

УДК 622.831.32

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.М. Иоффе, Д.В. Величко

АО «ВНИПИПРОМТЕХНОЛОГИИ»

В статье представлены результаты НИР по обоснованию безопасных параметров горных работ с применением методов численного моделирования. Для расчетов использованы современные программные продукты, базирующиеся на методике Хука-Брауна и МКЭ (методе конечных элементов).

Ключевые слова: *устойчивость горных выработок, критерий Хука-Брауна, МКЭ, численное моделирование.*

В данной статье рассматриваются результаты научно-исследовательских работ, выполненных для объектов ПАО «ППГХО» и участка захоронения РАО «Енисейский».

Для расчетов использованы современные программные продукты, базирующиеся на критерии Хука-Брауна [2], а также на методе конечных элементов (МКЭ). Это сеточный метод, предназначенный для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями [3]. Одной из практических реализаций метода конечных элементов для нужд геомеханики и горного дела является программный пакет Phase 2 фирмы Rocscience Inc.

Для объектов ПАО «ППГХО» предложены современные методы расчетов по определению безопасных и устойчивых обнажений горных и искусственных массивов очистных блоков, при отработке запасов месторождений Стрельцовского рудного поля камерными и слоевыми системами. При этом учитывались важные сведения о природе образования и изменения рудного и горного массивов на месторождениях на протяжении длительного периода (до настоящего времени):

- геологоструктурная характеристика;
- минерало-петрографическая характеристика рудного и вмещающего породного массивов;

ESTIMATION OF STABILITY OF MINE WORKINGS USING METHODS OF NUMERICAL SIMULATION

A.M. IOFFE, D.V. VELICHKO

This article contains information about number modelling of estimating safety conditions of mining. Software that was used for modelling is based on FEM (Finite Element Method) and Hoek-Brown criteria.

KEYWORDS: *stability, hoek-brown criteria, fem, modelling.*

- характеристика рудных зон и морфологические особенности рудных залежей;
- рудоносность рудного массива;
- основные физико-технические свойства горных пород;
- прогнозная классификация горных пород по трещиноватости;
- устойчивость рудовмещающих и рудных массивов, способность их сохранять длительное время форму эксплуатационных выработок без заметных признаков деформации, за исключением проявления трещин и небольших отколов, вызываемых внутренним напряженным состоянием пород.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ХУКА-БРАУНА

Хук и Браун представили свой критерий устойчивости как обоснование аналитических данных для проектирования подземных горных выработок. Критерий был выведен Хуком по результатам исследований хрупкого разрушения ненарушенных пород с учетом моделей Брауна, описывающих поведение трещиноватой горной породы [4].

По результатам моделирования на контуре выработок определяются следующие показатели НДС:

1. Максимальные напряжения (σ_1).
2. Минимальные напряжения (σ_3).
3. Вертикальные смещения. (Vertical Displacement).

4. Горизонтальные смещения (Horizontal Displacement).
5. Полные смещения. (Total Displacement).
6. Коэффициент запаса. (Strength Factor).

По методике ВНИМИ [1] в качестве критерия устойчивости пород следует принимать значение их смещений на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее эксплуатации без крепи в соответствии с табл. 1

Отнесение выработки к той или иной категории устойчивости следует проводить по абсолютному значению максимальных смещений пород на контуре поперечного сечения. Параметры очистных выработок принимают такими, чтобы обеспечить устойчивое состояние боков и кровли выработок при очистной выемке вплоть до погашения выработанного пространства.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Одним из основных показателей, используемых данной методикой, является показатель степени нарушения породного массива GSI (Geological Strength Index), определяемой в соответствии с методикой [3, 4].

Выполнено вычисление параметров природного напряженного состояния (ППНС) вмещающих породных массивов месторождений Стрельцовского рудного поля для глубины в диапазоне от 50 до 1200 м с интервалом через каждые 50 м. Установлено, что значение отношения вертикальных напряжений к горизонтальным составляет 1,8.

Вмещающие породы и руды по крепости отличаются незначительно, обладая высокими прочностными свойствами. Временное сопротивление сжатию изменяется в пределах от 90 до 250 МПа, коэффициент крепости по шкале Протодяконова от 16 до 20 для гранитов, 12–15 для сиенит-порфиров и 12–14 для доломитизированных известняков. Объемная масса пород и руд колеблется от 2,37 до 2,8 т/м³ и в среднем принята 2,45 т/м³.

Другие физико-механические свойства приведены в таблице 3, где: ρ – объемный вес; $R_{эфф}$ – эффективная

пористость; K_v – коэффициент водонасыщения; E_d – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКИ РУДЫ В УСЛОВИЯХ РУДНИКОВ ППГХО

Анализ опыта отработки месторождений Стрельцовского рудного поля показал, что объектами разработки являются не отдельные обособленные рудные тела, а продуктивные части рудных залежей в пределах эксплуатационных блоков. Анализ признаков типизации рудных залежей позволил установить, что определяющим является средняя мощность рудных тел залежи, характеризующаяся закономерным распределением запасов руды по классам мощности. По данному признаку все рудные залежи можно разделить на три типа:

- 1 тип – мощные залежи (ср. мощность 8 м);
- 2 тип – залежи средней мощности (ср. мощность 3,5 м);
- 3 тип – маломощные залежи (мощностью до 1,2 м).

Установлено, что количество маломощных рудных тел до 1,2 м по месторождениям весьма значительное и по отдельным рудникам составляет 31%. Соответственно их валовая отработка приведет к большому проценту разубоживания (до 50%) и резкому ухудшению технико-экономических показателей (ТЭП) рудников. Доказано, что на каждый процент роста разубоживания следует ожидать снижения выпуска продукции и повышения ее себестоимости на 0,6–0,7%. Поэтому для снижения разубоживания при разработке маломощных рудных тел необходимо использовать селективную технологию ведения очистных работ.

На основании этой методики установлено, что для условий рудников ПАО «ППГХО» селективная выемка экономически целесообразна на рудных телах мощностью 0,9–1,0 м. Данная методика включает применение МКЭ для оценки устойчивости очистных выработок в зависимости от степени заполнения их твердеющей закладкой.

ТАБЛИЦА 1.

Критерии устойчивости пород

Категории устойчивости пород	Оценка состояния устойчивости пород	Смещение U, мм		
		Осадочные породы (песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, уголь и др.)	Изверженные породы (граниты, диориты, порфириды и др.)	Соляные породы (каменная соль, сильвинит, карналит и др.)
I	Устойчивое	До 50	До 20	До 200
II	Среднеустойчивое	Св. 50 до 200	Св. 20 до 100	Св. 200 до 300
III	Неустойчивое	>>200>>500	>>100>>200	>>300>>500
IV	Очень неустойчивое	Св. 500	Св. 200	Св. 500

ТАБЛИЦА 2.

Средние значения физико-механических свойств пород

Литологическая разность	ρ г/см ³	$P_{\text{эфф}}$ %	Кв, % 45сек	Ед.10 ⁻⁵ кг/см ²	μ	G-10 ⁵ , кг/см ²
Базальты	2,58	7,77	3,10	3,84	0,28	1,47
Фельзиты	2,44	8,21	3,38	3,95	0,28	1,54
Трахидациты	2,50	6,82	2,81	4,26	0,29	1,65
Туфы фельзитов	2,39	9,70	4,09	3,52	0,28	1,36
Песчаники, конгломераты, граниты	2,45	8,66	3,60	3,05	0,32	1,16

Разработка научно-методических рекомендаций по определению параметров устойчивости горного массива с заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой не более 67% для условий рудников ПАО «ППГХО»

Горно-геологические условия и параметры залегания рудных тел на рудниках предопределили применение в качестве основной систему «Горизонтальные слои с закладкой» (ГС) с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями как наиболее обеспечивающей безопасность очистной выемки. Технология и условия применения системы разработки определены стандартами предприятия и технологическими регламентами. При выемке запасов руды с закладкой (коэффициент заполнения 0,80÷0,85) развитие процессов сдвижения и деформаций не выходит из стадии устойчивого состояния вмещающих пород и земной поверхности. Фактический средне-взвешенный коэффициент заполнения выработанного пространства твердеющей закладкой при таких нормативах составляет 0,81.

В настоящее время накоплены новые данные наблюдений за сдвижением горных пород и закладочных массивов при отработке рудных тел различной морфологии и определена перспектива внедрения мобильного, малогабаритного и узкозахватного оборудования. С учетом фактических данных о полноте закладки выработанного пространства и результатов инструментальных наблюдений появилась информация о возможности изменения коэффициента заполнения очистных выработок закладкой в сторону его уменьшения. При производстве очистных работ имеется практика отработки запасов очистных блоков, когда на момент полного погашения выработанного пространства коэффициент заполнения закладкой составлял 67% и менее, при этом закладываемые массивы сохраняют устойчивость.

Технические решения, направленные на снижение объемов закладки выработанного пространства при отработке запасов месторождений, позволят уменьшить издержки по ПАО «ППГХО». По результатам научно-исследовательских работ была разработана «Инструкция по производству горных работ в предо-

хранительных зонах шахт ПАО «ППГХО».

Проектом для отработки месторождений «Аргунское» и «Жерловое» предусматриваются следующие системы разработки:

1. Слоевая система разработки (слабонаклонные слои) с ведением очистных работ в направлении сверху вниз в двух вариантах:

- при нормальной высоте слоя (72,4%);
- при повышенной высоте слоя (0,9%).

2. Система разработки с отбойкой руды из подэтажных выработок в двух вариантах:

- камерная система разработки с магазинированием взорванной руды (подэтажное магазинирование, 25,2%);
- щелевая система разработки с отбойкой руды на открытую камеру – щель (подэтажные штреки – 1,5%).

Ликвидация (погашение) выработанного пространства при слоевой и камерной системах разработки производится твердеющей закладкой. При щелевой системе разработки выработанное пространство предполагается ликвидировать, в основном, путем подрыва вмещающих пород и, частично, твердеющей закладкой.

В соответствии с новыми техническими решениями по отработке запасов месторождений доля камерных систем возрастает до 90%, что позволит существенно улучшить технико-экономические показатели (ТЭП) рудника. Вопросы геомеханики при этом становятся весьма актуальными.

При проведении инженерно-геологическое районирования месторождений по условиям устойчивости рудных блоков выделено четыре категории блоков по состоянию устойчивости:

1. Устойчивые (У);
2. Средней устойчивости (СУ);
3. Неустойчивые (НУ);
4. Весьма неустойчивые (ВНУ).

К устойчивым относятся рудные блоки, находящиеся на значительном расстоянии от разломов. К среднеустойчивым относятся блоки, расположенные от разломов на расстоянии в 2–3 меньшем, чем устойчивые. К неустойчивым – расположенные в непосред-

ственной близости от разломов, но не пересекаемые ими, к весьма неустойчивым относятся блоки, пересекаемые разломами. По результатам районирования установлено, что к устойчивым относятся 40 блоков, к среднеустойчивым 113 блоков, к неустойчивым – 60 блоков, к весьма неустойчивым – 49 блоков.

Выполнено моделирование по блоку 23С1 панель 3 (гор. +90 - +150 - +210), обрабатываемого системой с междуканальными целиками (МКЦ) при ширине целика 10 м. Установлено, что смещения по стенкам камеры находятся в диапазоне 78–105 мм, смещения по потолочине – 13 до 42 мм. Смещения в целике находятся в диапазоне 15–34 мм, при коэффициенте запаса 1,07. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что устойчивость ленточного целика и камеры при проектных параметрах по блоку 23С1 будет обеспечена.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОЕКТА ОТРАБОТКИ БЛОКА 4А – 703 (РУДНИК №1)

Моделирование блока выполнено в трех вариантах:

1. Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) выработок и их влияние на состояние ствола без закладки.

2. Оценка НДС выработок и их влияние на состояние ствола при степени заложности выработанного пространства 67%.

3. Оценка НДС выработок и межблоковых целиков в продольном сечении без закладки.

При полном выпуске руды для поперечного сечения без закладки максимальные напряжения принимают значения в диапазоне 14–150 МПа (рис. 1), минимальные – 3–57 МПа, Полные смещения по стенкам принимают значения 120–150 мм, а на межблоковом целике – 74–101 мм (рис. 2). Это указывает на то, что стенки выработок начнут со временем обрушаться, а межблоковый целик будет сохранять свою устойчивость длительное время. Потолочина будет сохранять свою устойчивость так как максимальные полные смещения на ней не будут превышать 60 мм.

При частичной закладке выработанного пространства на 67% для поперечного сечения максимальные напряжения принимают значения в диапазоне 12–132 МПа, минимальные – 4–44 МПа. Полные смещения по стенкам принимают значения 18–180 мм, а на межблоковом целике – 85–120 мм. Это указывает на то, что стенки выработок начнут со временем обрушаться, а межблоковый целик будет сохранять свою устойчивость длительное время. Потолочина будет сохранять свою устойчивость так как максимальные полные смещения на ней не будут превышать 55 мм.

В продольном сечении максимальные напряжения будут находиться в интервале 13–143 МПа, минимальные – 2,5–52 МПа. Полные смещения на внешних стенках – 109–200 мм, на межблоковых целиках

68–105 мм. Это указывает на то, что целики сохраняют свою устойчивость во времени, а внешние стенки будут обрушаться.

Установлено, что при обработке блока 4а-703 без закладки зона влияния, граница которой оконтуривается изолинией полных смещений в 20 мм (рис. 3), распространяется на 309 метров в массив. В соответствии с методикой ВНИМИ при смещениях до 20 мм массив относится к категории устойчивых. При закладке выработанного пространства это расстояние уменьшается до 161 м. Соответственно, сохранность охраняемого ствола обеспечивается с достаточной надежностью, поскольку расстояние от него до эксплуатационного блока составляет порядка 400 м.

Определено, что максимальные смещения земной поверхности в случае полной подработки не превышают 10 мм, размер мульды составляет порядка 2000 м. Вместе с тем, учитывая незначительную величину оседаний, какого-либо влияния на состояние объектов в зоне влияния горных работ не ожидается.

По результатам выполненных расчетов установлено, что охраняемые объекты на дневной поверхности после обработки блока 4а-703 без закладки остаются неподрезанными.

ОБОСНОВАНИЕ ПО МИНИМАЛЬНО-ДОПУСТИМОМУ ОБЪЕМУ ЗАПОЛНЕНИЯ ПОГАШЕННОГО ПРОСТРАНСТВА ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКОЙ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

На основе анализа проектной документации на отработку месторождений ПАО «ППГХО» все геологические блоки по каждому месторождению сгруппированы по степени устойчивости в четыре группы (табл. 3):

Анализ результатов многовариантного геомеханического моделирования показал, что при сниженном до 67% коэффициенте погашения отработка устойчивых геологических блоков может проводиться без крепления, отработка блоков, характеризующихся средней устойчивостью – с частичным креплением до 50% блоков. Остальная часть блоков со средней устойчивостью, неустойчивые и весьма неустойчивые блоки, приуроченные к зонам разломов, необходимо погашать с коэффициентом не менее 81%.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что на всех обрабатываемых месторождениях ориентировочно половина от объема выработанного пространства может заполняться твердеющей закладкой со сниженным до 67% коэффициентом погашения.

При годовом объеме добычи порядка 2,5 млн т руды объем выработанного пространства составит 1,0 млн м³, там, где возможна недозакладка – 0,5 млн м³. Недозакладка составляет 17% от 0,5 млн м³, соответственно, сэкономленный объем закладки равен 85 тыс м³. При стоимости 1,0 м³ закладки около 1700 руб. нетрудно подсчитать общий экономический

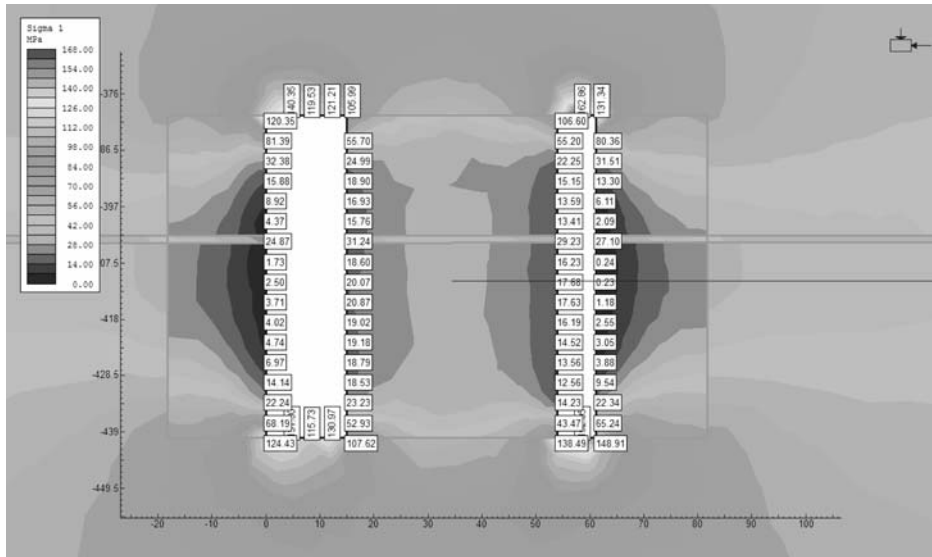


РИС. 1.
Результаты численного моделирования с определением максимальных напряжений на контуре выработанного пространства (Sigma1, МПа)

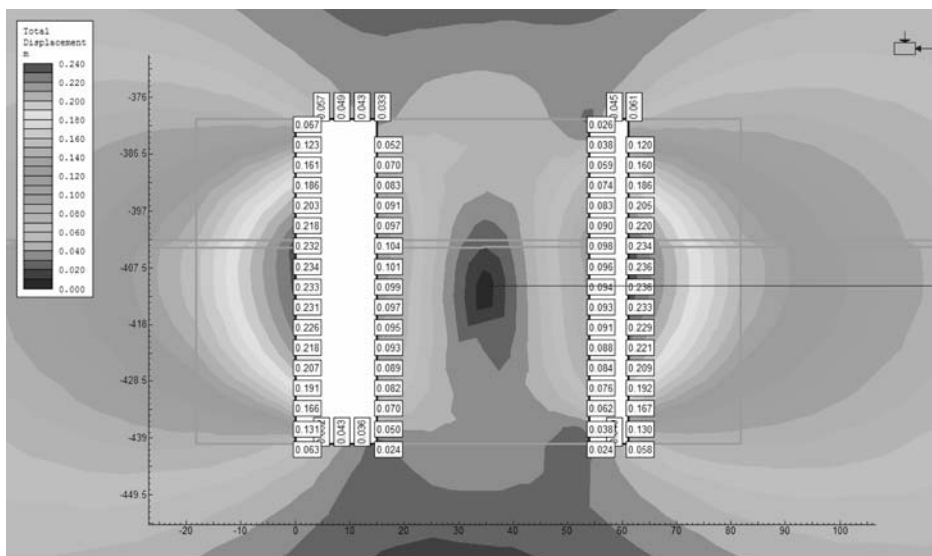


РИС. 2.
Результаты численного моделирования полных смещений на контуре выработанного пространства, (Total displacement, м)

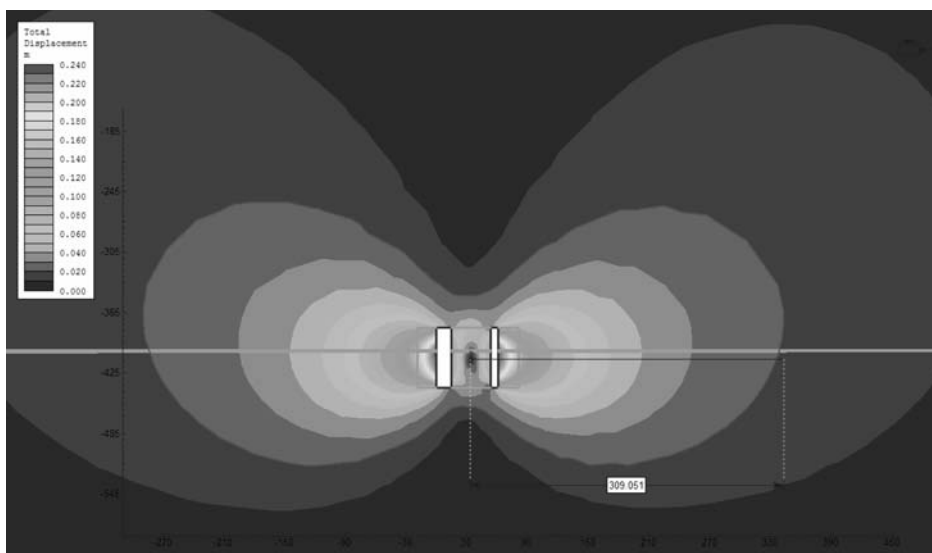


РИС. 3.
Определение границ влияния для случая полной подработки по полным смещениям в массиве

ТАБЛИЦА 3.

Геологические блоки месторождений ПАО «ППГХО» по степени устойчивости

Месторождение	У (устойчивые)	СУ (средне-устойчивые)	НУ (неустойчивые)	ВНУ (весьма не устойчивые)
Юбилейное	18	11	22	12
Новогоднее	2	3	5	3
Весеннее	1	4	2	1
Тулукуй	10	21	25	8
Лучистое		17	11	6
Октябрьское	1	18	9	34
Мартовское		69	30	32
Мало-Тулукуевское		122	104	56
Всего	32	261	208	152

эффект, который составит 144 500 000 рублей в год. Расход цемента (стоимость 1,0 т – 5 000 руб.) снизится на 9,0–10,0 тыс. т в год. Расчет выполнен без учета рудника № 6.

Учитывая, что удельный вес камерных систем по руднику № 6 намечено довести до 90%, объемы закладки снизятся ориентировочно в 2 раза, примерно, до 200 тыс. м³, соответственно, экономический эффект составит 340 000 000 рублей в год. Расход цемента (стоимость 1,0 т – 5 000 руб.) снизится на 30,0 тыс. т в год.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНЫХ ЗОН ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ РАО НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ»

На основании вышеуказанных методик для породного массива участка «Енисейский», вмещающего подземные сооружения, построены модели сечений запроектированных вертикальных и горизонтальных подземных выработок с конструктивными параметрами. По каждой выработке проведена оптимизация модели конечных элементов с учетом параметров, формы выработок и их сопряжений, структуры, степени нарушения и обводненности вмещающего породного массива.

Выполнены многовариантные расчеты с детальным анализом НДС. Определены размеры зон пластических, упругопластических и упругих деформаций вокруг выработок, получены диаграммы состояния крепи выработок, характеризующие работоспособность и несущую способность ее конструктивных элементов.

Анализ этих расчетов показывает, что в рассматриваемых горно-геологических условиях все подземные выработки объекта при принятых проектом конструктивных параметрах обладают достаточной устойчивостью. Потолочины и вертикальные стенки выработок, по контуру имеют смещения в диапазоне 20–100 мм.

На величину максимальных напряжений обводненность существенного влияния не оказывает. Так, например, по камере захоронения без учета водопритока их значения по потолочине достигают 6,8 МПа, по стенке – 21,7 МПа, с учетом водопритока меняются незначительно – до 9,7–20,0 МПа.

ВЫВОДЫ

Известные методы обоснования выработанного пространства, основанные на использовании номограмм [1] требуют значительных затрат времени на получение результатов и не обеспечивают необходимую точность расчетов.

Применение методов численного моделирования, учитывая разнообразия инженерно-геологических условий массива вмещающих пород, обеспечивает повышение надежности выполняемых вычислений и снижает затраты времени на вычисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Актуализированная редакция СНиП11-94-80. Подземные горные выработки. ВНИМИ. СП 91.2012.
2. Программный алгоритм Phase2 (лицензия VNIPIpromtehnologii Copy: 7329A Serial#: HA67BGHB3V-FD896H8).
3. ZIENKIEWIC O.C. The finite element method // Zienkiewicz. McGraw Hill, London. V. 1. С. 977.
4. ХОЕК Е., CARRANZA-TORRES С., CORKUM В. Hoek – Braun failure criterion-2002 edition// Proceedings of NARMS. 2002. С. 267–273.

Иоффе Александр Менделеевич,
к.т.н., в.н.с. отдела открытых горных работ АО «ВНИПИ-
промтехнологии»

Величко Дмитрий Владимирович,
ведущий инженер отдела открытых горных работ
АО «ВНИПИпромтехнологии»

☎ 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 33,
e-mail: loffe.A.M@vnipt.ru, Velichko.D.V@vnipt.ru