ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(6):167-181
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.02:51-74:51-72 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_167

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПЛОТНЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОЦЕНКЕ ВЕДЕНИЯ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ТЕКТОНИЧЕСКИ-НАПРЯЖЕННЫХ ЗОН

А.С. Пугач

ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: as.pugach@misis.ru

Аннотация: Представлена разработанная математическая модель уплотнения горных пород, предназначенная для оценки безопасности ведения работ при добыче угля. Данная модель разработана для условий ведения горных работ в тектонически-напряженных зонах, вблизи геологических нарушений. Разработанная математическая модель позволяет учесть дополнительные модули деформации: секущий модуль, модуль деформации при нагружении образца при всестороннем сжатии и модуль общей деформации при трехосной разгрузке. Приведены примеры собственного решения в сравнении с оценкой НДС вблизи одиночного разлома и совместного влияния двух нарушений с учетом горизонтальных тектонических составляющих горного давления. Решена задача по распределению значений изгибающих моментов, приводящих к искривлению секций крепи вдоль контуров трех горных выработок с учетом их взаимного влияния. Также было рассчитано распределение напряжений вокруг очистных выработок при действии тектонических и гравитационных сил. Представленные результаты моделирования по разработанной математической модели хорошо согласуются с результатами расчетов Н.Н. Фотиевой, И.А. Турчанинова и В.Н. Морозова, выполненных для определения нагрузок в окрестности выработок, оценки влияния гравитационной и тектонической составляющей горного давления, а также для оценки влияния нарушений. Предложенная математическая модель уплотнения горных пород находит применение при осуществлении регионального прогноза на глубоких горизонтах угольных шахт в условиях тектонически напряженных зон.

Ключевые слова: шахта, безопасность, горный удар, математическая модель, горные породы, тектонически напряженные зоны, напряженно-деформированное состояние, глубокие горизонты, модель уплотнения горных пород, тектонические нарушения, модули деформации.

Для цитирования: *Пугач А. С.* Применение математической модели уплотнения горных пород при оценке ведения работ в условиях тектонически-напряженных зон // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 167–181. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_167.

Mathematical model of rock compaction for operation in zones of high tectonic stresses

A.S. Pugach

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: as.pugach@misis.ru

© А.С. Пугач. 2022.

Abstract: The article presents the mathematical model of rock compaction for safety evaluation during coal mining. The model is developed for evaluating mining safety in zones of high tectonic stresses and nearby geological faults. The model takes into account subsidiary moduli of deformation: secant modulus, modulus of deformation in uniform compression and model of overall deformation in triaxial relaxation from stresses. The eigensolution is compared with the stress–strain assessment in the vicinity of a single fault and at two mutually effecting faults with regard to horizontal tectonic components of overburden pressure. The problem on distribution of bending moments which lead to distortion of roof support along the boundaries of three stopes with regard to their mutual influence is solved. Furthermore, stress patterns were calculated around stopes exposed to the effect of tectonic and gravity forces. The mathematical model results agree with the calculated data obtained by N.N. Fotieva, I.A. Turchaninov and V.N. Morozov to determine loading patterns in the vicinity of underground openings, assess influence exerted by gravity and tectonic components of overburden pressure, as well as estimate effects of faulting. The proposed mathematical model of rock compaction is applicable for the regional deep-level predictions in coal mines in zones of high tectonic stresses.

Key words: mine, safety, rock burst, mathematical model, rocks, zones of tectonic stresses, stress–strain behavior, deep levels, rock compaction model, tectonic faults, deformation moduli.

For citation: Pugach A. S. Mathematical model of rock compaction for operation in zones of high tectonic stresses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):167-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_167.

Введение

Снижение рисков крупных техногенных катастроф является важнейшей задачей, в том числе на горнодобывающих предприятиях [1]. В настоящее время ведется активная работа по различным направлениям обеспечения безопасности на угольных шахтах России. Комплексно данный вопрос решается в Московском горном институте НИТУ «МИСиС» на стыке различных научных направлений и разных кафедр [2]. С учетом увеличения глубины ведения горных работ на угольных шахтах актуальность обеспечения геотехнической безопасности возрастает.

Современные подходы к оценке напряженно-деформированного состояния массивов горных пород подразумевают применение численных методов моделирования. Расчеты позволяют обосновывать безопасность и эффективность горных работ. Исследователи применяют компьютерные расчетные комплексы с целью создания имитационных моделей [3, 4].

При разнообразии представленных на рынке компьютерных продуктов существует множество методов реализации вычислительных алгоритмов. Основная задача состоит в создании модели, адекватной реальным физическим процессам в массиве и имеющей возможность быть представленной на основе современных расчетных подходов. При этом математическая модель должна учитывать основные факторы, влияющие на изменение состояния горного массива, таких как образование зон ослабления за счет проведения выработок, действие гравитационных сил и горизонтальных сил, включающих тектонические силы, действие геологических нарушений на напряженно-деформированное состояние

массива, которые определяются опытным путем. Для верификации предлагаемых математических моделей могут быть использованы данные исследований из научных публикаций. Результаты компьютерного моделирования зависят от закладываемых в математическую модель параметров горного массива. Существующие методики не учитывают определяющие геомеханическую безопасность факторы в условиях уплотнения массива горных пород с учетом дилатансии. Поэтому исследования по разработке более полных математических моделей необходимы.

Анализ состояния вопроса

Одна из основных задач при обеспечении геомеханической безопасности в процессе ведения горных работ на глубоких горизонтах угольных шахт заключается в определении методов прогнозирования опасных зон. Их выявление связано с выделением участков, опасных по горным ударам, внезапным выбросам, пучениям пород почвы, газовыделениям, прорывам газа [5]. В целом прогноз носит комплексный характер. Он осуществляется на всех этапах горных работ и включает в себя различные методы и подходы: аналитические, расчетные, лабораторные испытания образцов, натурные измерения, контрольные мероприятия. В зависимости от этого выделяют и виды прогноза: региональный, локальный, текущий [6—8].

Региональный прогноз включает прогноз по данным, полученным при ведении геолого-разведочных работ, и прогноз по непрерывным сейсмологическим наблюдениям. Осуществляют определение опасных зон в районе тектонических нарушений электрометрическим и электромагнитным методами. Локальные прогнозы включают бурение уточняющих скважин, определение выхода буровой мелочи, оценку кернования, геофизические методы, регистрацию сейсмоакустической активности, электромагнитных импульсов, искусственно наведенного электромагнитного поля.

Региональный прогноз учитывает влияние горизонтальных напряжений, создаваемых под действием тектонических сил. Выявление тектонически напряженных и геодинамически опасных зон проводится аналитическими методами, например, такой способ применяют во ВНИМИ для угольных пластов Воркутинского месторождения [9]. Здесь стоит обратить внимание на условия формирования тектонической нарушенности на основании прочностных свойств массива горных пород.

Наибольшее распространение получили модель Кулона-Мора и модель уплотнения горных пород. В основе модели Кулона-Мора лежит описание поведения идеализированной упруго-пластической среды. Данная модель часто является основной при сравнении с другими моделями материалов [10]. Физические свойства, на которых основываются вычисления: модуль Юнга E (модуль упругости), коэффициент Пуассона ν, сцепление C, угол внутреннего трения φ и угол дилатансии ψ. Эти свойства закладывают в расчетные модели при решении инженерных задач. Модель Кулона-Мора применима как в геомеханике горных пород, так и в геомеханике грунтов. Модель уплотнения рассматривают в геомеханике грунтов [11]. Тем не менее, модель уплотнения с некоторыми поправками на горные породы может быть применима и для анализа задач, связанных с горными ударами на глубоких горизонтах угольных шахт. В статье рассмотрим адаптацию данной модели и предложим для нее математический аппарат.

На практике деформационные свойства горных пород носят нелинейный характер. Нелинейность учитывают по-

средством ввода дополнительных деформационных свойств (модулей деформации). Эти свойства отображают нагружение образца горных пород в условиях всестороннего сжатия и в области нелинейных деформаций. Одновременно учитывается процесс уплотнения. Под действием сил, влияющих на массив, происходит изменение введенных значений модулей деформаций в зависимости от действующих напряжений.

Физически уплотнение происходит по двум механизмам: за счет действия касательных напряжений и за счет действия сжимающих напряжений. При этом проявляются два взаимно противоположных процесса. В процессе разрушения может происходить пластическое разрыхление, которое в свою очередь приводит к образованию нового поровотрещинного пространства с закономерным уменьшением угла внутреннего трения φ и сцепления C. С другой стороны, за счет уплотнения горных пород в результате действующих в массиве сил на пластическом этапе разрушения происходит закрытие пор и связанный с этим рост угла внутреннего трения φ и сцепления C. Образуется поверхность пластичности, которая является не постоянной в плоскости главных напряжений, а расширяющейся в сторону их предельных значений. В расчетных точках наблюдается накопление пластических деформаций $\{\varepsilon_p\}$. Накопленная пластическая деформация в процессе активного нагружения в случае любых напряженных состояний является аргументом функции $f(\{\sigma\}, \{\varepsilon_p\}, \chi)$. Здесь с помощью фигурных скобок $\{\}$ показаны векторы, элементами которых являются проекции соответствующих величин, σ — текущие напряжения, χ — параметр уплотнения горных пород. В том случае, когда функция $f < 0$ деформация горных пород происходит по упругому закону, когда $f = 0$, наступает текучесть.

Таким образом, модель Кулона-Мора может рассматриваться как первое приближение реального поведения горных пород и справедлива для значений напряжений до 60–70% от разрушающего (модуль длительной деформации) [12]. Учет свойств пластичности в основе имеет нелинейное описание напряженного состояния, соответственно, большее количество параметров числовой модели. Также появляются сложности в вычислениях. В этом случае возможно применение модели уплотнения горных пород. Для учета вышеописанных факторов была разработана математическая модель, позволяющая осуществлять региональный прогноз опасных зон еще до ведения горных работ.

Математическая модель уплотнения горных пород

В отличие от модели Кулона-Мора, в принятой модели задаются дополнительные модули деформации: секущий модуль E_{50}, модуль деформации при нагружении образца при всестороннем сжатии E_{oed} (при исключении его поперечного расширения) и модуль общей деформации при трехосной разгрузке E_{ur}.

На рис. 1 представлена зависимость разности значений главных максимальных и главных минимальных напряжений (девиатор) $|\sigma_1 - \sigma_3|$ от деформации образца ε_1. Отмеченный на рисунке модуль E_0 — начальный модуль упругости.

К недостатку модели уплотнения горных пород можно отнести лишь то, что на вычисление требуется больше времени, поскольку применяемая для вычислений матрица жесткости закладываемого в модель материала формируется и раскладывается поэлементно на каждом шаге выполняемых расчетов. Модель материала представляет собой систему математических уравнений, характеризующихся соотношением между напряжениями и деформациями.

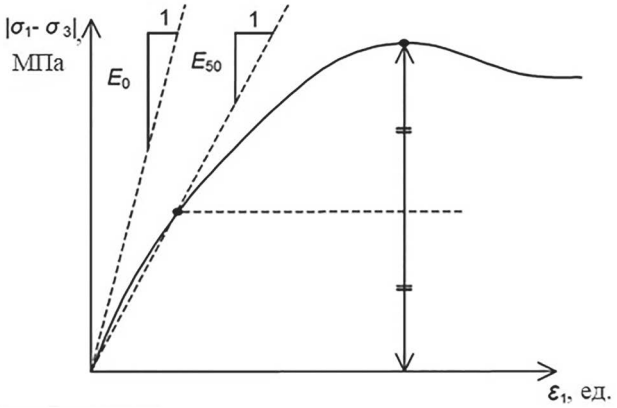

Рис. 1. Схематическое представление диаграммы деформирования
Fig. 1. Schematic deformation diagram

Рассмотрим разработанную математическую модель с порядком ее применения для условий шахты «Комсомольская» Воркутинского месторождения в качестве примера. Данный подход рекомендуется использовать при решении задач регионального прогноза динамических явлений для любой угольной шахты.

Данные, применяемые в предлагаемой математической модели, сведены в таблицу. Согласно инженерно-геологическим изысканиям коэффициент крепости *f* для угля равен 2,5, для песчаника — 9; плотность для угля — 1,35 т/м^3, для песчаника — 2,7 т/м^3. По формуле, предложенной Л.И. Бароном, определен предел прочности на сжатие [$\sigma_{сж}$] для угля — 12,9 МПа, для песчаника — 98,4 МПа. Для сравнения: в литературе, описывающей Воркутинское месторождение, встречаются значения [$\sigma_{сж}$]$_{уголь}$ = = 11–20 МПа, для песчаника [$\sigma_{сж}$]$_{песч}$ =

Физические свойства, закладываемые в модель
Physical properties as model inputs

Физические свойства	Уголь	Песчаник
Взятые из технической документации		
Предел прочности на сжатие [$\sigma_{сж}$], МПа	12,9	98,4
Предел прочности на растяжение [$\sigma_р$], МПа	1,4	10,9
Плотность ρ, т/м^3	1,35	2,7
Угол внутреннего трения φ, град.	37	35
Коэффициент сцепления *C*, МПа	3,1	22,5
Коэффициент Пуассона ν	0,16–0,24	0,3
Пористость	0,14	0,08
Расчетные		
Угол дилатансии ψ, град.	10,7	8,2
Секущий модуль деформации E_{50}, МПа	508–762	8253–10 087
Модуль деформации при трехосной разгрузке E_{ur}, МПа	1016–1524	16 506–20 174
Модуль деформации при нагружении в одометре E_{oed}, МПа	594–892	14 517–17 743

= 54–140 МПа ($[\sigma_p]_{уголь}$ = 1,4 МПа; $[\sigma_p]_{песч}$ = = 10,9 МПа) [11, 12]. Угол внутреннего трения и коэффициент сцепления определяется из паспорта прочности.

Для параболической формы огибающей кругов Мора выражения выглядят следующим образом

$$\varphi = 2\left[arctg\left(\frac{1}{2B}\cdot\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} - 45^\circ\right)\right], \quad (1)$$

где

$$B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1 \quad , \quad (2)$$

$$C = B \cdot \sigma_p. \quad (3)$$

Секущий модуль деформации при трехосном нагружении E_{50} описывает нелинейную упругую область. В основе лежит гиперболическое уравнение, полученное Р.Л. Конднером и Дж.С. Зеласко [13] с поправками Дж.М. Дункана и Ц.-Й. Чанга [14].

$$\varepsilon_l = \frac{1}{2E_{50}}\cdot\frac{\sigma}{1-\sigma/\sigma_a}, \quad (4)$$

где ε_l — продольные деформации, σ_a — асимптотическое девиаторное напряжение.

Асимптотическое девиаторное напряжение соотносят с максимальным девиаторным напряжением σ_f с помощью следующего уравнения:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_f}{R_f} \quad (5)$$

$$\sigma_f = \left(C\cdot ctg\varphi + \sigma_3\right)\cdot\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (6)$$

Согласно Дж.М. Дункану и Ц.-Й. Чангу величина R_f изменяется в пределах 0,75…1 [14].

Модуль деформации E_{ur} и модуль деформации при нагружении в одометре E_{oed} находятся в строго определенных диапазонах:

$$2E_{50} < E_{ur} < 20E_{50}, \quad (7)$$

$$0{,}1E_{50} < E_{oed} < 3E_{50}. \quad (8)$$

Эти значения определяют, исходя из степени деформируемости рассматриваемых горных пород, которая с глубиной уменьшается при одновременном увеличении степени уплотнения.

Как уже было отмечено, модули деформации под влиянием действующих в массиве сил изменяются в процессе уплотнения. Для учета этого в модель материала вводятся значения модуля деформации с верхним индексом ref.

Верхний индекс ref обозначает некоторое усредненное значение, получаемое в результате лабораторных испытаний образца. Для приближения к реальным условиям уплотнения перечисленные параметры домножаются на нелинейный коэффициент, определяемый степенью *m*.

Модуль деформации, получаемый при нагружении образца горной породы в условиях всестороннего сжатия

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref}\cdot\left(\frac{\sigma}{p^{ref}}\right)^m, \quad (9)$$

где σ — действующие напряжения, МПа; p^{ref} — эталонное давление, МПа; *m* — параметр, определяющий нелинейность функции.

Степень *m* определяется, исходя из типов горных пород. Например, для мягких глин значение принимается равным 1,0. Для описания горных пород осадочного происхождения, в частности, для Норвежского песчаника, это значение дается равным около 0,5 [15], позже было предложено [16] принимать значения в диапазоне 0,5 < *m* < 1,0.

$$E_{oed}^{ref} = \frac{p^{ref}}{\lambda^*}. \quad (10)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1+e_0)}. \quad (11)$$

В выражении (10) модули деформации определяются при нагружении образца в условиях всестороннего сжатия, для конкретных эталонных давлений p^{ref}.

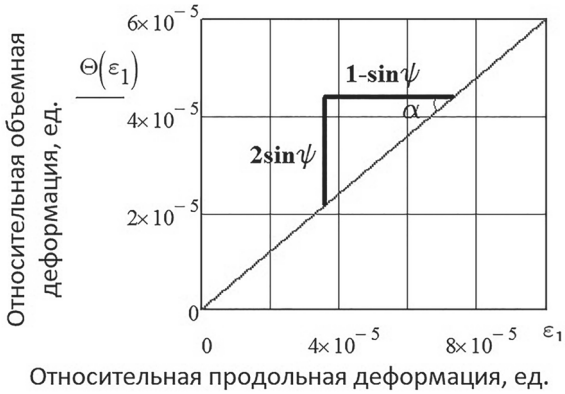

Рис. 2. Определение угла дилатансии для угля
Fig. 2. Determination of dilatancy angle in coal

Кроме того, начальный модуль деформации при нагружении образца имеет отношение к модифицированному коэффициенту сжатия λ^*. Параметр e_0 — начальная пористость материала модели.

По аналогии можно определить модуль деформации при трехсторонней разгрузке. Он связан с модифицированным коэффициентом расширения k^*. Эти значения определяют по выражениям:

$$E_{ur}^{ref} = \frac{3p^{ref}\left(1-2\nu_{ur}\right)}{k^*}, \qquad (12)$$

$$k^* = \frac{k}{\left(1+e_0\right)}. \qquad (13)$$

Значение угла дилатансии для угля определяется графическим путем (рис. 2) из зависимости объемных деформаций от продольных. Значения величин определялись на упругой стадии деформирования при испытаниях на нагружение образцов в условиях одноосного сжатия в режиме задаваемых перемещений (ГОСТ 28985-91). Объемные деформации через продольные и поперечные выражают следующим соотношением:

$$\theta = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2, \qquad (14)$$

где ε_1 — относительные продольные деформации; ε_2 — относительные поперечные деформации.

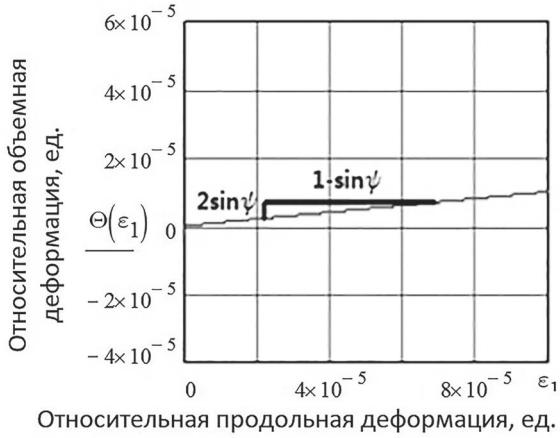

Рис. 3. Определение угла дилатансии для песчаника
Fig. 3. Determination of dilatancy angle in sandstone

Из рис. 2 следует, что

$$tg\alpha = \frac{2\sin\psi}{1-\sin\psi}, \qquad (15)$$

где ψ — угол дилатансии.

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{2(\cos\alpha+\sin\alpha)}\right). \qquad (16)$$

Аналогичным образом определяют угол дилатансии для песчаника (рис. 3).

Верификация математической модели

Определив таким же образом физические свойства горных пород в задачах, рассматриваемых в публикациях ведущих ученых [17–19], произведем верификацию предложенной математической модели уплотнения горных пород. Для рассматриваемых ниже задач расчеты выполним с применением компьютерного комплекса Plaxis. При этом оценим такие факторы, как технологическое влияние проводимой выработки (на примере аналитического расчета), действие гравитационной составляющей и тектонической составляющей горного давления, а также влияние тектонической нарушенности при решении задач в горизонтальном сечении.

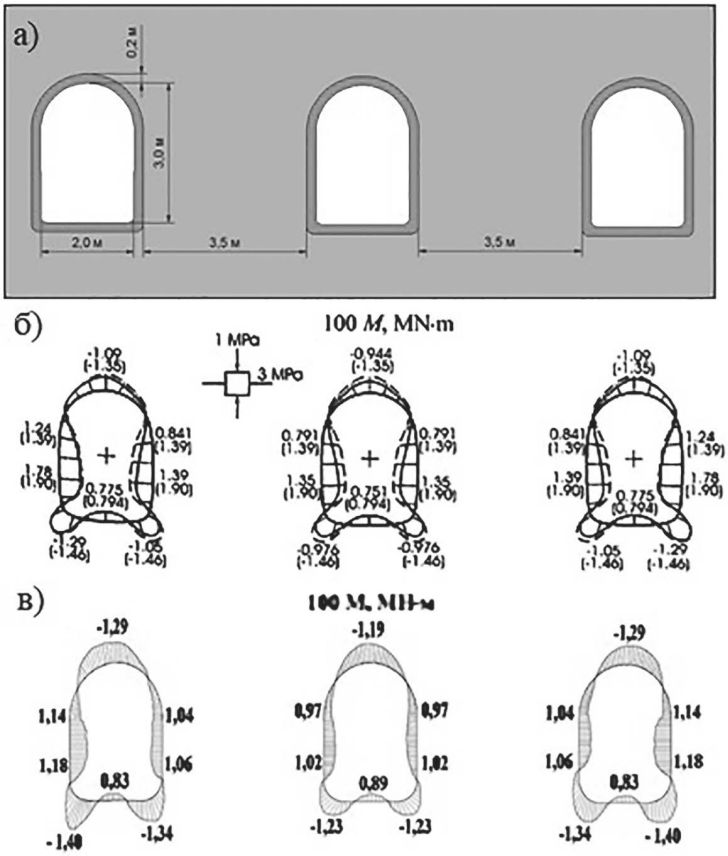

Рис. 4. Оценка взаимовлияния соседних выработок: расчетная схема (а); эпюры распределения изгибающих моментов (решение Н.Н. Фотиевой, Н.С. Булычева, П.В. Деева) (б); результаты компьютерного моделирования — эпюры распределения изгибающих моментов (решение автора) (в)

Fig. 4. Assessment of mutual effect of neighbor stopes: analytical model (a); bending moment curves (solution by N.N. Fotieva and P.V. Deev) (b); computer modeling (v)

Для оценки сходимости результатов с точки зрения техногенного воздействия рассмотрим задачу, отображенную в статье [17].

Авторы предлагают математический алгоритм и на его основании приводят решение на примере трех параллельно расположенных выработок. Такой подход позволит оценить распределение параметров вдоль контура отдельной выработки и их взаимовлияния. На рис. 4, *а* представлена расчетная схема с нанесенными размерами. Все три выработки, представленные на ней, геометрически идентичны друг другу.

Параметр, по которому осуществляется сравнение, — значения изгибающих моментов (МН·м), приводящих к искривлению секций крепи.

Обоснованное в статье численное решение в виде распределения эпюр по контуру выработки представлено на рис. 4, *б*. Пунктирной линией отображены значения для одиночной выработки, сплошной — с учетом взаимовлияния. Максимальные сжимающие (отрицательные) напряжения приходятся на углы поддерживающего внутреннего контура, растягивающие напряжения наблюдаются на боках.

Влияние соседних выработок приводит к уменьшению растягивающих и сжимающих напряжений по контуру выработки.

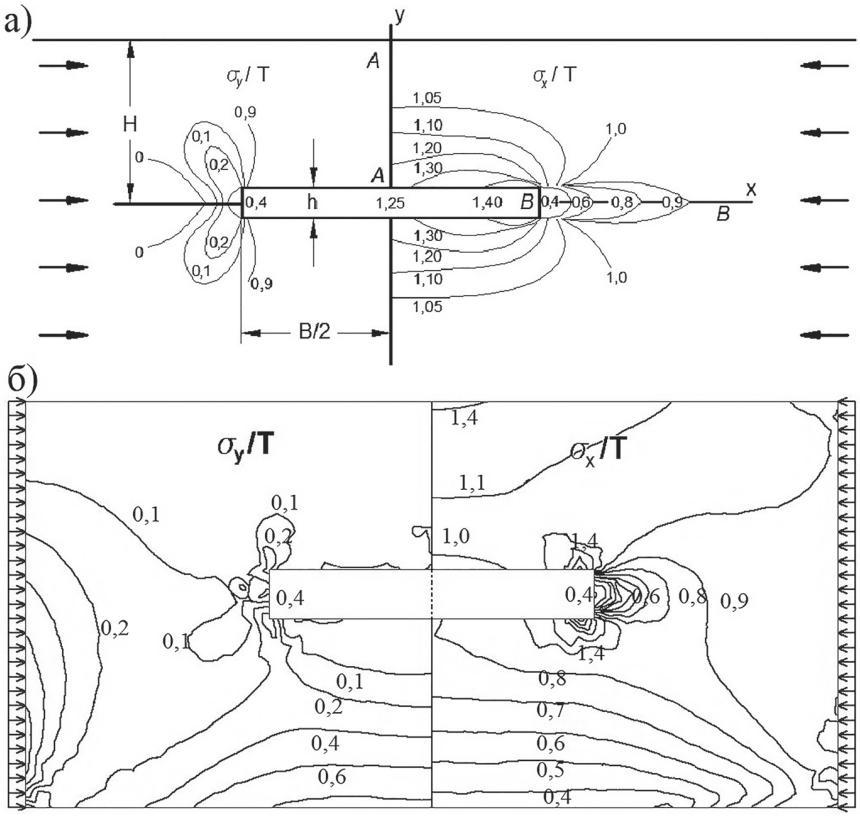

Рис. 5. Карта значений напряжений под действием горизонтальных сил T по И.А. Турчанинову, Г.А. Маркову (а); решение автора (б)

Fig. 5. Maps of stresses due to horizontal forces T according to I.A. Turchaninov–G.A. Markov (a) and present authors (b)

Результат решения компьютерной модели настоящей задачи по разработанной математической модели получен в виде распределения и отображен на рис. 4, *в*.

Сравнивая эпюры, отображенные на рис. 4, *в*, с эпюрами на рис. 4, *б*, следует отметить общую закономерность качественного распределения. Однако числовые значения несколько разнятся, но имеют хорошую сходимость. Отличие связанно с учетом дополнительных факторов.

Для оценки сходимости действия тектонических и гравитационных сил были рассмотрены задачи, решаемые Г.А. Марковым, И.А. Турчаниновым. В работе [18] представлено решение, позволяющее оценить действие горизонтальных (тектонических) сил.

Напряженно-деформированное состояние рассмотрено с применением плоских моделей. Соблюдено геометрическое и силовое подобие моделей. Геометрический масштаб моделирования 1:10 000. Распределение напряжений вокруг очистных выработок изучали раздельно при действии тектонических (T) и гравитационных (γH) сил.

На рис. 5 и рис. 6 представлены полученные результаты для моделей с одним прямоугольным очистным пространством. Линии равных напряжений σ_x/T и σ_y/T, а также $\sigma_x/\gamma H$ и $\sigma_y/\gamma H$ определены

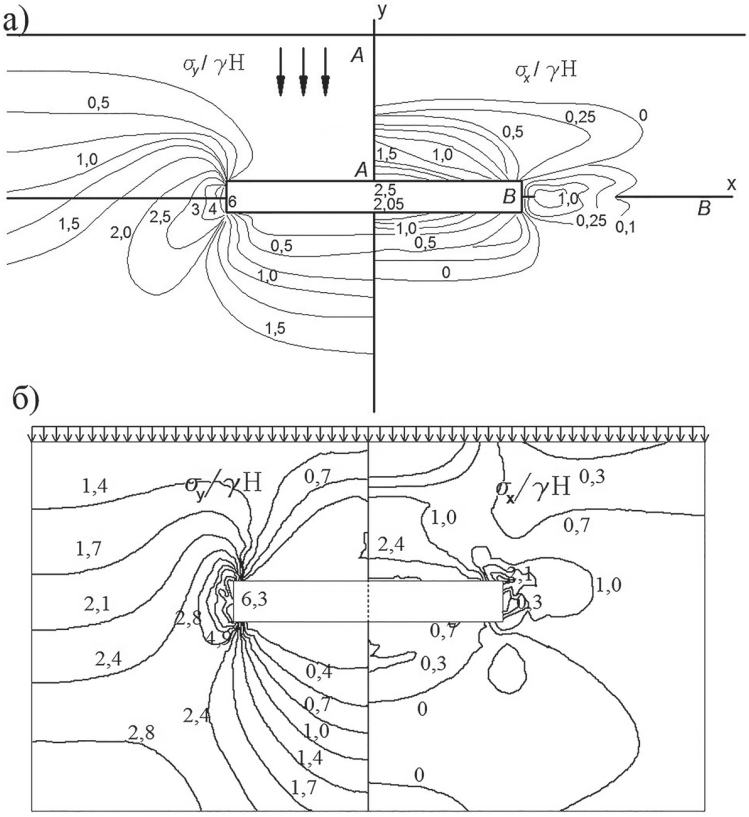

Рис. 6. Карта значений напряжений от действия гравитационных сил P = γH по И.А. Турчанинову, Г.А. Маркову (а); решение автора (б)

Fig. 6. Map of stresses due to gravity forces P = γH according to I.A. Turchaninov–G.A. Markov (a) and present authors (b)

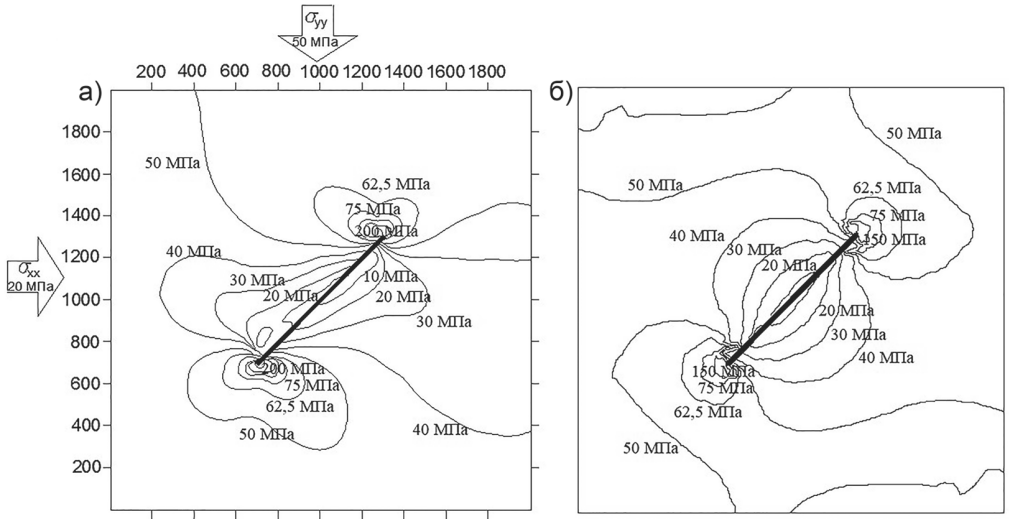

Рис. 7. Карта значений напряжений в районе одиночного разлома при σ_{xx} = 20 МПа, σ_{yy} = 50 МПа: решение в GEODYN (ГЦ РАН) (а); решение автора (б)

Fig. 7. Map of stresses nearby single fault at σ_{xx} = 20 MPa, σ_{yy} = 50 MPa: solution in GEODYN (Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences) (a) and present authors (b)

при условии H/B = 67 и B/h = 6,2. H — глубина расположения; B — ширина выработки; h — высота выработки.

Для оценки сходимости плоских задач, решаемых в горизонтальном сечении (в сечении угольного пласта), рассмотрим работу [19], в которой произведены расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности одиночного и двух близко расположен-

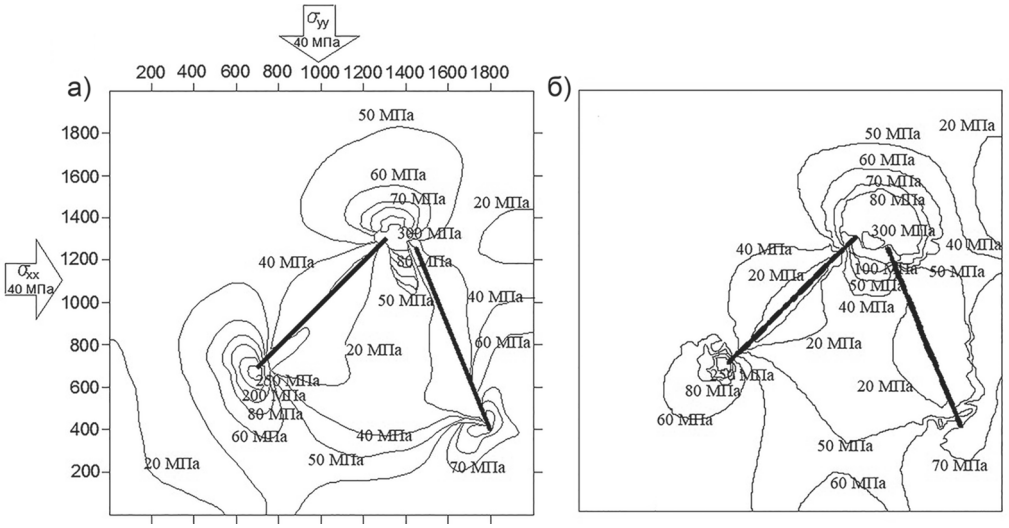

Рис. 8. Карта значений напряжений в районе двух близко расположенных разломов при σ_{xx} = 40 МПа, σ_{yy} = 40 МПа: решение в GEODYN (ГЦ РАН) (а); решение автора (б)

Fig. 8. Map of stresses nearby two closely spaced faults at σ_{xx} = 40 MPa; σ_{yy} = 40 MPa: solution in GEODYN (Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences) (a) and present authors (b)

ных разломов в комплексе GEODYN. Приведены примеры собственного решения в сравнении с оценкой НДС вблизи одиночного разлома и совместного влияния двух нарушений с учетом горизонтальных тектонических составляющих горного давления.

Для сравнения возьмем две задачи:

Задача 1

σ_{yy} = 50 МПа, σ_{xx} = 20 МПа. Модуль Юнга пород вмещающего массива E_1 = = $8 \cdot 10^5$ МПа, Модуль Юнга материала разлома E_2 = $1 \cdot 10^2$ МПа; коэффициент Пуассона пород вмещающего массива μ_1 = 0,22, коэффициент Пуассона материала разлома μ_2 = 0,15. Размеры области 2000 м, координаты границ разлома $\{x_1 = 700, y_1 = 700\}$, $\{x_2 = 1300, y_2 = = 1300\}$.

Задача 2

σ_{yy} = 40 МПа, σ_{xx} = 40 МПа. Модуль Юнга E_1, E_2 и коэффициент Пуассона μ_1, μ_2, размеры области и координаты разлома 1 — те же. Появляется второй разлом 2 с координатами $\{x_3 = 1450, y_3 = = 1250\}$, $\{x_4 = 1800, y_4 = 400\}$.

Физические свойства нарушения соответствуют заполнителю между плитами дизъюнктива, который представляет собой материал, образовавшийся за счет трения крыльев сместителя, расстояние между которыми определяется в соответствии с планами горных работ. Коэффициент сцепления подобран на основании экспериментальных данных, отраженных в нормативных документах. На рис. 7 и рис. 8 показаны решения каждой из задач.

Результаты, полученные в GEODYN [21] и в рамках тестовой задачи, несколько разнятся, но в целом имеют положительную количественную и качественную сходимость. Отличие также связанно с учетом дополнительных факторов.

Сравнивая решение представленных тестовых задач и отмечая сходимость получаемых результатов, отметим применимость предлагаемой модели. При этом модель уплотнения горных пород является более точной с точки зрения представления физических процессов в массиве.

Заключение

Обеспечение геомеханической безопасности при ведении горных работ по добыче угля в шахтах имеет существенное значение для развития горнодобывающей отрасли. В настоящее время наблюдается увеличение глубины ведения горных работ, применение новых систем разработки [22] в результате которых растет вероятность проявления горных ударов. Разработанная математическая модель уплотнения горных пород в тектонически-напряженных зонах, вблизи геологических нарушений позволяет дополнительно учесть больше деформационных свойств через: секущий модуль деформации E_{50}, модуль деформации при нагружении образца при всестороннем сжатии E_{oed} (при исключении его поперечного расширения) и модуль общей деформации при трехосной разгрузке E_{ur}. В статье было произведено сравнение двух математических моделей задания геоматериала. Применение метода математического моделирования с учетом уплотнения материала имеет преимущества в сравнении с наиболее применяемой теорией Кулона-Мора.

Была произведена оценка различных факторов, которые имеют место при отработке запасов на угольных шахтах. Оценка ведения работ была произведена в условиях тектонически-напряженных зон. Математическая модель верифицирована при оценке решений ведущих ученых на основе постановки тестовых задач. Полученные результаты показали хорошую сходимость, что позволит применять математическую модель уплотнения горных пород и при решении

более сложных задач для регионального прогнозирования опасных зон в угольных пластах, склонных к проявлению динамических явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пучков Л. А.*, *Каледина Н. О.*, *Кобылкин С. С.* Естественнонаучный анализ рисков развития кризисных процессов // Горный журнал. — 2015. — № 5. — С. 4—7. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.01.

2. *Каледина Н. О.*, *Коликов К. С.*, *Кобылкин С. С.* Кафедра Безопасности и экологии горного производства: прошлое, настоящее и будущее // Горный журнал. — 2018. — № 3. — С. 21—28. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.04.

3. *Malinnikova O., Uchaev D., Uchaev D., Malinnikov V.* The study of coal tectonic disturbance using multifractal analysis of coal specimen images obtained by means of scanning electron microscopy // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 129, no. 2, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901017.

4. *Zakharov V. N.*, *Malinnikova O. N.* Modeling geomechanical and geodynamic behavior of miningaltered rock mass with justifying mechanisms of initiation and growth of failure zones / Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Selected Papers from the 2018 European Rock Mechanics Symposium. CRC Press, 2018, pp. 167—180.

5. *Федеральные* нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» [Электронный ресурс]: Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 декабря 2020 года № 515. Доступ из Электронного фонда правовых и нормативных документов.

6. *Tianwei L., Hongwei Z., Sheng L., Jun H., Weihua S., Batugin A. S., Guoshui T.* Numerical study on 4—1 coal seam of xiaoming mine in ascending mining // Scientific World Journal. 2015, no. 3, article 516095. DOI: 10.1155/2015/516095.

7. *Lan T., Sun J., Batugin A. S., Zhao W., Zhang M., Jia W., Zhang Z.* Dynamic characteristics of fault structure and its controlling impact on rock burst in mines // Shock and Vibration. 2021, vol. 2021, article 7954876. DOI: 10.1155/2021/7954876.

8. *Lan T., Zhang H., Li S., Batugina I., Batugin A.* Application and development of the method of geodynamic zoning according to geodynamic hazard forecasting at coal mines in China // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 221, no. 1, article 012088. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012088.

9. *Прогнозирование* зон возможной тектонической нарушенности, www.micromine.ru. 2017. URL: https://www.micromine.ru/possible-zones-of-tectonic-disturbance-prediction/ (дата обращения: 31.12.2021).

10. *Kovtanyuk L. V.*, *Panchemko G. L.* On compression of a heavy compresible layer of an elastoplastic or elastoviscoplastic medium // Mechanics of Solids. 2017, vol. 52, no. 6, pp. 653—662. DOI: 10.3103/S002565441706005X.

11. *Устинов Д. В.* Влияние выбора модели вмещающего массива на результаты моделирования проходки перегонных тоннелей метрополитена // Геотехника. — 2018. — Т. 10. — № 5-6. — С. 34—50.

12. *Курленя М. В.*, *Серяков В. М.*, *Еременко А. А.* Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.

13. *Справочник* (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова. — М.: Недра, 1975. — 279 с.

14. *Яковлев Д. В.*, *Цирель С. В.*, *Мулев С. Н.* Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 2. — С. 34—47.

15. *Kondner R. L., Zelasko J. S.* A hyperbolic stress-strain formulation of sands / Proceedings of the 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1963, vol. 1, pp. 289—324.

16. *Duncan J. M.*, *Chang C.-Y.* Nonlinear analysis of stress and strain in soil // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. 1970, vol. 96, pp. 1629—1653.

17. *Janbu J.* Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests / Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ECSMFE), Wiesbaden, 1963, vol. 1, pp. 19—25.

18. *Von Soos P.* Properties of soil and rock / Grundbautaschenbuch, Part 4. 4th ed. Berlin: Ernst and Sohn, 1980.

19. *Fotieva N. N.*, *Bulychev N. S.*, *Deev P. V.*, *Vladova V. V.* Design of support of multiple non-circular workings in tectonic areas // Archives of Mining Sciences. 2008, vol. 53, no. 3, pp. 361—370.

20. *Марков Г. А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л.: Наука, 1977. — 213 с.

21. *Михайлов Ю. В.*, *Морозов В. Н.*, *Татаринов В. Н.*, *Колесников И. Ю.* Безопасность жизнедеятельности. Моделирование и анализ полей напряжений в породных массивах: практикум. — М.: Изд-во МГОУ, 2011. — 53 с.

22. *Кобылкин С. С.*, *Харисов А. Р.* Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки // Записки Горного института. — 2020. — Т. 245. — С. 531—538. DOI: 10.31897/PMI.2020.5. ГИАБ

REFERENCES

1. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Natural science-based analysis of risk of recession. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 5, pp. 4—7. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.01.

2. Kaledina N. O., Kolikov K. S., Kobylkin S. S. Mining safety and ecology department: past, present and future. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 3, pp. 21—28. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.03.04.

3. Malinnikova O., Uchaev D., Uchaev D., Malinnikov V. The study of coal tectonic disturbance using multifractal analysis of coal specimen images obtained by means of scanning electron microscopy. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 129, no. 2, article 01017. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901017.

4. Zakharov V. N., Malinnikova O. N. Modeling geomechanical and geodynamic behavior of miningaltered rock mass with justifying mechanisms of initiation and growth of failure zones. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Selected Papers from the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. CRC Press, 2018, pp. 167—180.

5. *Federal norms and rules in the field of industrial safety «Instruction on the forecast of significant values and monitoring of rocks during the development of coal deposits». Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 515, December 10, 2020.* [In Russ].

6. Tianwei L., Hongwei Z., Sheng L., Jun H., Weihua S., Batugin A. S., Guoshui T. Numerical study on 4—1 coal seam of xiaoming mine in ascending mining. *Scientific World Journal*. 2015, no. 3, article 516095. DOI: 10.1155/2015/516095.

7. Lan T., Sun J., Batugin A. S., Zhao W., Zhang M., Jia W., Zhang Z. Dynamic characteristics of fault structure and its controlling impact on rock burst in mines. *Shock and Vibration*. 2021, vol. 2021, article 7954876. DOI: 10.1155/2021/7954876.

8. Lan T., Zhang H., Li S., Batugina I., Batugin A. Application and development of the method of geodynamic zoning according to geodynamic hazard forecasting at coal mines in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 221, no. 1, article 012088. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012088.

9. *Prognozirovanie zon vozmozhnoy tektonicheskoy narushennosti*, available at: https://www.micromine.ru/possible-zones-of-tectonic-disturbance-prediction/ (accessed 31.12.2021). [In Russ].

10. Kovtanyuk L. V., Panchemko G. L. On compression of a heavy compresible layer of an elastoplastic or elastoviscoplastic medium. *Mechanics of Solids*. 2017, vol. 52, no. 6, pp. 653—662. DOI: 10.3103/S002565441706005X.

11. Ustinov D. V. Choice of a model in a massif on the results of modeling the driving of underground tunnels. *Geotekhnika*. 2018, vol. 10, no. 5-6, pp. 34—50. [In Russ].

12. Kurlenya M. V., Seryakov V. M., Eremenko A. A. *Tekhnogennye geomekhanicheskie polya napryazheniy* [Technogenic geomechanical stress fields], Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 p.

13. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod*. Pod red. N. V. Mel'nikova, V. V. Rzhevskogo, M. M. Protod'yakonova [Handbook (cadastre) of physical properties of rocks. Melnikov N. V., Rzhevsky V. V., Protodyakonov M. M. (Eds.)], Moscow, Nedra, 1975, 279 p.

14. Yakovlev D. V., Tsirel S. V., Mulev S. N. Patterns of development and methods of operational assessment of technogenic seismic activity at mining enterprises and in mining regions. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 2, pp. 34—47. [In Russ].

15. Kondner R. L., Zelasko J. S. A hyperbolic stress-strain formulation of sands. *Proceedings of the 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1963, vol. 1, pp. 289—324.

16. Duncan J. M., Chang C.-Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*. 1970, vol. 96, pp. 1629—1653.

17. Janbu J. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ECSMFE), Wiesbaden, 1963, vol. 1, pp. 19—25.

18. Von Soos P. Properties of soil and rock. *Grundbautaschenbuch*, Part 4. 4th ed. Berlin: Ernst and Sohn, 1980.

19. Fotieva N. N., Bulychev N. S., Deev P. V., Vladova V. V. Design of support of multiple non-circular workings in tectonic areas. *Archives of Mining Sciences*. 2008, vol. 53, no. 3, pp. 361—370.

20. Markov G. A. *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva* [Tectonic stresses and rock pressure in the mines of the Khibiny massif], Leningrad, Nauka, 1977, 213 p.

21. Mikhaylov Yu. V., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kolesnikov I. Yu. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Modelirovanie i analiz poley napryazheniy v porodnykh massivakh*: praktikum [Modeling and analysis of stress fields in mountain ranges: practical work], Moscow, Izd-vo MGOU, 2011, 53 p.

22. Kobylkin S. S., Kharisov A. R. Features of the design of ventilation of coal mines in the room-and-pillar system of mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 531—538. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пугач Александр Сергеевич — старший преподаватель,
ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: as.pugach@misis.ru, Alpugach@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9353-4567.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.S. Pugach, Senior Lecturer, Mining Institute, National University
of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
e-mail: as.pugach@misis.ru, Alpugach@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9353-4567.

Получена редакцией 25.01.2022; получена после рецензии 09.02.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 25.01.2022; received after the review 09.02.2022; accepted for printing 10.05.2022.