой системы разработки. В статье установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зависимости от технологических параметров очистного забоя для обоснования применения камерно-столбовой системы разработки при отработке наклонных рудных залежей. Изучение изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород при отработке наклонных залежей камерно-столбовой системой разработки проводилось методом конечных элементов. Получены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) вокруг очистной выработки.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, геологический индекс прочности, наклонные залежи, ресурсосберегающие технологии, численное моделирование, метод конечных элементов, между камерный целик.

Камералық-бағаналы қазу жүйесімен көлбеу кен орындарын өңдеу кезінде техногендік ашылымдардың орнықты жай-күйін анықтау

Андатпа. Мақала камералық-бағаналы қазу жүйесін қолдана отырып, көлбеу кен орындарын өңдеудің ресурс үнемдейтін технологияларын жасауға арналған. Мақалада көлбеу кен орындарын өңдеу кезінде камералық-бағаналы қазу жүйесін қолдануды негіздеу үшін тазарту кенжарының технологиялық параметрлеріне байланысты тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеру заңдылықтары анықталған. Көлбеу кен орындарын камералық-бағаналы қазу жүйесімен өңдеу кезінде тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеруін зерттеу соңғы элементтер әдісімен жүргізілді. Тазарту қазбасының айналасындағы кернеулі-деформацияланған күйдің (КДК) өзгеру заңдылықтары алынды.

Түйінді сөздер: кернеулі-деформацияланған күй, геологиялық беріктік индексі, көлбеу кен орындары, ресурс үнемдеу технологиялары, сандық модельдеу, ақырғы элементтер әдісі, камералық аралық кентірек.

Determination of the stable state of man-made outcrops during the mining of inclined ore deposits by a chamber-pillar mining system

Abstract. The article is devoted to the development of resource-saving technologies for mining inclined deposits using a chamber-pillar mining system. The article establishes the patterns of changes in the stress-strain state of the rock mass depending on the technological parameters of the treatment face to justify the use of a chamber-column mining system for mining inclined ore deposits. The study of changes in the stress-strain state of a rock mass during the mining of inclined deposits by a chamber-column mining system was carried out by the finite element method. Patterns of changes in the stress-strain state (VAT) around the treatment plant have been obtained.

Key words: Stress-strain state, geological strength index, inclined deposits, resource-saving technologies, numerical modeling, finite element method, inter-chamber whole.

Введение

За многолетний период ведения горных работ произошли существенные изменения горно-геологических и горнотехнических условий разработки Жезказганского месторождения.

Запасы Центрального рудного поля, залегающие ближе к поверхности и на средних глубинах (до 300 м), практически отработаны и погашены. В настоящее время горные работы, в основном, перешли на периферийные участки, переходящие на глубокие горизонты (глубина 500 м и ниже) и представленные сложными горно-геологическими условиями (наклонное залегание рудных залежей, малая мощность рудных тел 3-5 метра, повышенная трещиноватость руд и вмещающих пород, сложная литология подрабатываемой толщи), где преобладают тектонические разломы и высока вероятность динамического проявления горного давления.

Ниже на диаграммах показаны запасы Жезказганского месторождения, распределенные по углам падения (рис. 1) и по мощности (рис. 2) рудных залежей.

По анализу, продемонстрированному на рис. 1, видно, что доля наклонных залежей углом падения 15-35° составляет 32,4%, то есть одну треть от общего утвержденного балансового запаса, тогда как доля маломощных рудных залежей (рис. 2) мощностью 3-5 метра составляет 18,0%.

Для эффективной и полноценной разработки Жезказганского месторождения возникла необходимость отработке ранее оставленных неактивных запасов наклонных залежей (15-35°) с мощностью 3-5 метров.

В правилах [1] обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы, указано, что для отработки горизонтальных и пологих (с углом падения залежи до 20 градусов) рудных залежей мощностью до 18 метров камерно-столбовой системой разработки, выемка рудных тел производится в два этапа: выемка камерных запасов, затем выемка целиков (повторная отработка). А наклонные (20-50 градусов) и крутопадающие (более 50 градусов) рудные тела обрабатываются системами разработки с закладкой или полным обрушением выработанного пространства.

Согласно ранее проведенным исследованиям [2] установлено, что угол наклона рудной залежи не сильно влияет на напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг очистных выработок, а также выявлена прямая связь между устойчивым состоянием массива горных пород и расстоянием между смежными рудными залежами. Таким образом, авторы указывают, что при мощности породного моста 5 м возникают растягивающие напряжения значительной величины (7,5 МПа), что в свою очередь приводит к потере несущей способности. А при мощности породного моста 10 м максимальные растягивающие напряжения снижаются до 2,5 МПа, что обеспечивает более чем двукратный запас прочности.

Согласно ранее проведенным исследованиям [2] установлено, что угол наклона рудной залежи не сильно влияет на напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг очистных выработок, а также выявлена прямая связь между устойчивым состоянием массива горных пород и расстоянием между смежными рудными залежами. Таким образом, авторы указывают, что при мощности породного моста 5 м возникают растягивающие напряжения значительной величины (7,5 МПа), что в свою очередь приводит к потере несущей способности. А при мощности породного моста 10 м максимальные растягивающие напряжения снижаются до 2,5 МПа, что обеспечивает более чем двукратный запас прочности.

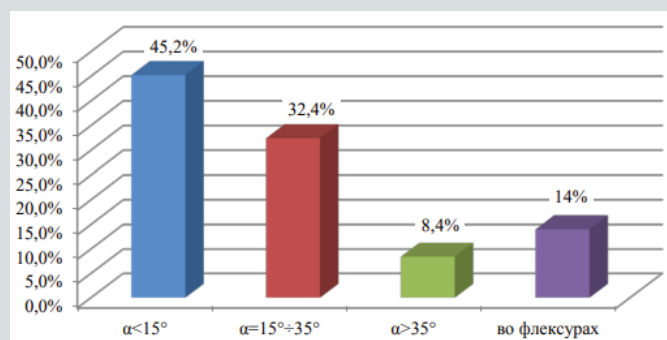


Рис. 1. Диаграмма распределения запасов руд по углам падения.

Сурет 1. Кен қорларының құлау бұрыштары бойынша бөліну диаграммасы.

Figure 1. A diagram of the distribution of ore reserves by angles of incidence.

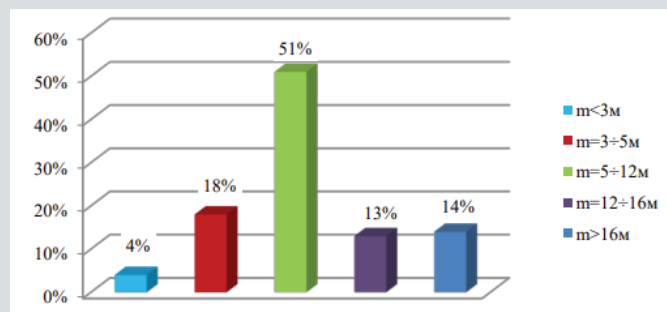


Рис. 2. Диаграмма распределения запасов руд по мощности.

Сурет 2. Кен қорларының қуаттылығы бойынша бөліну диаграммасы.

Figure 2. A diagram of the distribution of ore reserves by capacity.

Целью настоящей статьи является исследование влияния угла залегания горных пород на зону разрушения массива вокруг выработки при изменении показателя GSI и высоты камеры. Изучение геомеханического состояния массива горных пород проведено с использованием обобщенного критерия разрушения Хука-Брауна [3]. Этот критерий прочности очень популярен в геомеханических исследованиях стран Европы, Северной Америки и Австралии. Основной идеей разработки эмпирического критерия Хука-Брауна является то, что авторы указывают на необходимость корректного перехода от прочности образца к прочности в массиве.

Объектом исследования является приконтурная часть очистной выработки, пройденная в массиве с залеганием горных пород под углом 15, 20, 25, 30, 35 градусов, мощностью камеры 4 метра, а также GSI 35, 45, 55 и 65.

Выбор метода исследования

Изучение напряженно-деформированного состояния массива горных пород и их свойства являются основой для прогноза и оценки горного давления, вывалов, разуплотнения, выпора, отслаивания и других негативных геомеханических процессов и явлений, развивающихся

во времени при проходке и эксплуатации подземных сооружений [4].

Решение геомеханических задач в аналитической постановке предполагает использование достаточно простых расчетных схем. На современном этапе развития методов исследования широкие возможности открывают многочисленные методы решения, заимствованные из механики деформируемого твердого тела. Наиболее эффективными из них являются метод конечных элементов (МКЭ) [5] и метод граничных элементов (МГЭ) [6].

Для решения различных задач в области геомеханики чаще всего используется метод конечных элементов, который имеет больше возможностей для моделирования различных неоднородностей среды и нелинейности физических связей. С учетом этого МКЭ выгодно отличается возможностью получения решений в нелинейной постановке, то есть в предположении, что среда деформируется не упруго и допускает пластическую деформацию или хрупкое разрушение. Таким образом, это делает его удобным и мощным инструментом для решения различных нелинейных задач. МКЭ характеризуется простотой расчета упругого состояния тел из некоторых материалов с нерегулярными границами, а также простотой учета различных граничных условий [7]. Аппарат МКЭ применим не только для решения плоских задач, пространственная область массы также может быть аппроксимирована сплошными конечными элементами [8].

Э. Хоек в своих многочисленных исследованиях предложил метод [9] определения прочности массива горных пород, который основывается на оценке блочности массива и состояния трещин.

Основными физико-механическими свойствами горных пород, определяющими их устойчивость в обнажениях и целиках и используемыми в горнотехнических расчетах при проектировании параметров систем разработки и оценке устойчивости выработанных пространств, являются удельный вес, прочность на сжатие и на растяжение, сцепление горных пород, угол внутреннего трения, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Следует различать физико-механические свойства горных пород в образцах и в массиве. Свойства горных пород в образцах определяются путем испытания kernового материала на прессах в лабораторных условиях по известным методикам. Свойства массива горных пород с учетом ослабляющего влияния трещин определяются с помощью испытаний призм горных пород в местах естественного залегания, а также с помощью перерасчета свойств в образце на свойства массива путем введения коэффициента структурного ослабления массива при анализе причин разрушения целиков.

Основная часть

Численный анализ проводился в ограниченных горнотехнических условиях, максимально приближенных к горнотехническим и горно-геологическим условиям Жезказганского месторождения. Исходные данные для численного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для численного моделирования

Кесте 1

Сандық модельдеуге арналған бастапқы мәліметтері

Table 1

Initial data for numerical modeling

GSI	Угол падения залежи	Высота камеры, м	Параметр нетронутого массива	Фактор нарушения	Коэффициент Пуассона	Прочность на одноосное сжатие, МПа
35	15 град.	4	10	0.25	0.3	100
45	20 град.					
55	25 град.					
65	30 град.					
	35 град.					

В статье рассматривается вопрос влияния геологического индекса прочности (GSI), угла падения горных пород и высоты камеры на зону разрушения вокруг очистной выработки.

По стандартам международного общества по горной механике (ISRM) для безопасного ведения горных работ, коэффициент запаса устойчивости горных пород должен быть выше значения 1.2.

Значение 1.2, использованное в рамках численного моделирования, принято на основании исследования Рида и Стэйси (2009 г.), проведенного в продолжение работ Суона и Сепульведы (2000 г.), результаты данных исследования признаны международным обществом по горной механике (ISRM).

Геомеханическая модель представляет однородную среду с очистным пространством шириной 12 метров, расположенную на глубине 400 метров. Высота камеры 4 метра. Ширина междукамерных целиков (МКЦ) составляет 8 метров.

На рисунках 3-7 представлены результаты численного анализа, рассчитанного методом конечных элементов.

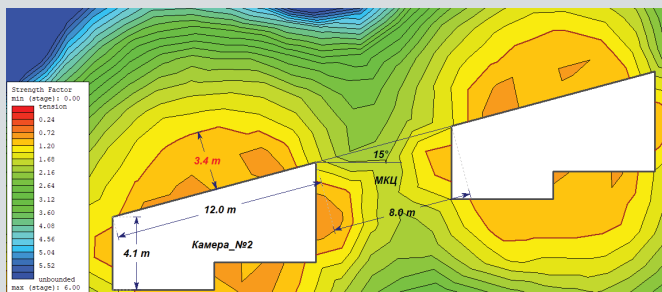


Рис. 3. Высота зоны неупругих деформаций при угле наклона рудных залежей 15°.

Сурет 3. Кен орындарының құлауының 15° бұрышындағы серпімді емес деформациялар аймағының биіктігі.

Figure 3. The height of the zone of inelastic deformations at an angle of inclination of ore deposits of 15°.

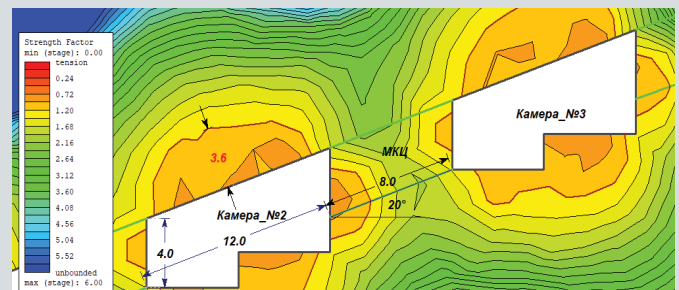


Рис. 4. Высота зоны неупругих деформации при угле наклона рудных залежей 20°.

Сурет 4. Кен орындарының құлауының 20° бұрышындағы серпімді емес деформациялар аймағының биіктігі.

Figure 4. The height of the zone of inelastic deformations at an angle of inclination of ore deposits of 20°.

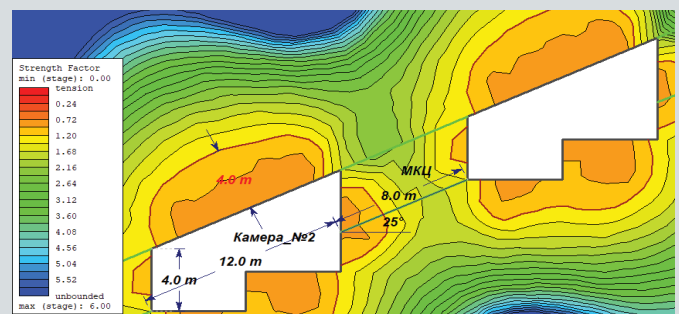


Рис. 5. Высота зоны неупругих деформации при угле наклона рудных залежей 25°.

Сурет 5. Кен орындарының құлауының 25° бұрышындағы серпімді емес деформациялар аймағының биіктігі.

Figure 5. The height of the zone of inelastic deformations at an angle of inclination of ore deposits of 25°.

На основе анализа данных, полученных в ходе выполнения численного моделирования, построен график изме-

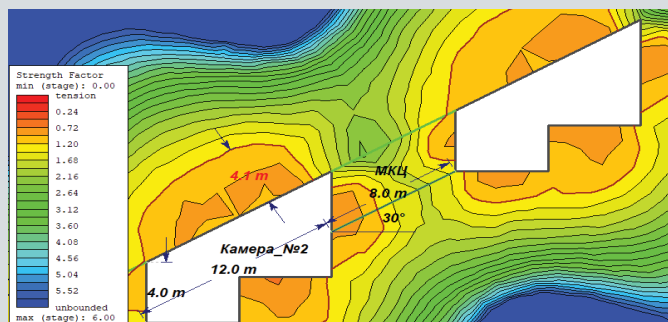


Рис. 6. Высота зоны неупругих деформации при угле наклона рудных залежей 30°.

Сурет 6. Кен орындарының құлауының 30° бұрышындағы серпімді емес деформациялар аймағының биіктігі.

Figure 6. The height of the zone of inelastic deformations at an angle of inclination of ore deposits of 30°.

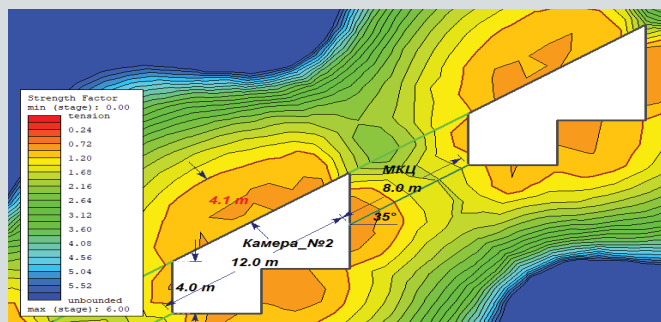


Рис. 7. Высота зоны неупругих деформации при угле наклона рудных залежей 35°.

Сурет 7. Кен орындарының құлауының 35° бұрышындағы серпімді емес деформациялар аймағының биіктігі.

Figure 7. The height of the zone of inelastic deformations at an angle of inclination of ore deposits of 35°.

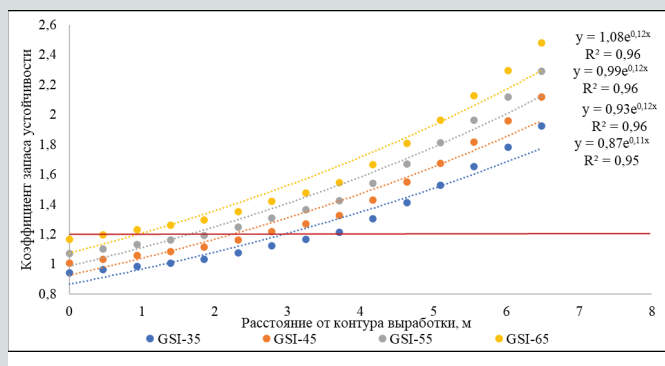


Рис. 8. Изменение коэффициента запаса устойчивости в зависимости от GSI.

Сурет 8. GSI байланысты тұрақтылық қорының коэффициентін өзгерту.

Figure 8. Change in the coefficient of stability margin depending on GSI.

нения коэффициента запаса устойчивости в зависимости от значения GSI (рис. 8).

По графику, представленному на рисунке 9, видно, что при угле наклона залежей 20 градусов, ЗНД больше, чем при угле наклона 15 градусов, однако с увеличением угла наклона от 25 до 35 градусов значение ЗНД практически не изменяется. То есть из полученных результатов следует предполагать, что угол наклона существенно влияет на устойчивость очистной камеры до угла наклона 25 градусов, далее, с увеличением угла наклона до 35 градусов, значение ЗНД практически не увеличивается.

На основе обработки и анализа данных, полученных в ходе выполненных исследований, сформулированы следующие логарифмические уравнения для определения зон неупругих деформаций при угле наклона залежей до 20 градусов (1) и при угле наклона залежей более 20 градусов (2):

$$ЗНД_{<20} = -4,7 \ln(GSI) + 20,5. \quad (1)$$

$$ЗНД_{>20} = -3,2 \ln(GSI) + 15,7. \quad (2)$$

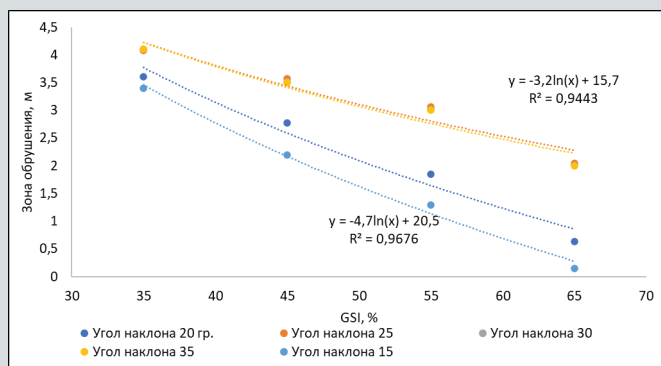


Рис. 9. График изменения зон разрушения горных пород в кровле в зависимости от угла падения.

Сурет 9. Құлау бұрышына байланысты шатырдағы тау жыныстарының бұзылу аймақтарының өзгеру кестесі. Figure 9. Graph of changes in the zones of rock destruction in the roof depending on the angle of incidence.

Результаты, полученные в ходе выполненных исследований на основе численных методов конечных элементов, могут быть применены для обоснования оптимальных параметров очистной камеры и междукамерных целиков при разработке наклонных залежей камерно-столбовой системы разработки.

Выводы

1. Анализ результатов выполненных исследований показывает, что на увеличение площади обрушения горных пород приконтурной части очистной камеры существенное влияние оказывают значение GSI и возрастания угла наклона залежи от 15° до 25°, тогда как возрастания угла наклона рудных залежей от 25° до 35° практически не оказывает влияние на увеличение площади зоны разрушения.

2. На основе численного моделирования массива горных пород углами падения в диапазоне 15-35 градусов методами конечных элементов и в результате дальнейшего анализа полученных данных о напряженно-деформационном состоянии были построены графики зависимости,

позволяющие определять коэффициент запаса прочности (Strength Factor) в зависимости от геологического индекса прочности (GSI).

3. По полученным результатам в ходе проведения анализа установлено, что коэффициент запаса прочности (SF) напрямую зависит от рейтинга GSI и угла падения залежей.

4. В ходе выполненных исследований построены график зависимости и сформулированы логарифмические уравнения для определения зон неупругих деформаций в

зависимости от значения GSI и угла падения наклонных залежей.

Благодарность

Статья опубликована в рамках грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на 2024-2026 годы (ИРН – АР23489856), при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30 декабря 2014 года №352. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 13 февраля 2015 года №10247 (на русском языке)
2. Arnat Salkynov. Исследование деформационных процессов в массиве горных пород, окружающем очистной забой, при разработке наклонных рудных месторождений. / Arnat Salkynov, Arailym Rymkulova, Aigerim Suimbayeva, Sholpan Zeitinova. // Mining of Mineral Deposits. 2023. №17(2). С. 82-90 (на английском языке)
3. Hoek E. Критерий разрушения Хука-Брауна и GSI. / E. Hoek, E.T. Brown. // Журнал механики горных пород и геотехнической инженерии. 2019. Т. 11. Вып. 3. С. 445-463 (на английском языке)
4. Барыкина О.С. Оценка влияния проходки туннеля на напряженно-деформированное состояние неоднородного скального массива в сложных геологических и сейсмоструктурных условиях. / О.С. Барыкина, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаль. // Геотехника. 2021. Т. 8. С. 6-18 (на русском языке)
5. Cattenone A. Конечный элементный анализ аддитивного производства на основе моделирования наплавленного напыления: прогноз искажений и сравнение с экспериментальными данными. / Cattenone A., Morganti S., Alaimo G., Auricchio F. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2019. №141(1). Ст. №011010 (на английском языке)
6. Zhang C. Методы анализа разрушения угольных пластов и оценки неустойчивости: краткий обзор и перспективы. / Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. // Engineering Failure Analysis. 2022. Т. 138. Ст. №106344 (на английском языке)
7. Lopez-Vinielles J. Объединение спутниковых InSAR. Наклонные блоки и конечно-элементное моделирование для анализа устойчивости в местах захоронения отходов горнодобывающей промышленности. / Lopez-Vinielles J., Fernandez-Merodo J.A., Ezquerro P., Garcia-Davalillo J.C., Sarro R., Reyes-Carmona C., Herrera G. // Remote Sensing. 2021. Т. 13. Вып. 13 (10). Ст. №2008 (на английском языке)
8. Sepehri M. Оценка энергии, связанной с добычей полезных ископаемых, и прогнозирование извержений горных пород на алмазном руднике в Канаде с использованием полной трехмерной упругопластической конечно-элементной модели. / Sepehri M., Apel D.B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. Engineering Geology. 2020. Т. 266. Ст. №105457 (на английском языке)
9. Hoek E. Прочность горных пород и скальных массивов. // ISRM News Journal. 1994. №2 (2). Р. 4-16 (на английском языке)
10. Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S. Количественная оценка диаграммы индекса геологической прочности. Pro-ceedings of the 47th US Rock Mechanics. // Geomechanics Symposium, June 23-26, 2013, San Francisco, CA, USA. – С. 1-8 (на английском языке)
11. Имашев А.Ж. Повышение эффективности буровзрывных работ с учетом структурных и прочностных свойств массива. / А.Ж. Имашев, А.Е. Судариков, А.А. Мусин, А.К. Матаев. // «Горный журнал Казахстана». 2020. №8. С. 29-35 (на русском языке)
12. Imashev A. Исследование напряженно-деформированного состояния массива под карьером при изменении ширины забоя карьера. / Imashev A., Suimbayeva A., Zeitinova Sh., Kuttybayev A., Zhunusbekova G., Mussin A. // Mining of Mineral Deposits. 2022. Т. 16. Вып. 3. С. 61-66 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Тау-кен және геологиялық барлау жұмыстарын жүргізетін қауіпті өндірістік объектілер үшін өнеркәсіптік қауіпсіздікті қамтамасыз ету қағидалары. Қазақстан Республикасы Инвестициялар және даму министрінің 2014 жылғы 30 желтоқсандағы №352 бұйрығы. Қазақстан Республикасының Әділет министрлігінде 2015 жылғы 13 ақпанда №10247 болып тіркелді (орыс тілінде)

2. Arnat Salkynov. Көлбеу кен орындарын өндіру кезінде ашу кенжарын қоршап тұрған тау жыныстарының деформация процестерін зерттеу. / Arnat Salkynov, Arailym Rymkulova, Aigerim Suimbayeva, Sholpan Zeitinova. // *Mining of Mineral Deposits*. 2023. №17 (2). С. 82-90 (ағылшын тілінде)
3. Hoek E. Hoek-Brown тұрақсыз критерийі және GSI. / E. Hoek, E.T. Brown. // *Тау жыныстары механикасы және геотехникалық инженерия журналы*. 2019. Т. 11. Шығ. 3. Б. 445-463 (ағылшын тілінде)
4. Барыкина О.С. Күрделі геологиялық және сейсмотектоникалық жағдайларда гетерогенді жыныс массивінің кернеулі-деформацияланған күйіне туннельді үңгілеудің әсерін бағалау. / О.С. Барыкина, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаль. // *Геотехника*. 2021. Т. 8. Б. 6-18 (орыс тілінде)
5. Cattenone A. Тұндырылған тұндыруды модельдеу негізінде қоспалар өндірісінің ақырғы элементтерін талдау: Бұрмалануларды болжау және эксперименттік мәліметтермен салыстыру. / Cattenone A., Morganti S., Alaimo G., Auricchio F. // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019. №141 (1). Мақ. №011010 (ағылшын тілінде)
6. Zhang C. Көмір бағаналарының істен шығуын талдау және тұрақсыздықты бағалау әдістері: қысқаша шолу және перспектива. / Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Т. 138. Мақ. №106344 (ағылшын тілінде)
7. Lopez-Vinielles J. InSAR спутниктерін біріктіру. Тау-Кен қалдықтарын кәдеге жарату учаскелеріндегі тұрақтылықты талдау үшін көлбеу қондырғылар және ақырлы элементтерді модельдеу. / Lopez-Vinielles J., Fernandez-Merodo J.A., Ezquerro P., Garcia-Davalillo J.C., Sarro R., Reyes-Carmona C., Herrera G. // *Remote Sensing*. 2021. Т. 13. Шығ. 13 (10). Мақ. №2008 (ағылшын тілінде)
8. Sepehri M. Тау-кен өндірісінен туындаған энергияны бағалау және канададағы алмаз кенішіндегі тау-кен жарылыстарын болжау, эласто пластикалық ақырлы элементтердің толық 3d моделін қолдана отырып. / Sepehri M., Apel D.B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. // *Engineering Geology*. 2020. Т. 266. Мақ. №105457 (ағылшын тілінде)
9. Hoek E. Тау жыныстары мен тау жыныстарының массаларының беріктігі. // *ISRM News Journal*. 1994. №2 (2). Р. 4-16 (ағылшын тілінде)
10. Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S. Геологиялық беріктік индексінің кестесін сандық бағалау. *Pro-ceedings of the 47th US Rock Mechanics*. // *Geomechanics Symposium*, June 23-26, 2013, San Francisco, CA, USA, – Б. 1-8 (ағылшын тілінде)
11. Имашев А.Ж. Массивтің құрылымдық және беріктік қасиеттерін ескере отырып, бұрғылау-жару жұмыстарының тиімділігін арттыру. / Имашев А.Ж., Судариков А.Е., Мусин А.А., Матаев А.К. // «Горный журнал Казахстана». 2020. №8. Б. 29-35 (орыс тілінде)
12. Imashev A. Аршықтың астындағы массаның кернеулі-деформациялық күйін түбінің енінің өзгеруімен зерттеу. / Imashev A., Suimbayeva A., Zeitinova Sh., Kuttybayev A., Zhunusbekova G., Mussin A. // *Mining of Mineral Deposits*. 2022. Т. 16. Шығ. 3. Б. 61-66 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. *Pravila obespecheniya promyshlennoi bezopasnosti dlya opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov, vedushchikh gornye i geologorazvedochnye raboty. Prikaz Ministra po investitsiyam i razvitiyu Respubliki Kazakhstan ot 30 dekabrya 2014 goda №352. Zaregistririvan v Ministerstve yustitsii Respubliki Kazakhstan 13 fevralya 2015 goda №10247 [Rules for ensuring industrial safety for hazardous production facilities conducting mining and geological exploration. Order of the Minister of Investment and Development of the Republic of Kazakhstan dated December 30, 2014 №352. Registered with the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan on February 13, 2015 №10247] (in Russian)*
2. Arnat Salkynov. Research into deformation processes in the rock mass surrounding the stopping face when mining sloping ore deposits. / Arnat Salkynov, Arailym Rymkulova, Aigerim Suimbayeva, Sholpan Zeitinova. // *Mining of Mineral Deposits*. 2023. №17 (2). P. 82-90 (in English)
3. Hoek E. Hoek-Brown failure criterion and GSI. / E. Hoek, E.T. Brown. // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11. Issue 3. P. 445-463 (in English)
4. Barykina O.S. Otsenka vliyaniya prokhodki tunnelya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie neodnorodnogo skal'nogo massiva v slozhnykh geologicheskikh i seismotektonicheskikh usloviyakh. / O.S. Barykina, I.K. Fomenko, O.V. Zerkal'. // *Geotekhnika*. 2021. Т. 8. S. 6-18 [Barykina O.S. Assessment of the influence of tunneling on the stress-strain state of a heterogeneous rock mass in complex geological and seismotectonic conditions. / O.S. Barykina, I.K. Fomenko, O.V. Mirror. // *Geotechnics*. 2021. Vol. 8. P. 6-18] (in Russian)
5. Cattenone A. Finite element analysis of additive manufacturing based on fused deposition modeling: distortion prediction and comparison with experimental data. / Cattenone A., Morganti S., Alaimo

- G., Auricchio F. // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019. №141(1). Art. №011010 (in English)
6. Zhang C. *Methods for coal seam failure analysis and instability assessment: brief review and prospects.* / Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 138. Art. №106344 (in English)
 7. Lopez-Vinielles J. *Satellite InSAR fusion. Tilt blocks and finite element modeling for stability analysis in mining waste disposal sites.* / Lopez-Vinielles J., Fernandez-Merodo J.A., Ezquerro P., Garcia-Davalillo J.C., Sarro R., Reyes-Carmona C., Herrera G. // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Issue. 13 (10). Art. №2008 (in English)
 8. Sepehri M. *Mining energy estimation and rock eruption prediction at a diamond mine in Canada using a full three-dimensional elastoplastic finite element model.* / Sepehri M., Apel D.B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. *Engineering Geology*. 2020. Vol. 266. Art. №105457 (in English)
 9. Hoek E. *Strength of rock and rock masses.* // *ISRM News Journal*. 1994. №2 (2). P. 4-16 (in English)
 10. Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S. *Quantification of geological strength index diagram. Proceedings of the 47th US Rock Mechanics. // Geomechanics Symposium, June 23-26, 2013, San Francisco, CA, USA. – P. 1-8 (in English)*
 11. Imashev A.Zh. *Povyshenie effektivnosti burovzryvnykh rabot s uchetom strukturnykh i prochnostnykh svoistv massiva.* / A.Zh. Imashev, A.E. Sudarikov, A.A. Musin, A.K. Mataev. // «Gornyi zhurnal Kazakhstana». 2020. №8. S. 29-35 [Imashev A.Zh. *Increasing the efficiency of drilling and blasting operations, taking into account the structural and strength properties of the massif.* / A.Zh. Imashev, A.E. Sudarikov, A.A. Musin, A.K. Mataev. // «Mining Journal of Kazakhstan». 2020. №8. P. 29-35] (in Russian)
 12. Imashev A. *Study of the stress-strain state of the massif under the quarry when changing the width of the quarry face.* / Imashev A., Suimbayeva A., Zeitinova Sh., Kuttybayev A., Zhunusbekova G., Mussin A. // *Mining of Mineral Deposits*. 2022. Vol. 16. Issue 3. P. 61-66 (in English)

Сведения об авторах:

Мусин А.А., PhD, ст. преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), musin_aibek@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6318-9056>

Имашев А.Ж., PhD, асс. профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), imashev_85@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9799-8115>

Шәйке Н.Қ., PhD, ст. преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), nurlan_shaike@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2395-4566>

Суимбаева А.М., и.о. доцента кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), aygerim_86@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6582-9977>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мусин А.А., PhD, «Пайдалы кенорындарын қазып өндіру» кафедрасының аға оқытушысы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (Қарағанды қ., Қазақстан)

Имашев А.Ж., PhD, «Пайдалы кенорындарын қазып өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессорі, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (Қарағанды қ., Қазақстан)

Шәйке Н.Қ., PhD, «Пайдалы кенорындарын қазып өндіру» кафедрасының аға оқытушысы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (Қарағанды қ., Қазақстан)

Суимбаева А.М., «Пайдалы кенорындарын қазып өндіру» кафедрасының доцент м.а., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (Қарағанды қ., Қазақстан)

Introduction about the authors:

Mussin A., PhD, Senior Lecturer of the Department «Development of mineral deposits» Non-profit joint-stock company «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Imashev A., PhD, associate professor of the Department «Development of mineral deposits» Non-profit joint-stock company «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Shaike N., Senior Lecturer of the Department «Development of mineral deposits» Non-profit joint-stock company «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Suimbayeva A.M., acting associate Professor of the Department «Development of mineral deposits» Non-profit joint-stock company «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)