

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА И ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЕГО КОНТУРА

П.А. Деменков¹, Е.Л. Романова¹, Д.А. Котиков¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: ekaterina.romanova.1997@mail.ru

Аннотация: С помощью математического моделирования проанализировано влияние неровного контура выработки на неравномерность распределения напряжений во вмещающем массиве и на контуре крепи ствола. При строительстве горных выработок получаемый контур крепи зачастую имеет неидеальную форму. На неровном контуре крепи происходит перераспределение нагрузок, что приводит к концентрации напряжений и негативно сказывается на работе крепи. В настоящее время при решении подобных задач геомеханики не принято рассматривать неровности контура в явном виде, однако с ростом мощностей вычислительной техники это становится возможным. Смоделированы три случая распределения напряжений на контуре крепи вертикального ствола с различными условиями. Установлено, что уровень напряжений приконтурного массива определяется геометрией неровности и ориентацией вектора главных напряжений. Была получена качественная зависимость, связывающая геометрию неровности и тангенциальные напряжения на контуре крепи, а также зависимость развития пластических деформаций от геометрии неровности. Поскольку полностью избежать появления неровного контура на данном этапе развития горной индустрии невозможно, необходимо тщательно рассчитывать количество взрывчатого материала, учитывать геологию и тектонику месторождения и многие другие аспекты.

Ключевые слова: вертикальный ствол, крепь, неровности контура, напряженно-деформированное состояние, горное давление, породный массив, напряжения, деформации.

Для цитирования: Деменков П. А., Романова Е. Л., Котиков Д. А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 33–48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.

Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour

P.A. Demenkov¹, E.L. Romanova¹, D.A. Kotikov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: ekaterina.romanova.1997@mail.ru

Abstract: The mathematical modeling is used to analyze the influence of the irregular shaft contour on the stress nonuniformity in adjacent rock mass and at the shaft lining. In mine shaft construction, the final profile of the lining is often imperfect. At the irregular contour of the lining, redistribution of loading takes place, which leads to the stress concentration and adversely affects the lining efficiency. At the present time, in solving such problems in geomechanics, it is uncommon to consider the contour irregularity explicitly, but the rise in the computational capabilities makes the latter possible. The modeling embraces three scenarios of stress distribution at the contour of the vertical shaft lining at different conditions. It is found that the stress level in adjacent rock mass is governed by the geometry of the lining contour irregularity and by the orientation of the principal stress vector. The qualitative correlation of the irregularity geometry and tangential stresses at the lining contour, as well as the relation of plastic strains and the irregularity geometry are obtained. It is impossible to completely avoid the contour irregularity at this stage of the mining industry. For this reason, it is required to calculate carefully explosive charges, and to take into account geology and tectonics of a mineral deposit, and many other factors.

Key words: vertical shaft, lining, contour irregularity, stress-strain behavior, rock pressure, rock mass, stresses, strains.

For citation: Demenkov P. A., Romanova E. L., Kotikov D. A. Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):33-48. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.

Введение

Вертикальные стволы являются капитальными сооружениями, предназначенными для транспортировки людей, полезного ископаемого, оборудования и материалов, а также для вентиляции шахты. Остановка функционирования вертикальных стволов по причине их неустойчивости, небезопасности и аварийности состояния сдерживает работу всей шахты, становясь причиной снижения проходческих и добычных темпов предприятия.

Это негативно отражается на экономической составляющей всей шахты.

В ходе строительства и эксплуатации вертикальной выработки на ее крепь оказывают воздействие различные факторы (технология проходки, геология участка, неоднородное естественное напряженное состояние массива и пр.) [1, 2], последствием которых является не-

равномерное распределение нормальных нагрузок на контуре крепи.

Степень неравномерности нагрузки в большей степени зависит от способа проведения выработки. Общеизвестно [3], что при строительстве выработки добиться идеально ровного контура невозможно, однако буровзрывной способ строительства подземных сооружений во много раз увеличивает вероятность получения неровного контура полости в массиве по сравнению, например, со щитовым [4]. При переборе сечения внешнего радиуса крепи ствола происходит перераспределение и концентрация напряжений на контуре полученной полости. Этот процесс опасен сам по себе, однако вкупе с другими факторами (неоднородное поле напряжений, длительное деформирование материалов крепи, образование полостей в закрепном пространстве) нагрузка на крепь с неров-

ным контуром выработки может превышать допустимые значения.

Представленное исследование направлено на определение влияния различной комбинации факторов на распределение напряжений в массиве в окрестности ствола и в конструкции крепи.

Исследование, направленное на определение неравномерности распределения напряжений на контуре выработки при различных условиях сегодня не теряет своей актуальности. Понимание механизмов формирования и изменения напряжений на контуре крепи позволяет закладывать более точные параметры крепи при ее проектировании, повышая тем самым безопасность строительства и эксплуатации выработки. Целью данного исследования является выявление закономерностей возникновения концентраций напряжений в крепи вертикального ствола и во вмещающем его массиве пород методом численного моделирования.

Распределение напряжений в массиве при неровном контуре полости

На характер разрушения горной породы при взрыве в первую очередь влияют свойства горной породы. Поскольку геологические изыскания не всегда выдают достоверные данные по прочностным характеристикам пород массива, которые пересекают вертикальный ствол, возводимый буровзрывным способом, возможны случаи перебора сечения при проходке. Это может произойти, например, при наличии в геологическом разрезе включений более слабых пород, которые предварительно не были обнаружены, при разгрузке энергии взрыва в направлении плоскости с меньшим сопротивлением или в других условиях [5, 6]. Геологические разрывы, такие как наличие зон дробления, разломов, тектоническая компонента напряжений в

массиве, также влияют на профиль выемки при взрывных работах [7, 8].

Особенно большое влияние подобного рода неровности могут иметь при согласном с осью ствола залегании тектонических нарушений или литологических слоев. Помимо свойств горных пород, на характер повреждений, вызванных взрывом, существенно влияют качество, количество и распределение взрывчатых веществ. Энергия взрыва, рассчитанная для инженерно-геологического слоя по усредненным параметрам, может создавать полость в массиве, превышающую необходимые по проекту размеры. Перебор сечения горной выработки негативно сказывается на всем процессе строительства: увеличивается объем выемки горной породы, а также расход материала для крепления выработки, создавая экономически невыгодную ситуацию. Неровный контур крепи конструкции становится причиной усиления неравномерности распределения напряжений в ней, поэтому необходимо обеспечивать качественную и количественную пригодность взрывчатых веществ для получения оптимального характера разрушения при взрыве [9 – 11].

Распределение напряжений в крепи с неровным контуром

Определению напряжений на контуре крепи стволов посвящены многие исследования [12, 13], однако внимание исследователей в основном сосредоточено на представлении контура выработки как гладкого, в то время как исследований по определению давления на крепь с учетом неравномерности ее контура не так много. Например, в исследовании [14] предложено решение проблемы повреждения крепи ствола по причине неравномерного давления на ее контур (анизотропное распределение напряжений в массиве и преобладание горизонтальной компоненты напряжений

над вертикальной). Для остановки разрушения конструкции форма сечения ствола была заменена с круглой на эллиптическую с увеличением толщины крепи со стороны максимального горизонтального давления на крепь. В исследовании контур крепи рассматривается как гладкий, однако при подобных геологических условиях неравномерность контура оказывает влияние [3], которое также стоит учитывать в явном виде.

При бетонировании крепи ствола проектное сечение заполняют твердеющим раствором, который распределяется по получившимся при проведении выработки неровностям, что влияет на формирование напряжений в крепи. В исследовании [1] установлено, что в начальный период времени в наиболее удаленных от оси ствола точках контура (вершинах неровности) возникает концентрация напряжений. С течением времени происходит релаксация, хотя пиковые значения напряжений все еще превышают аналогичные при гладком контуре. Также авторами отмечается, что неровности контура крепи при гидростатическом начальном напряженном состоянии массива не играют особой роли в распределении напряжений на контуре, а величину давления на нее можно определять по формулам для гладкого контура крепи.

Исследования [11, 15] показали, что из-за особенностей вмещающего массива и технологии проведения вертикальных выработок реальный характер взаимодействия системы крепь — массив отличается от ожидаемого, равно как и нагрузка, испытываемая конструкцией крепи. Неравномерная нагрузка на крепь становится причиной появления в ней растягивающих напряжений, которые снижают несущую способность конструкции и негативно сказываются на ее устойчивости. Крепь не работает в заданном режиме и не обеспечивает необходимую эксплуатационную надежность.

Поэтому необходимо учитывать при проектировании неровный контур крепи ствола в явном виде. Этого можно добиться с помощью численного моделирования, которое в настоящий момент получило очень широкое применение для решения самых разных задач геомеханики [16 — 18].

Распределение напряжений в крепи при образовании полостей в закрепном пространстве

При проектировании и расчете шахтных и подземных сооружений условно считают, что контур конструкции и закрепное пространство находятся в тесном контакте. Однако зачастую в этой равновесной системе появляются зазоры и пустоты, особенности и причины формирования которых исследуются многие годы [19, 20]. Пустоты за крепью являются одним из наиболее значимых факторов, вызывающих повреждение подземных сооружений [21, 22] и деформации почвы [23]. Это подтверждается стендовыми и натурными исследованиями [24]. Основными причинами нарушения плотного контакта крепи сооружения и массива пород являются некачественное строительство, длительность эксплуатации и эрозия грунтовых вод. Наличие зазоров и пустот приводит к большой разнице между реальной картиной распределения напряжений на контуре крепи и ожидаемой.

В исследовании [25] было установлено, что наличие полостей в закрепном пространстве приводит к образованию концентраторов напряжений и, как следствие, появлению дополнительных деформаций. При сейсмическом воздействии на крепь ствола наличие пустот становится причиной увеличения изгибающих моментов и уменьшения осевого давления. В [26] с помощью конечно-элементного моделирования было проанализировано влияние постепенного расширения

полости в закрепном пространстве на устойчивость ствола. Было установлено, что в большинстве случаев использование бетона с более высокой прочностью на сжатие снижает влияние пустот за крепью на устойчивость конструкции. На динамику изменений также существенное влияние оказывает тип моделируемого массива горных пород [26].

Таким образом, полости в закрепном пространстве изменяют однородное напряженное состояние массива и влияют на напряжения и деформации в крепи ствола.

Методика исследования

Для решения подобных задач широко применяются методы численного моделирования [27 – 29] и создания цифровых моделей [30 – 32]. В представленном исследовании основным инструментом является математическое моделирование. Были изучены ситуации неравномерного распределения напряжений на контуре вертикальной горной выработки в различных условиях.

В работе была рассмотрена плоская модель (рис. 1, а), геометрические параметры которой были приняты равными 100×100 м. Ортогональные смещения относительно границ модели были ограничены.

Идеализированная геометрическая форма неровности представляет собой часть эллипсоида. Для оценки влияния геометрии неровности на крепь ствола был введен параметр k как отношение глубины неровности к ее ширине.

$$k = \frac{a}{b},$$

где a – глубина неровности (рис. 1, б); b – ширина неровности (рис. 1, б).

Начальное напряженное состояние имеет следующие характеристики: вертикальные напряжения – 10 МПа, горизонтальные – 7 и 4 МПа (данные значения справедливы для коэффициентов бокового распора 0,7 и 0,4 соответственно). Для описания поведения массива горных пород была использована упруго-пластическая модель Кулона-Мора. Основные принятые к расчету физико-механические характеристики горных пород представлены в табл. 1.

Внешний радиус ствола составляет 3,6 м, толщина крепи принята равной 0,3 м, класс бетона – В30. В исследовании (табл. 2, [33, с. 71]) поведение бетонной крепи описано при помощи модели Simplified Concrete Damage Plasticity (SCDP) [29]. Эта модель использует теории пластического течения материалов и механики повреждений для анализа бетонных конструкций и является

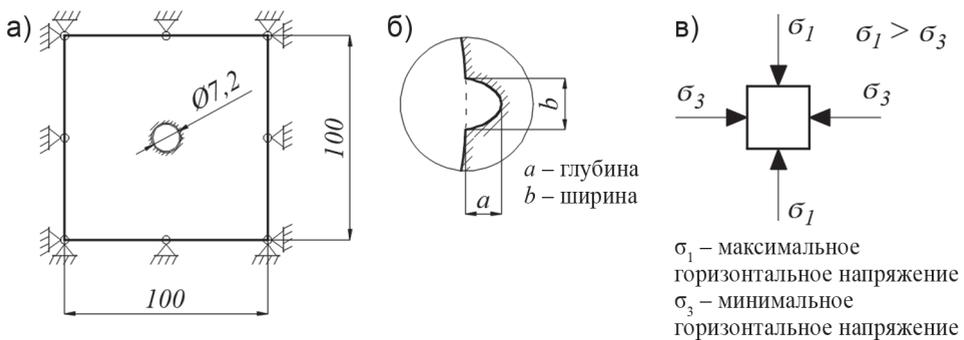


Рис. 1. Расчетная схема численной модели: массив породы размерами 100×100 м с вертикальным стволом диаметром 7,2 м (а); параметры неровности (б); тензор напряжений (в)

Fig. 1. Numerical model design: rock mass with dimensions 100×100 m, with a vertical shaft with diameter 7,2 m is carried (а); parameters of unevenness (б); stress tensor (v)

Таблица 1

Физико-механические характеристики горных пород
Physical and mechanical characteristics of the rock mass

№	Параметр	Значение	Ед. изм.
1	Модуль деформации	$15 \cdot 10^3$	МПа
2	Сцепление	10	МПа
3	Коэффициент Пуассона	0,3	—
4	Угол внутреннего трения	30	град

Таблица 2

Описание модели поведения бетона В30 [33, с. 71]
Description of the behavior model of concrete В30 [33, p. 71]

Параметры материала	В30	Параметры пластичности	
		Угол дилатансии	31
Параметры упругости		Эксцентриситет	0,1
E (ГПа)	26,6 0,2	fb0/fc0	1,16
		K	0,67
		Параметр вязкости	0
		Поведение бетона при сжатии	
Напряжения (МПа)	Пластические деформации	Критерий разрушения C	Пластические деформации
15,3	0	0	0
19,2	4,8249E-05	0	4,8249E-05
22,5	0,000119844	0	0,000119844
25,2	0,000214786	0	0,000214786
27,3	0,000333074	0	0,000333074
28,8	0,000474708	0	0,000474708
29,7	0,000639689	0	0,000639689
30	0,000828016	0	0,000828016
29,7	0,001039689	0,01	0,001039689
28,8	0,001274708	0,04	0,001274708
27,3	0,001533074	0,09	0,001533074
25,2	0,001814786	0,16	0,001814786
22,5	0,002119844	0,25	0,002119844
19,2	0,002448249	0,36	0,002448249
15,3	0,0028	0,49	0,0028
10,8	0,003175097	0,64	0,003175097
5,7	0,003573541	0,81	0,003573541
Поведение бетона при растяжении		Разрушение при растяжении	
Напряжения (МПа)	Деформации трещинообразования	Критерий разрушения T	Деформация трещинообразования
3	0	0	0
0,03	0,001167315	0,99	0,001167315

упрощением созданной ранее Concrete Damage Plasticity model (CDP) [34–36].

Предложенная в статье [29] модель представляет собой набор уравнений для описания упругого и пластического поведения бетона и основана на результатах простейших лабораторных испытаний. Как показывает практика, данная модель с высокой степенью достоверности описывает образование зон пластических деформаций (зон трещинообразования) в бетоне при его нагружении. Модель реалистично описывает переход от разрушения при растяжении к разрушению при сжатии и предлагает решение для моделирования растрескивания и разрушения бетона. Она может быть использована для определения НДС бетонной крепи ввиду простоты подбора параметров и высокой степени точности в описании пластического деформирования бетона.

В первом моделируемом случае (см. рис. 2, а) было рассмотрено напряженно-деформируемое состояние массива горных пород в окрестности вертикального ствола при наличии неровности на его внешнем контуре. Было исследова-

но влияние ориентации вектора главных напряжений относительно неровности на величину максимальных тангенциальных напряжений на контуре крепи для выявления наименее благоприятной ситуации пространственного расположения неровности.

Во втором моделируемом случае (см. рис. 2, б) было рассмотрено влияние геометрических параметров неровности (глубины и ширины) на развитие напряженно-деформируемого состояния крепи ствола (т.е. неровность является частью крепи). Была определена зависимость напряжений и пластических деформаций на контуре крепи от показателя k .

В третьем моделируемом случае (см. рис. 2, в) рассмотрено изменение напряженно-деформируемого состояния на контуре крепи при наличии в закрепном пространстве неровностей, не заполненных бетоном (полостей).

В данной задаче также исследовались зависимость напряжений от введенного показателя k и влияние этого показателя на развитие зоны пластических деформаций в крепи вокруг полости.

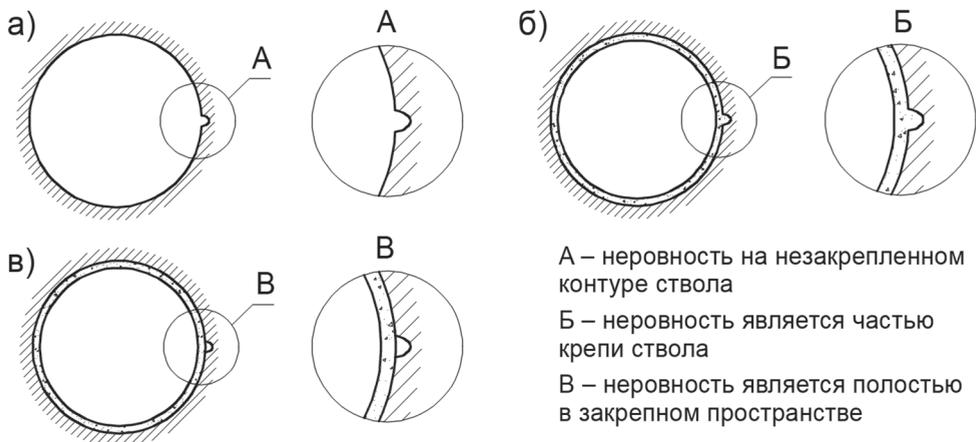


Рис. 2. Моделируемые случаи: неровность на незакрепленном контуре крепи (а); неровность на внешнем контуре крепи ствола (б); полость в закрепном пространстве (в)

Fig. 2. Simulated cases: unevenness on the unfastened contour of the support (a); unevenness on the outer contour of the shaft support (b); cavity in the space behind the support (v)

Результаты

В ходе математического моделирования были получены значения напряжений на контуре выработки при различном угле поворота тензора напряжений в массиве (рис. 3, а). По результатам расчетов были выявлены следующие закономерности (рис. 3, б): напряжения на контуре выработки возрастают нелинейно с увеличением угла поворота тензора напряжений относительно неровно-

сти, достигая максимальных значений в положении, когда вектор максимальных напряжений расположен ортогонально оси углубления исследуемой неровности. Все последующие исследования проведены с учетом наименее выгодного пространственного положения неровности относительно тензора напряжений.

Во втором моделируемом случае были получены следующие закономерности: с изменением геометрии неровно-

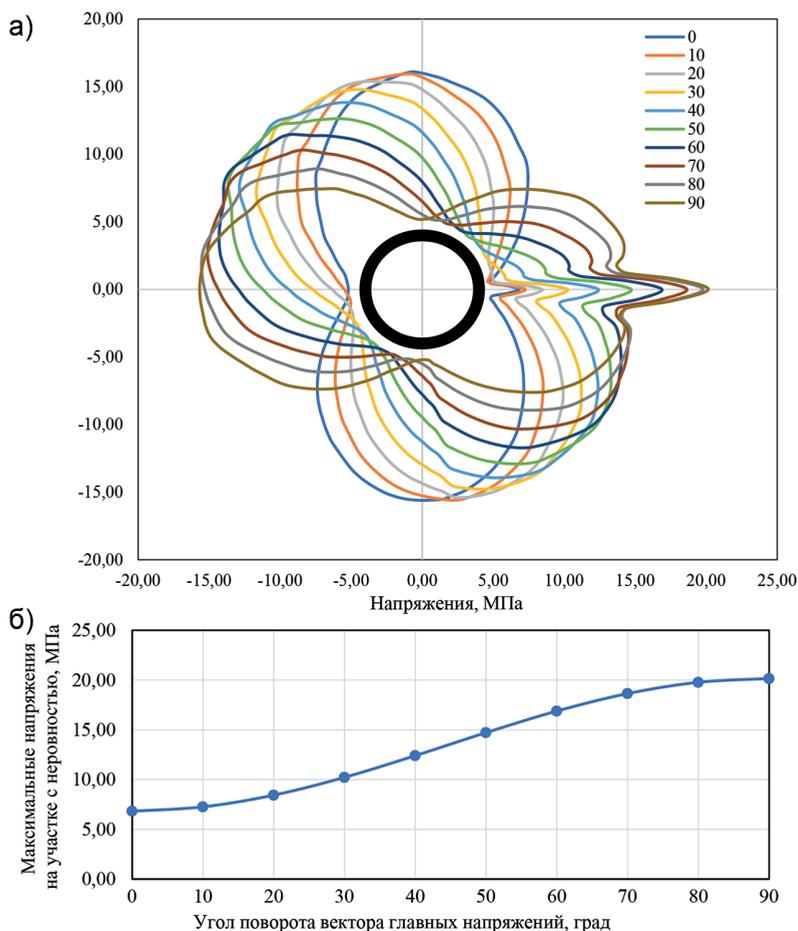


Рис. 3. Тангенциальные напряжения на контуре выработки при различном угле поворота тензора напряжений в массиве: эпюры распределения напряжений вокруг выработки, 0–90 – значения угла поворота тензора напряжений (а); график зависимости максимальных напряжений от угла поворота тензора (б)

Fig. 3. Tangential stresses on the excavation contour at various angles of rotation of the stress tensor in the massif: diagram of stress distribution around the excavation, 0–90 – angle of tensor rotation (a); diagram of stress dependence on the angle of tensor rotation (b)

сти (ее углублением в массив) ширина разрастания зоны пластических деформаций в материале увеличивается при достижении коэффициента k значения 0,6. Глубина разрастания зоны меняется не так активно (рис. 4, а). Максимальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре крепи составили 19,3 МПа. Также с увеличением значения коэффициента k максимальные тангенциальные напряжения на контуре крепи возрастают нелинейно, зависимость близка к экспоненциальной (рис. 4, б). При достижении отношения глубины неровности к ее ширине значения 0,6 характер прироста напряжений на контуре крепи становится более пологим.

Закономерности изменения зоны пластических деформаций представлены на рис. 4.

В третьем моделируемом случае были получены следующие закономерности: максимальные напряжения сконцентрированы на внешнем контуре крепи; с увеличением коэффициента k максимальные тангенциальные напряжения на контуре крепи в зоне полости возрастают нелинейно (рис. 5, а). Характер зависимости максимальных тангенциальных напряжений на контуре крепи становится практически пологим при достижении коэффициента k значения 0,6.

Зона пластических деформаций материала крепи (рис. 5, б) формирует «ко-

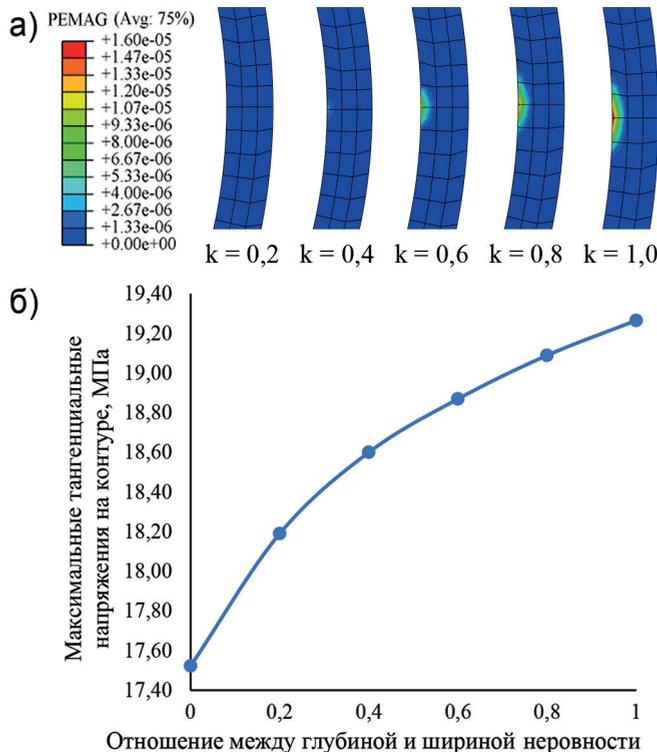


Рис. 4. Результаты расчетов по второму моделируемому случаю: развитие зоны пластических деформаций в зависимости от показателя k (а); развитие максимальных тангенциальных напряжений на контуре крепи ствола в зависимости от показателя k (б)

Fig. 4. Results of calculations for the second simulated case: development of plastic deformation zone depending on the parameter k (a); development of maximum tangential stresses on the contour of the shaft support depending on the parameter k (b)

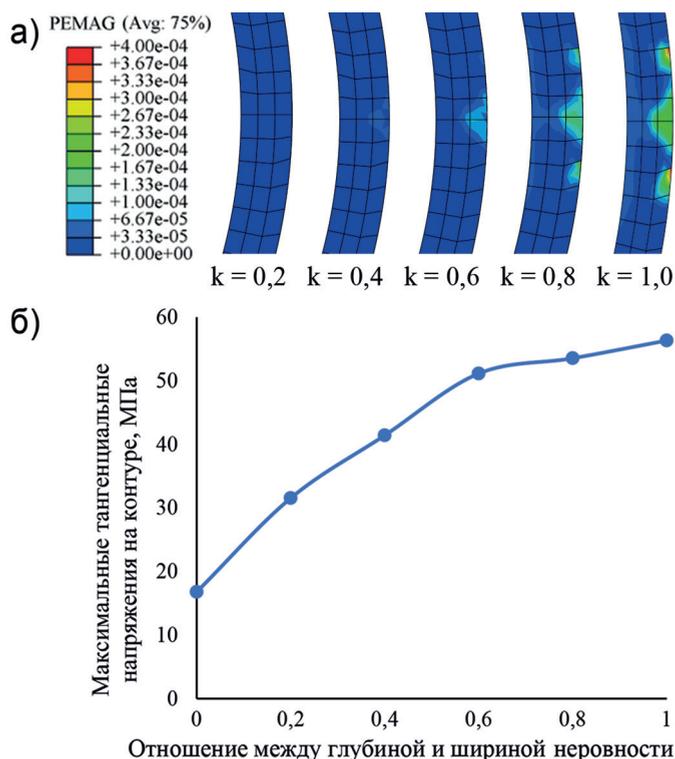


Рис. 5. Результаты расчетов по третьему моделируемому случаю: развитие зоны пластических деформаций в зависимости от показателя k (а); развитие максимальных тангенциальных напряжений на контуре крепи ствола в зависимости от показателя k (б)

Fig. 5. Results of calculations for the second simulated case: development of plastic deformation zone depending on the parameter k (a); development of maximum tangential stresses on the contour of the shaft support depending on the parameter k (b)

рону» с тремя эпицентрами напряжений. Такая картина распределения напряжений объясняется тем, что в углах примыкания крепи к полости образуются концентраторы напряжений, а сама крепь на этом участке испытывает действие изгибающего момента. Напряжения на контуре крепи в районе полости разрастаются с увеличением коэффициента k как по контуру выработки, так и в направлении к ее оси (вглубь крепи). Максимальные тангенциальные напряжения на внешнем контуре крепи ствола составили 57,2 МПа. Это превышает расчетное сопротивление бетона и приведет к образованию трещин на внешнем контуре крепи.

Обсуждение результатов исследований

В ходе проведения исследований методом численного моделирования было установлено, что неровный контур выработки оказывает влияние на ее напряженное состояние на всех этапах существования — при ее проведении, при вводе крепи в работу и при ее эксплуатации. Было установлено, что пространственное расположение неровности перпендикулярно действию максимальных напряжений в массиве закономерно увеличивает нагрузку на контур выработки.

Геометрия неровности также оказывает влияние: с увеличением значения соотношения глубины неровности к ее

ширине нелинейно возрастают напряжения в крепи, а при достижении отношения ее глубины к ширине значения 0,5 прирост напряжений снижается. Данная закономерность характерна для второго и третьего моделируемых случаев. Напряжения на контуре крепи в рамках исследования возрастают с увеличением соотношения глубины неровности и ее ширины.

При применении в создании материала модели SCDP [33] была отслежена динамика появления и развития пластических деформаций в крепи вертикального ствола. Зона пластических деформаций в крепи с неровным контуром в первую очередь распространяется перпендикулярно направлению углубления неровности, это объясняется закономерным ростом напряжений в зоне сжатия. Зона пластических деформаций изменяется последовательно при увеличении значения коэффициента k . Концентрации напряжений в данном случае образуются на внутреннем контуре крепи ствола.

В случае, когда неровность контура выработки представляет собой полость в закрепном пространстве, зона пластических деформаций также расширяется с увеличением коэффициента k ; напряженно-деформированное состояние крепи в данном случае прогнозировать сложнее, появляются три точки концентрации напряжений на внешнем контуре крепи — в углах примыкания полости к крепи и на участке самой крепи в результате действия изгибающего момента.

Исследование рассматривает влияние одной неровности на контур выработки, однако с увеличением числа неровностей неравномерность напряжений на контуре и ее концентрация будет возрастать. Для учета пространственной постановки задачи необходимо в дальнейшем дополнить исследование трехмерным мо-

делированием с целью подтверждения полученных в двумерной постановке задачи результатов.

Заключение

В представленном исследовании предположен анализ влияния неровности на внешнем контуре крепи вертикального ствола на распределение тангенциальных напряжений и пластических деформаций на нем.

Установлено, что на значение напряжений на неидеальном контуре выработки оказывают влияние пространственная ориентация вектора главных напряжений, геометрическая форма самой неровности, а также особенности деформирования материала крепи.

Выявлены качественные зависимости влияния геометрии неровности на значение напряжений на контуре выработки, а также закономерности образования и развития пластических деформаций в крепи для двух случаев:

- неровность является частью крепи ствола;
- неровность является полостью в закрепном пространстве.

При решении задач геомеханики в настоящее время необходимо обращаться к математическому моделированию для учета параметров задачи в явном виде, а также широко использовать существующие подробные модели поведения материалов, которые с высокой достоверностью описывают пластические деформации в конструкции крепи. Для комплексного подхода к строительству горных выработок необходимо тщательно рассчитывать количество взрывчатого материала, учитывать геологию и тектонику месторождения, особенности деформирования материалов при проектировании крепи, а также осуществлять мониторинг и регулярное обследование крепей капитальных сооружений на всех этапах его существования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казикаев Д. М., Сергеев С. В.* Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Изд-во «Горная книга», 2011. — 244 с.
2. *Козел А. М.* Геомеханические вопросы проектирования и поддержания шахтных стволов. — СПб.: Недра, 2010. — 287 с.
3. *Крупенников Г. А., Булычев Н. С., Козел А. М., Филатов Н. А.* Взаимодействие массивов горных пород с крепью вертикальных выработок. — М.: Недра, 1966. — 314 с.
4. *Трушко В. Л., Протосеня А. Г., Матвеев П. Ф., Совмен Х. М.* Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников. — СПб.: СПбГИ, 2000. — 396 с.
5. *Singh S. P.* Prediction and determination of explosive induced damage / *Fragblast 4: 4th International conference on rock fragmentation by blasting (Vienna, Austria, July 1993)*, 1993, pp. 183–192.
6. *Himanshu V. K., Mishra A. K., Roy M. P., Vishwakarma A. K., Singh P. K.* Numerical simulation based approach for assessment of blast induced deformation pattern in slot raise excavation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 144, article 104816. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104816.
7. *Chakraborty A. K., Jethwa J. L., Paithankar A. G.* Effects of joint orientation and rock mass quality on tunnel blasting // *Engineering Geology*. 1994, vol. 37, no. 3-4, pp. 247–262. DOI: 10.1016/0013-7952(94)90059-0.
8. *Рыбак С. А.* Особенности строительства и крепления вертикальных стволов в тектонически напряженном горном массиве // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2008. — № 5. — С. 200–206.
9. *Dhekne P. Y., Balakrishnan V., Jade R. K.* Effect of type of explosive and blast hole diameter on boulder count in limestone quarry blasting // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020, vol. 38, no. 5, pp. 4091–4097. DOI: 10.1007/s10706-020-01280-y.
10. *Agrawal H., Mishra A. K.* Probabilistic analysis on scattering effect of initiation systems and concept of modified charge per delay for prediction of blast induced ground vibrations // *Measurement*. 2018, vol. 130, pp. 306–317. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.08.032.
11. *Agrawal H., Mishra A. K.* Modified scaled distance regression analysis approach for prediction of blast-induced ground vibration in multi-hole blasting // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 202–207. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.07.004.
12. *Протосеня А. Г., Катеров А. М.* Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 6-1. — С. 100–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.
13. *Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V.* Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 1, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
14. *Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D.* Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 105, pp. 160–171. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.017.
15. *Беляков Н. А., Морозов К. В., Емельянов И. А.* Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки // *Горный журнал*. — 2023. — № 5. — С. 89–96. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.
16. *Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабырь Н. В.* Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 253. — С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

17. Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Ефимов А. А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 259–267. DOI: 10.31897/pm.2019.3.259.

18. Протосеня А. Г., Алексеев А. В., Вербило П. Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 252–260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

19. Chou W. I., Bobet A. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay // Tunnelling and Underground Space Technology. 2002, vol. 17, no. 1, pp. 3–19. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00068-2.

20. Yasuda N., Tsukada K., Asakura T. Elastic solutions for circular tunnel with void behind lining // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017, vol. 70, pp. 274–285. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.032.

21. Wang J., Huang H., Xie X., Bobet A. Void-induced liner deformation and stress redistribution // Tunnelling and Underground Space Technology. 2014, vol. 40, pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.008.

22. Yasuda N., Tsukada K., Asakura T. Three-dimensional seismic response of a cylindrical tunnel with voids behind the lining // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 84, pp. 399–412. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.026.

23. Zeng B., Huang D., He J. Analysis of double-O-tube shield tunnelling-induced soil deformation due to ground loss // Géotechnique Letters. 2016, vol. 6, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.1680/jgele.15.00099.

24. Ерофеев Л. М., Мирошникова Л. А. Повышение надежности крепи горных выработок. – М.: Недра, 1988. – 247 с.

25. Chen Z., Jia P. Three-dimensional analysis of effects of ground loss on static and seismic response of shafts // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, vol. 92, article 103067. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103067.

26. Bock S. Numerical modelling of a void behind shaft lining using FDM with a concrete spalling algorithm // Journal of Sustainable Mining. 2014, vol. 13, no. 2, pp. 14–21. DOI: 10.7424/jism140203.

27. Карасев М. А., Петрушин В. В., Рысин А. И. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

28. Карасев М. А., Буслова М. А., Вильнер М. А., Нгуен Т. Т. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола на участке сопряжения с горизонтальной выработкой в соляных породах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 628–637. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.628.

29. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev A., Tan H. Numerical simulation of the mechanical behavior of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 3, article 1112. DOI: 10.3390/app11031112.

30. Мустафин М. Г., Кологривко А. А., Васильев Б. Ю. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 56–62. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.

31. Беликов А. А., Беляков Н. А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.

32. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 16–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.

33. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Jaafar M. S. B., Karimzade K. Simplified damage plasticity model for concrete // *Structural Engineering International*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 68 – 78. DOI: 10.2749/101686616X1081.
34. Pekau O. A., Zhang Z. X. Strain-space cracking model for concrete and its application // *Computers & Structures*. 1994, vol. 51, no. 2, pp. 151 – 162. DOI: 10.1016/0045-7949(94)90046-9.
35. Chen A. C. T., Chen W. F. Constitutive relations for concrete // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1975, vol. 101, no. 4, pp. 465 – 481. DOI: 10.1061/JMCEA3.0002034.
36. Grassl P., Lundgren K., Gylltoft K. Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law // *International Journal of Solids and Structures*. 2002, vol. 39, no. 20, pp. 5205 – 5223. DOI: 10.1016/S0020-7683(02)00408-0. **MIAB**

REFERENCES

1. Kazikaev D. M., Sergeev S. V. *Diagnostika i monitoring napryazhennogo sostoyaniya krep'i vertikal'nykh stvolov* [Diagnosis and monitoring of stress state of vertical shaft supports], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2011, 244 p.
2. Kozel A. M. *Geomekhanicheskie voprosy proektirovaniya i podderzhaniya shakhtnykh stvolov* [Geomechanical issues of designing and maintaining mine shafts], Saint-Petersburg, Nedra, 2010, 287 p.
3. Krupennikov G. A., Bulychev N. S., Kozel A. M., Filatov N. A. *Vzaimodeystvie massivov gornykh porod s krep'yu vertikal'nykh vyrabotok* [Interaction of rock massifs with the support of vertical mine workings], Moscow, Nedra, 1966, 314 p.
4. Trushko V. L., Protosenya A. G., Matveev P. F., Sovmen Kh. M. *Geomekhanika massivov i dinamika vyrabotok glubokikh rudnikov* [Geomechanics of massifs and dynamics of mine workings of deep mines], Saint-Petersburg, SPbGI, 2000, 396 p.
5. Singh S. P. Prediction and determination of explosive induced damage. *Fragblast 4: 4th International conference on rock fragmentation by blasting* (Vienna, Austria, July 1993), 1993, pp. 183 – 192.
6. Himanshu V. K., Mishra A. K., Roy M. P., Vishwakarma A. K., Singh P. K. Numerical simulation based approach for assessment of blast induced deformation pattern in slot raise excavation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 144, article 104816. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104816.
7. Chakraborty A. K., Jethwa J. L., Paithankar A. G. Effects of joint orientation and rock mass quality on tunnel blasting. *Engineering Geology*. 1994, vol. 37, no. 3-4, pp. 247 – 262. DOI: 10.1016/0013-7952(94)90059-0.
8. Rybak S. A. Features of construction and fixing of vertical shafts in a tectonically stressed mountain massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2008, no. 5, pp. 200 – 206. [In Russ].
9. Dhekne P. Y., Balakrishnan V., Jade R. K. Effect of type of explosive and blast hole diameter on boulder count in limestone quarry blasting. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020, vol. 38, no. 5, pp. 4091 – 4097. DOI: 10.1007/s10706-020-01280-y.
10. Agrawal H., Mishra A. K. Probabilistic analysis on scattering effect of initiation systems and concept of modified charge per delay for prediction of blast induced ground vibrations. *Measurement*. 2018, vol. 130, pp. 306 – 317. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.08.032.
11. Agrawal H., Mishra A. K. Modified scaled distance regression analysis approach for prediction of blast-induced ground vibration in multi-hole blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 202 – 207. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.07.004.
12. Protosenya A. G., Katerov A. M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 100 – 113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.
13. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 1, pp. 151 – 162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

14. Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D. Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 105, pp. 160–171. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.017.
15. Belyakov N. A., Morozov K. V., Emelyanov I. A. Methodology of processing field test data to assess the natural stress state of the rock massif by the method of ring unloading. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 89–96. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.
16. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61–70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.
17. Kashnikov Y. A., Ermashov A. O., Efimov A. A. Geological and geomechanical model of the verkhnekamsk potash deposit site. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 259–267. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.259.
18. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252–260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.
19. Chou W. I., Bobet A. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2002, vol. 17, no. 1, pp. 3–19. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00068-2.
20. Yasuda N., Tsukada K., Asakura T. Elastic solutions for circular tunnel with void behind lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 70, pp. 274–285. DOI: 10.1016/j.tust.2017.08.032.
21. Wang J., Huang H., Xie X., Bobet A. Void-induced liner deformation and stress redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014, vol. 40, pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.008.
22. Yasuda N., Tsukada K., Asakura T. Three-dimensional seismic response of a cylindrical tunnel with voids behind the lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 84, pp. 399–412. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.026.
23. Zeng B., Huang D., He J. Analysis of double-O-tube shield tunnelling-induced soil deformation due to ground loss. *Geotechnique Letters*. 2016, vol. 6, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.1680/jgele.15.00099.
24. Erofeev L. M., Miroshnikova L. A. *Povyshenie nadezhnosti krepki gornykh vyrabotok* [Increasing the reliability of mine workings support], Moscow, Nedra, 1988, 247 p.
25. Chen Z., Jia P. Three-dimensional analysis of effects of ground loss on static and seismic response of shafts. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 92, article 103067. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103067.
26. Bock S. Numerical modelling of a void behind shaft lining using FDM with a concrete spalling algorithm. *Journal of Sustainable Mining*. 2014, vol. 13, no. 2, pp. 14–21. DOI: 10.7424/jsm140203.
27. Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 48–66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.
28. Karasev M. A., Buslova M. A., Vilner M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 628–637. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.628.
29. Belyakov N., Smirnova O., Alekseev A., Tan H. Numerical simulation of the mechanical behavior of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 3, article 1112. DOI: 10.3390/app11031112.
30. Mustafin M. G., Kologrivko A. A., Vasiliev B. Yu. Accuracy of building digital terrain models based on periodic airborne laser scanning of a mining object. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 2, pp. 56–62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.

31. Belikov A. A., Belyakov N. A. Method of predicting the stress-strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 20–34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
32. Protosenya A. G., Katerov A. M. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 16–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.
33. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Jaafar M. S. B., Karimzade K. Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural Engineering International.* 2017, vol. 27, no. 1, pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.
34. Pekau O. A., Zhang Z. X. Strain-space cracking model for concrete and its application. *Computers & Structures.* 1994, vol. 51, no. 2, pp. 151–162. DOI: 10.1016/0045-7949(94)90046-9.
35. Chen A. C. T., Chen W. F. Constitutive relations for concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division.* 1975, vol. 101, no. 4, pp. 465–481. DOI: 10.1061/JMCEA3.0002034.
36. Grassl P., Lundgren K., Gylltoft K. Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law. *International Journal of Solids and Structures.* 2002, vol. 39, no. 20, pp. 5205–5223. DOI: 10.1016/S0020-7683(02)00408-0.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Деменков Петр Алексеевич¹ — д-р техн. наук, профессор, декан Строительного факультета, e-mail: demenkov_pa@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-1599-8080,

Романова Екатерина Леонидовна¹ — аспирант, e-mail: s215064@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-4448-4292,

Котиков Дмитрий Александрович¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Научный центр геомеханики и проблем горного производства, e-mail: Kotikov_DA@pers.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Романова Е.Л., e-mail: ekaterina.romanova.1997@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.A. Demenkov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dean of Construction Department, e-mail: demenkov_pa@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-1599-8080,

E.L. Romanova¹, Graduate Student, e-mail: s215064@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-4448-4292,

D.A. Kotikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Center of Geomechanics and Mining Problems, e-mail: Kotikov_DA@pers.spmi.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.L. Romanova, e-mail: ekaterina.romanova.1997@mail.ru.

Получена редакцией 22.05.2023; получена после рецензии 15.07.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 22.05.2023; received after the review 15.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.