

Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения

М.А. Соннов¹✉, А.В. Трофимов², А.Е. Румянцев², С.В. Шпилев²

¹ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация

²ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉Sonnov@cae-fidesys.com

Резюме: Исследование представлено на примере комплекса выработок капитального рудоспуска с весьма разнообразными видами подземных сооружений, как правило, оригинальных размеров, зависящих от функционального назначения и габаритов размещаемого оборудования. Технические решения комплекса подземного дробления и вспомогательных сооружений предусматривают создание на глубине более 800–1000 м камерных выработок с вертикальным пролетом до 35 м и горизонтальным – до 20 м. В данных условиях повышенное внимание следует уделять параметрам крепления, в особенности глубине заложения анкеров. Для участка массива нового рудоспуска построена блочная геомеханическая модель в среде ГИС Micromine. Исходными данными для наполнения модели являются описание геотехнических скважин и физико-механические испытания горных пород. В блочной геомеханической модели выделены 4 домена для последующего численного моделирования. Моделирование напряженного состояния массива в 3D постановке выполнено в программном комплексе CAE Fidesys на основании каркасной модели комплекса выработок рудоспуска в ГИС Micromine. Для корректного моделирования напряженно-деформированного состояния массива воссоздана история его пошагового нагружения. Массив перед началом строительства выработок находится в преднапряженном состоянии под действием горного давления от веса породной толщи. Далее пошагово моделировалась проходка горных выработок. Поле точек с величинами максимальных главных напряжений выгружено из постпроцессора численной модели и интерполировано в блочную геомеханическую модель для уточнения параметра SRF рейтинга Q Бартона. По полученным значениям Q определены параметры крепления для камерных выработок по эмпирическим методикам Бартона, Хатчинсона и Потвина.

Ключевые слова: горный массив, крепление, горное давление, выработки, рудоспуск, подземные сооружения, глубина штангования, анкер, геомеханическая блочная модель, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, физико-механические свойства, Micromine, CAE Fidesys

Для цитирования: Соннов М.А., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Шпилев С.В. Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения. *Горная промышленность*. 2021;(2):127–131. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-127-131.

Application of Numerical and Block Geomechanical Modelling to Determine Parameters of Large-Section Chambers

M.A. Sonnov¹✉, A.V. Trofimov², A.E. Rumyantsev², S.V. Shpilev²

¹Fidesys LLS, Moscow, Russian Federation

²Gipronickel Institute, St. Petersburg, Russian Federation

✉Sonnov@cae-fidesys.com

Abstract: The study is exemplified by complex workings of a main ore pass that include a variety of underground structures, usually with unique dimensions which depend on the function and size of the equipment placed. The technical solutions for the underground crushing plant and associated structures envisage construction of chambers with the height of up to 35 m and the width of up to 20 m at the depths exceeding 800–1000 m. Such conditions call for a closer attention to be paid to the mine support parameters, especially the bolting depth. A block geomechanical model was designed in the Micromine Mining Software for the rock mass of the new main ore pass. Geotechnical boreholes logs and results of physical and mechanical rock tests were used as the input data for the model. Four domains were identified in the block geomechanical model for subsequent numerical modelling. A 3D model of the stress-and-strain state of the rock mass was made using the CAE Fidesys software based on the Micromine wire-frame model of the main ore pass. The history of the rock mass incremental loading was reconstructed for correct simulation of its stress-and-strain state. Prior to the excavation, the rock mass is pre-stressed by the weight of the rock strata. The excavation phase was then simulated in the stepwise manner. An array of points with the values of maximum principal stresses was downloaded from the numerical model post-processing program and interpolated into the block geomechanical model to refine the SRF parameter of the Barton's Q rating. Based on the obtained Q values, the mine support parameters for chambers were determined using the Barton, Hutchinson and Potvin empirical methods.

Keywords: rock mass, bolting, rock pressure, excavation, ore pass, underground structures, bolting depth, rock bolt, geomechanical block model, numerical modelling, stress-and-strain state, physical and mechanical properties, Micromine, CAE Fidesys

For citation: Sonnov M.A., Trofimov A.V., Rumyantsev A.E., Shpilev S.V. Application of Numerical and Block Geomechanical Modelling to Determine Parameters of Large-Section Chambers. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2): 127–131. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-127-131.

Введение

Предварительный анализ исторической информации на участке недр, рассматриваемом для строительства комплекса выработок капитального рудоспуска с весьма разнообразными видами подземных сооружений, выявил достаточно сложное с точки зрения устойчивости геологическое строение. По совокупности факторов, обосновывающих необходимость получения актуальных данных, инициировано бурение геотехнических скважин вблизи мест потенциального заложения вариантов строительства. Для получения актуальных физико-механических свойств испытан керн из пробуренных скважин. Полученное геотехническое описание скважин и результаты физико-механических испытаний использованы для геотехнических расчетов, анализа устойчивости и построения блочной геомеханической модели участка в среде ГИС Micromine. По результатам ранее выполненных геотехнических исследований выбрано место заложения нового рудоспуска и обособлены его параметры [1–3].

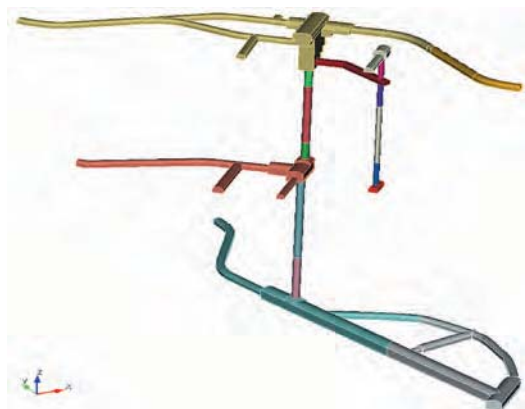


Рис. 1
Трехмерная модель комплекса выработок рудоспуска

Fig. 1
3D model of the main ore pass complex

В рамках текущего исследования рассмотрены результаты создания численной модели участка в CAE Fidesys, интеграция с блочной геомеханической моделью, уточнение рейтинга Q Бартона для массива. Итогом работы являются параметры крепления по методикам Бартона [4], Хатчинсона [5] и Потвина [6], а также оценка глубины распространения пластических деформаций по численной модели. Выполнено сопоставление глубины штангования по эмпирическим методикам и по численному моделированию.

Методы

Для исключения влияния краевых эффектов рассматриваемая область модели помещалась в объём большого размера, размер объёма с юга на север – ось Y 950 м, с запада на восток – ось X 900 м, по глубине – ось Z 1200 м (рис. 2). После создания моделей в среде CAE Fidesys проводился ряд булевых операций, а также операции по регуляриза-

ции и оптимизации объемов их сращивания. Производилось разделение рудных тел на отдельные объёмы для осуществления пошагового моделирования. Сетка конечных элементов сгенерирована с помощью специального модуля программы Fidesys, автоматически учитывающего сгущения сетки в местах концентрации напряжений. Количество конечных элементов в модели 2625 205 с количеством узлов 505 826.

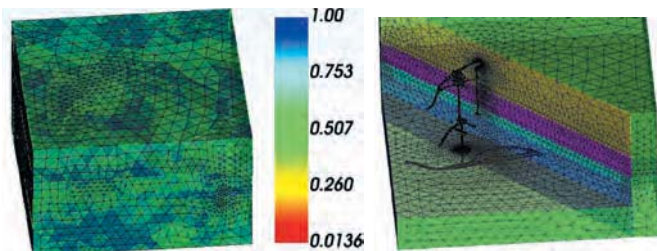


Рис. 2
Оценка качества сетки конечных элементов и сгущение сетки в потенциальных местах концентрации напряжений

Fig. 2
Quality assessment of the finite element mesh and densification of the mesh at potential stress concentration points

После проверки качества сетки конечных элементов назначены параметры материалов. Для этого в модели выделены группы из объёмов, называемые блоками. Каждый блок включал в себя не менее одного объёма, при этом выработкам и стволам, попавшим в определённый домен, присваивались физико-механические свойства геотехнического домена (рис. 3) [1].

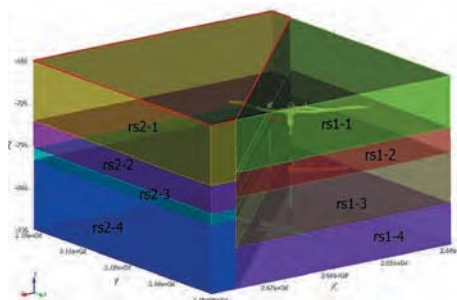


Рис. 3
Выделение в модели геотехнических доменов с индивидуальным набором физико-механических свойств (!)

Fig. 3
Identification of geotechnical domains with an individual set of physical and mechanical properties in the model (!)

Для моделирования напряженно-деформируемого состояния массива наложены граничные условия, которые включали в себя:

- запрещение перемещений по всем направлениям для нижней плоскости модели;
- запрещение перемещений для боковых граней по нормальям к поверхностям;

– в качестве нагрузок в моделях задан собственный вес пород до поверхности.

Концепция моделирования подразумевает последовательное ведение проходки выработок путём постепенного удаления блоков в моделях на разных шагах расчёта:

Шаг 1. Моделируется исходное состояние массива до начала проходки.

Шаг 2. Моделируется проходка протяжённых выработок и камер на всех горизонтах.

Шаг 3 и 4. Моделируется проходка верхней и нижней части ствола рудоспуска.

Результаты

Приведем некоторые результаты моделирования. Локальные зоны неустойчивости в секциях рудоспуска наблюдаются только в геотехническом домене rs1-3 (рис. 4). Локальные очаги с запасом устойчивости <1 в секциях рудоспуска по теории прочности Друкера-Прагера отсутствуют. Напряжения в остроугольном сопряжении доходят до 50 МПа. Растягивающие напряжения в почве выработок могут приводить к процессам выдавливания почвы. В кровле выработок из-за сводчатой формы растягивающие напряжения не оказывают значительного воздействия. Максимальные напряжения до 60 МПа формируются в замковых частях выработок большого сечения, а также в сопряжениях выработок меньшего сечения. В остроугольных концентраторах напряжения доходят до 70 МПа, но при этом не вносят значительного вклада в общее напряженно-деформированное состояние (НДС) модели.

анкера зоны пластических деформаций массива. Пластические деформации сконцентрированы на сопряжениях и в замковых частях камерных выработок. Анализ запаса прочности в моделях по теориям Кулона-Мора и Друкера-Прагера показал, что в модели, по обеим теориям прочности, кровля камеры будет находиться в неустойчивом состоянии при отсутствии крепления горных выработок (рис. 5).

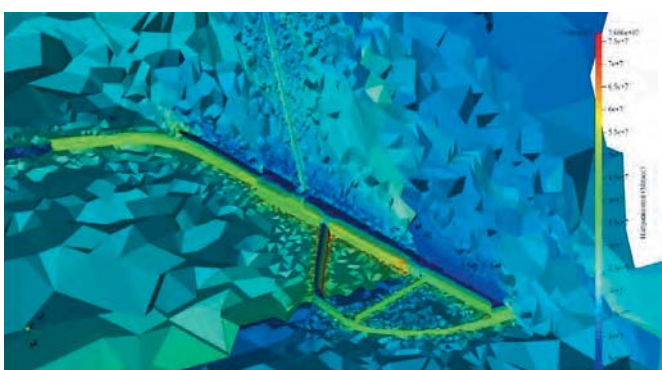
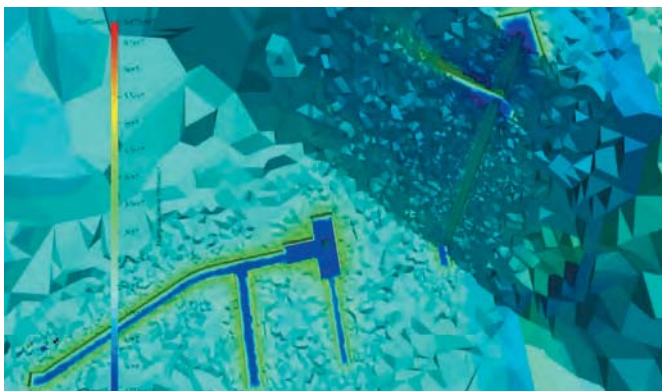
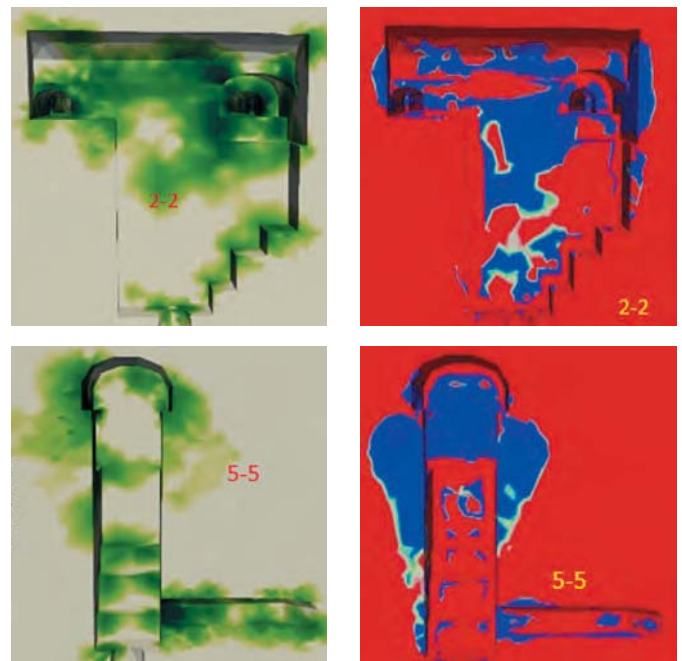
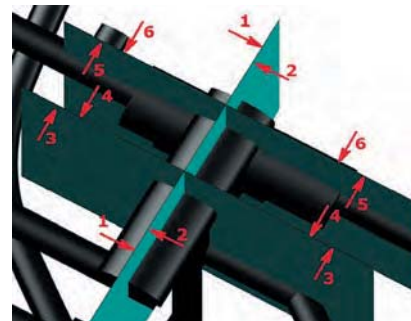


Рис. 4
Главные напряжения в аксонометрическом виде горизонта

Fig. 4
Principal stresses in axonometric view of the mine level

Рис. 5
Разрезы и направление «взгляда» в постпроцессоре Fidesys: слева – запас прочности (Кулон-Мор), справа – пластические деформации (Друкер-Прагер) (!)

Fig. 4
Cross-sections and the gaze direction in the Fidesys post-processing program: left - safety margin (Coulomb-Mohr), right - yield (Drucker-Prager) (!)

По разрезам камеры комплекса разгрузки выполнена оценка необходимой глубины штангования путем анализа картин распределения запаса прочности и пластических деформаций. Критерием является превышение глубиной

Объёмные твердотельные численные модели рудоспуска созданы в единых координатах, применённых в блочной геомеханической модели. Это позволяет выгрузить напряжения по Мизесу и максимальные главные напряжения для расчётов параметров крепей в блочную геомеханическую модель.

Для расчётов параметров крепей по результатам моделирования в блочную геомеханическую модель были выгружены поля точек из узлов конечных элементов с напряжениями по Мизесу и максимальные главные напряжения. Блочная модель разбита на блоки размером 2x2x1, в которые интерполированы (методом ближайшей пробы) значения максимальных главных напряжений, максимальных пластических деформаций, значения пластических деформаций и напряжения по Мизесу (рис. 6).

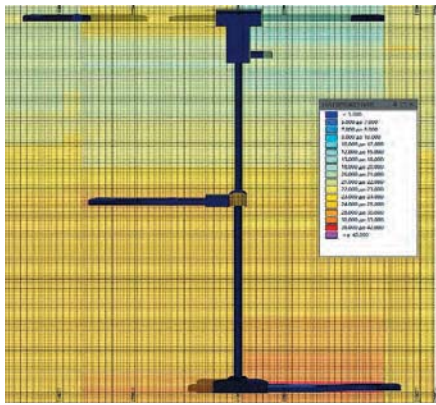


Рис. 6
Распределение интерполированных значений максимальных главных напряжений в блочной геомеханической модели участка (!)

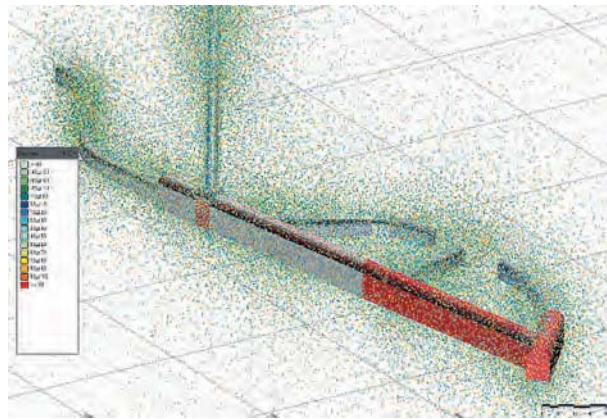


Fig. 6
Distribution of interpolated values of maximum principal stresses in the block geomechanical model of the site (!)

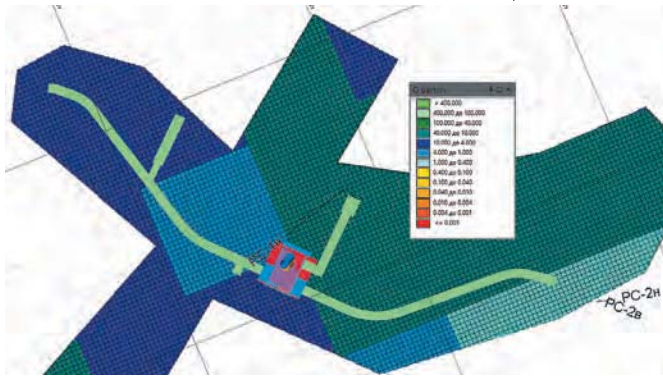


Рис. 7
Распределение рейтинга массива Q по Бартону в блочной геомеханической модели (срез по откаточному горизонту) (!)

Fig. 7
Distribution of the Barton's Q rating of the rock mass in the block geomechanical model (cross-section along the haulage level) (!)

По данным полученного поля напряжений определен рейтинг SRF (фактор учета напряжений) и рассчитан рейтинг массива Q Бартона для блоков массива. В блочную модель также подгружены каркасы комплекса выработок рудоспуска (рис. 7).

По рейтингу Q определены параметры крепления для выработок комплекса выработок рудоспуска. Комплекс выработок рудоспуска представлен весьма разнообразны-

ми видами подземных сооружений, как правило, оригинальных размеров, зависящих от функционального назначения и габаритов размещаемого оборудования. В связи с чем этим требуется уделять повышенное внимание параметрам крепления. Для конкретных размеров поперечного сечения, для нестандартных выработок и наиболее ответственных камер большого сечения глубина штангования уточняется по методикам Бартона, Хатчинсона и Потвина, а также с учетом результатов численного моделирования НДС. Критерием оценки, влияющим на параметры крепления, является глубина распространения пластических деформаций в массиве, полученных при численном моделировании НДС. Результаты показали удовлетворительную сходимость, что подтвердило возможность использования предложенного подхода для уточнения параметров крепления подземных сооружений большого сечения. Принятая глубина штангования округлялась кратно 0,5 м из соображений применения самозабуривающихся анкеров с длиной секции 1,5, 2 и 2,5 м. В табл. 1 представлены результаты по наиболее ответственным камерам.

Выводы

Глубина штангования, полученная по эмпирическим методикам, сопоставлена с глубиной распространения пластических деформаций по критерию Друкера-Прагера при численном моделировании и с запасом прочности по критерию Кулона-Мора. Результаты показали удовлетворительную сходимость, что подтвердило возможность использования предложенного подхода для уточнения параметров крепления подземных сооружений большого сечения.

Таблица 1
Изогипсы пластов, на уровне
Результаты определения
глубины штангования

Table 1
Results of the bolting depth
definition

Назначение выработки	Рейтинг Q Бартона	Высота, м	Ширина	Гидравлический радиус, м	Глубина штангования, м				
					Методика Бартона	Методика Хатчинсона	Методика Потвина	Численное моделирование, по критерию пластических деформаций, м	Принятая глубина штангования, м
Комплекс разгрузки Сопрягаемая выработка, кровля	3	8	8	4	3,2	4,8	3	3,4	3,5
Комплекс разгрузки Кровля	3	34	13	4,7	4	5,8	5,7	Нет пластики	5,5
Комплекс дробления Вертикальная стенка	3	34	21	6,49	7,1	7,6	7,5	6,9	7,5

Список литературы

1. Марысюк В.П., Шиленко С.Ю., Трофимов А.В., Кузьмин С.В. Оценка рисков строительства капитального рудоспуска в сложных горно-геологических условиях на основе комплексных геотехнических исследований. *Горный журнал*. 2020;(1):62–66. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.12.
2. Трофимов А.В., Соннов М.А., Вильчинский В.Б., Киркин А.П., Баженова А.В. Выбор места возведения рудоспуска на основе применения конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса CAE Fidesys. *Горная промышленность*. 2019;(1):70–73. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-56-59.
3. Кокоев С.Г., Юсупов Г.А., Феоктистов А.Ю., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Кузьмин С.В. Обоснование параметров капитального рудоспуска на основе дискретно-элементного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S37):158–167.
4. Barton N., Grimstad E. *Forty years with the Q-system in Norway and abroad*. Fjellsprengningsteknikk NFF Oslo; 2014. 25p. Available at: <https://ru.scribd.com/document/358170884/Barton-N-and-Grimstad-E-2014-Forty-Years-With-the-Q-System-in-Norway-and-Abroad-Fjellsprengningsteknikk-NFF-Oslo-25p>
5. Nickson S.D. Cable support guidelines for underground hard rock mine operations. MASc. thesis, Dept. Mining and Mineral Processing, University of British Columbia; 1992. Available at: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0081080>
6. Potvin Y., Milne D. Empirical cable bolt support design. In: Kaiser P.K., McCreath D.R. (eds) *Rock Support in mining and underground construction, proc. Int. symp. On rock support, Sudbury*. Rotterdam: A.A. Balkema; 1992. P. 269–275.

References

1. Marysyuk V.P., Sabyanin G.V., Trofimov A.V., Kirkin A.P. Designing blast patterns by calculation of fracture zones and ore zoning by physical and mechanical properties. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):62–66. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2020.01.12.
2. Sonnov M.A., Rumyantsev A.E., Trofimov A.V., Vilchitskiy V.B., Kirkin A.P., Bazhenova A.V. Selection of the location for ore pass construction on the basis of finite element modeling with the use of CAE Fidesys software suite. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2019;(1):70–73. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2019-1-143-56-59.
3. Kokoev S.G., Yusupov G.A., Feoktistov A.Yu., Trofimov A.V., Rumyantsev A.E., Kuzmin S.V. Substantiation of the main ore pass parameters based on discrete-element modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(S37):158–167. (In Russ.)
4. Barton N., Grimstad E. *Forty years with the Q-system in Norway and abroad*. Fjellsprengningsteknikk NFF Oslo; 2014. 25p. Available at: <https://ru.scribd.com/document/358170884/Barton-N-and-Grimstad-E-2014-Forty-Years-With-the-Q-System-in-Norway-and-Abroad-Fjellsprengningsteknikk-NFF-Oslo-25p>
5. Nickson S.D. Cable support guidelines for underground hard rock mine operations. MASc. thesis, Dept. Mining and Mineral Processing, University of British Columbia; 1992. Available at: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0081080>
6. Potvin Y., Milne D. Empirical cable bolt support design. In: Kaiser P.K., McCreath D.R. (eds) *Rock Support in mining and underground construction, proc. Int. symp. On rock support, Sudbury*. Rotterdam: A.A. Balkema; 1992, pp. 269–275.

Информация об авторах

Соннов Максим Александрович – действительный член Академии горных наук, заместитель генерального директора, ООО «Фидесис», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com.

Трофимов Андрей Викторович – кандидат технических наук, заведующий центром физико-механических исследований, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7557-9801>; trofimovav@nornik.ru.

Румянцев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2204-961X>; rumyantsevae@nornik.ru.

Шпилев Сергей Владимирович – главный инженер проекта, ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: ShpilevSV@nornik.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.02.2021

Поступила после рецензирования: 24.02.2021

Принята к публикации: 26.02.2021

Information about the authors

Maxim A. Sonnov – full-fledged member of the Academy of Mining Sciences, Deputy Director General, Fidesys LLS, Moscow, Russian Federation; e-mail: Sonnov@cae-fidesys.com.

Andrey V. Trofimov – Candidate of Technical Sciences, Head of Physical and Mechanical Testing Centre, Gipronickel Institute, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7557-9801>; trofimovav@nornik.ru.

Alexandr E. Rumyantsev – Candidate of Technical Sciences, Leading Research Associate, Gipronickel Institute, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2204-961X>; rumyantsevae@nornik.ru.

Sergey V. Shpilev – Chief Project Engineer, Gipronickel Institute, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: ShpilevSV@nornik.ru.

Article info

Received: 15.02.2021

Revised: 24.02.2021

Accepted: 26.02.2021