

Information about author

V. M. Tyupin<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Engineering Sciences, tyupim@mail.ru  
<sup>1</sup>Belgorod State University, Belgorod, Russia

Abstract

Russian and foreign technical literature says that blasting in jointed rock mass induces zones with altered physical properties and geomechanical behavior beyond the perimeter holes. These zones are identified as the crushed zone, radially fractured zone, spalling zone and shattered zone. The shattered zone lacks scientific attention although this zone can reach the width of  $(30-170)d_{\text{ch}}$  ( $d_{\text{ch}}$ —blasthole diameter) in open pit mines and  $(25-75)d_{\text{ch}}$  in underground mines. The earlier implemented research answers the question on quantitative change in the stresses and strains of a jointed rock mass during blasting. The initiation mechanism of the shattered zone remains unclear. This study aims to find the initiation mechanism of the shattered zone in jointed rock mass and to determine its stress state after blasting. Three series of full-scale experimental studies have been performed in jointed granite rock mass using acoustic emission methods, ultrasonic techniques and deformation measurements. It is found that in the shattered zone, blocks in the jointed rock mass displace radially from the blast holes with deformation of the joint surfaces and with elastic strains preserved after blasting. For this reason, this zone is qualified as the zone of blast-induced residual stresses. The article gives the formula for the residual radial compressive stresses under short-delay multi-row blasting. The numerical calculation using this formula and the actual mine data prove the formula validity. The method of destressing blasting is proposed to unload rockburst-hazardous rock mass from stresses in the areas of the confining pressure phenomena such as spalling and sloughing. This method has been tried in Priargunsky's mines in granite rock mass (1400 m long area) was unloaded from stresses in mines). The authors highly appreciate participation of I. I. Shishkin, B. M. Belyaev, V. M. Panikov and V. A. Pashchikova in the experimental research.

**Keywords:** blast-induced residual stress zone, jointed rock mass, mechanism, formula, rockburst-hazardous rock mass, destressing blasting method.

References

1. Polonskiy G. I. Blast. Fourth edition, revised and enlarged. Moscow: Nedra, 1980. 190 p.
2. Polonskiy G. I., Fedorov M. S. Effects of shock and blast in deformable media. Moscow: Promstroyizdat, 1957. 276 p.
3. Feshchenko A. A., Brisov V. S. Perimeter control blasting in waterworks construction. Moscow: Energiya, 1972. 119 p.

6. Adushkin V. V., Spirak A. A. Underground blasts. Moscow: Nauka, 2007. 578 p.
7. Kartuzov B. N., Tyupin V. M. Determination of damage zones induced by blasting in jointed rock mass. *Zvestiya vuzov Gornyzhurnal*, 1993. No. 4. pp. 53–58.
8. Tyupin V. M. Blasting and Geomechanical Processes in High-Stress Fractured Rock Mass. Belgorod: IO Belgorod IIM BelGU, 2017. 192 p.
9. Ralushkev B. R. Prediction of process-dependent parameters in blasted rocks in open pit mines. *Alma-Ata: Nauka*, 1993. 239 p.
10. Voldrmin S. A., Kurdum G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. D., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017. Vol. 12, No. 13. pp. 3978–3986.
11. Ghiasi M., Askamejad H., Dindarloo S. R., Shamsoddini H. Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016. Vol. 26, Iss. 2. pp. 183–186.
12. Li-Yun Yang, Chen-Xi Ding. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018. Vol. 107. pp. 150–158.
13. Xiang Xia, Haibo Li, Jingtao Niu, Jianchun Li, Yaqun Liu. Experimental study on amplitude change of blast vibrations through steps and ditches. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014. Vol. 71. pp. 77–82.
14. Poluhin O. N., Petin A. M., Ignatenko I. M., Dunayev V. A., Kononov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS Geomix. *International Journal of Pharmacy & Technology*, 2016. Vol. 8, Iss. 4. pp. 26809–26816.
15. Eremenko A. A., Rylnikova M. V., Esina E. N. Monitoring stress-strain state of structural defects and underoceanic rock mass. *GMB*, 2015. Special issue 15. Sustainable Performance Conditions for Mineral Resources Sector of Russia. Iss. 3. pp. 105–116.
16. Aksenov A. A., Ozhiganov I. A., Gulbanov D. V. The use of pressings-in method with MHS device in order to determine geomechanical state of massif and its physico-mechanical properties. *Zvestiya vuzov Gornyzhurnal*, 2015. No. 6. pp. 17–22.
17. Galanov R. B., Kisel A. A., Andreev A. A., Zubikov V. V. Pre-stopping assessment of stress state of ore body S-2 in Skalskaya Mine. *Gornyzhurnal*, 2016. No. 7. pp. 10–14. DOI: 10.17580/gzh.2016.07.02
18. Eremenko A. A., Shaposhnikova N. N., Filippov V. N., Kalurin A. I. Development of scientific framework for safe and efficient geotechnology for rockburst-hazardous mineral deposits in Western Siberia and the Far North. *Gornyzhurnal*, 2019. No. 10. pp. 33–39. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.03
19. Rodionov V. M., Sazov I. A., Tsvetkov V. M. Basic geomechanics. Moscow: Nedra, 1986. 300 p.
20. Bahilashov I. V., Kartozoya B. A. Mechanical processes in rock mass. Moscow: Nedra, 1986. 270 p.

УДК 622.283

## ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ СТВОЛОВ ШАХТЫ ИМ. ГУБКИНА

**С. В. СЕРГЕЕВ**<sup>1</sup>, проф., д-р техн. наук, sergey.sergaev.v@mail.ru  
**Е. Д. ВОРБОВЫЙ**<sup>1</sup>, директор, канд. техн. наук  
**И. М. ИГНАТЕНКО**<sup>2</sup>, директор Института наук о Земле, канд. техн. наук  
**А. В. ЗИНЧЕНКО**<sup>3</sup>, старший научный сотрудник

<sup>1</sup>МПП ООО «ГеоСтройМиниГоринг БелГУ», Белгород, Россия

<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

<sup>3</sup>ОАО «ВИОГЕМ», Белгород, Россия

### Введение

Стволы шахты им. Губкина АО «КМАруда» эксплуатируются с конца 40-х годов прошлого века. Они пройдены в сложных гидрогеологических условиях [1, 2]. Например, при проходке ствола № 1 диаметром в свету 4 м на глубине 72 м произошел прорыв пльвуна в ствол. После ликвидации аварии крепь в интервале глубин от 71,6 до 99,4 м была усилена чугунными тобингами высотой 1,5 м и спинкой толщиной 30 мм. При этом

Приведены результаты обследования состояния крепи существующего и строящегося вертикальных стволов шахты им. Губкина АО «КМАруда». Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния крепи по измеренным деформациям. Определены величины давлений на крепь стволов в наиболее характерных интервалах по глубине. Установлено, что крепь обладает необходимым уровнем эксплуатационной надежности.

**Ключевые слова:** шахтный ствол, комбинированная крепь, бетон, тобинг, операльный контроль, деформометр, напряжения, деформации, нагрузка на крепь.

**DOI:** 10.17580/gzh.2020.10.05

произошло уменьшение диаметра ствола до 3,4 м. После 70-летней эксплуатации ствола возникла необходимость и была выполнена комплексная диагностика напряженного состояния крепи на всех интервалах, в том числе закрепленных кирпичной, бетонитовой, тобинговой и бетонной крепью.

В настоящее время в связи с понижением горных работ потребовались стволы глубиной до 450 м. Проектом проходки новых стволов диаметром в свету 8 м было предусмотрено предварительное замораживание водонасыщенного массива до глубины 148 м. Ствол в этом интервале крепили тюбингобетонной крепью.

Существуют две основные технологии сооружения стволов в водонасыщенных породах: предварительное замораживание массивов и тампонаж околоствольного пространства [3]. Тампонаж применяют при небольших мощностях и напорах подземных вод, в основном в песчаных породах. Особенностью данной технологии является трудность достижения водонепроницаемости околоствольного массива. При этом в нем возможно образование «окон», через которые будет поступать в ствол вода.

Замораживание позволяет нейтрализовать эти риски в любых типах пород. Однако давление замороженных пород на крепь значительно возрастает, особенно в глинистых породах [4]. Поэтому применение технологии должно сопровождаться мониторингом состояния крепи [5]. Кроме этого, в соответствии с требованиями п. 4.6 СП 91.13330.2012 «Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80», при проектировании наиболее ответственных выработок, повреждение которых ведет к остановке всего предприятия, расположенных на участках со сложными условиями поддержания, следует предусматривать установку контрольных приборов и замерных станций.

Натурные наблюдения за напряженным состоянием крепи клецевого ствола проводили на пяти горизонтах по методике института ВИОГЕМ, ранее апробированной в стволах Яковлевского рудника, рудника «Пилло» и др. [4, 6].

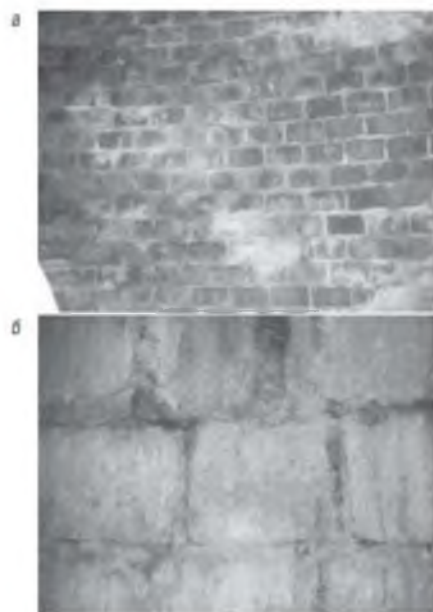
#### Оценка напряженного состояния крепи ствола № 1

Обследование кирпичной, бетонитовой и бетонной крепи выполняли по ГОСТ 22690–2015 неразрушающими методами контроля. В интервале глубин от 0 до 31,9 м керамический кирпич имеет марку М150, в цементно-песчаный раствор – марки М50. В интервале глубин от 31,9 до 52,5 м – бетонная крепь класса В 15 по прочности на сжатие. Прочностные характеристики крепи соответствуют проектным значениям в обследуемых интервалах. Фрагменты крепи в этом интервале показаны на **рис. 1**.

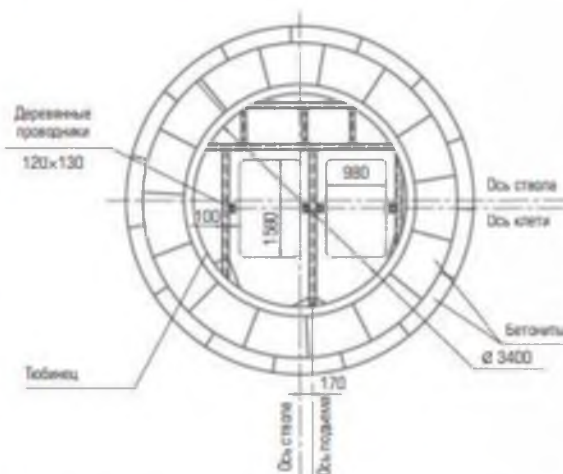
В интервале глубин от 71,6 до 99,4 м крепь состоит из двух рядов бетонита общей толщиной 75 см. Внутренний слой крепи выполнен из чугунных тюбингов. Ствол здесь проходит через обводненные пески и юрские глины. Сечение ствола в данном интервале показано на **рис. 2**.

Существуют экспериментальные и теоретические методы оценки напряженного состояния существующей крепи [7–11]. Наиболее оптимальным в данном случае является определение напряжений в тюбингах методом разгрузки [12]. На **рис. 3** показан первый этап разгрузки – распил ребра на глубину 11 мм с одной стороны. По измеренным деформациям по закону Гука определены напряжения. Нагрузки на внешний контур крепи рассчитывали по методике проф. Н. С. Бузычева с использованием программного обеспечения Stvol V [13, 14].

Напряжения в тюбингах определяли на глубинах 61,6; 76,6 и 84 м.



**Рис. 1.** Фрагменты кирпичной (а) и бетонитовой (б) крепи с южной стороны ствола № 1 шахты им. Губкина



**Рис. 2.** Сечение ствола в месте усиленного крепления в интервале глубин от 71,6 до 99,4 м

В **табл. 1** приведены величины деформаций  $\epsilon_0$ , напряжений  $\sigma_0$ , горного  $P_g$ , гидростатического  $P_h$  и общего  $P_0$  давления на крепь ствола, полученные при обработке результатов измерений и расчета.

За период длительной эксплуатации ствола № 1 вследствие кудриции произошло уменьшение толщины слоев тюбингов на 1,5–2 мм, а горизонтальных ребер – на 3–4 мм (двусторонняя коррозия). Это привело к снижению несущей способности тюбинговой крепи на 5–7 %. Однако фактические напряжения



**Рис. 3. Распил ребра тюбинга на глубину 11 мм для определения фактических напряжений**

не превышают 22 МПа, что в 10 раз меньше допускаемого по СП 16.13330.2017 расчетного сопротивления при сжатии для серого чугуна. Следовательно, комбинированная крепь сохраняет свою несущую способность с достаточным запасом. Обследование крепи из бетона и кирпича показало, что за период эксплуатации ствола не произошло снижения их марки. Это объясняется благоприятными температурно-влажностными условиями эксплуатации ствола.

Величину тангенциальных напряжений в бетонной крепи определим с использованием величины давления на тюбингобетонную крепь, расположенную ниже:  $P_{\text{в}} = 0,66$  МПа (см. табл. 1). В результате расчета по формуле Ляме тангенциальные сжимающие напряжения в бетоне крепи составляют 3,7 МПа. Это ниже предела прочности бетона марки М200 на одноосное сжатие.

**Оценка напряженно-деформированного состояния крепи клетового ствола**

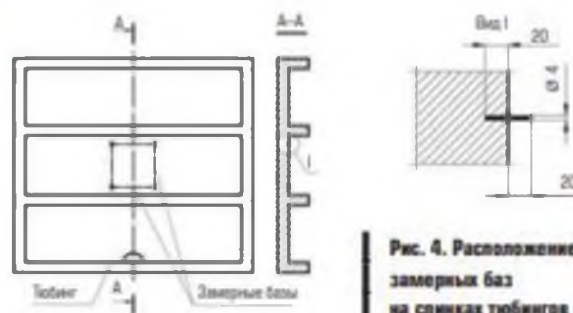
В клетовом стволе по мере проходки были установлены пять измерных станций в различных типах пород. Для измерения деформаций тюбингов применили маяки-стержни, расположенные на расстоянии 300 мм друг от друга (измерная база).

**Таблица 1. Основные данные измерений и расчетов**

Глубина, м	Номер тюбинговых колец	Тип пород	$\epsilon_0 \cdot 10^{-5}$	$\sigma_0$ , МПа	$P_{\text{в}}$ , МПа	Расчетные величины		$P_{\text{р}}$ , МПа
						$P_{\text{с}}$ , МПа	$P_{\text{п}}$ , МПа	
61,6	4	Песок, насыщенный водой	8	12	0,72	0,38	0,06	0,44
76,6	14	Песок, насыщенный водой	16	22	1,31	0,47	0,15	0,61
84,1	19	Глина	6	10	0,60	0,79	0	0,79

**Таблица 2. Результаты натуральных наблюдений в клетовом стволе шахты им. Губкина**

Номера измерных станций	Номера колец	Глубина, м	Тип пород	Тангенциальные деформации стенок $\epsilon_0 \cdot 10^{-3}$	Тангенциальные напряжения в стинках $\sigma_0$ , МПа	Фактическая нагрузка на крепь $P_{\text{ф}}$ , МПа	Расчетная нагрузка на крепь $P_{\text{р}}$ , МПа
1	4	32	Мел белый плотный	10,3	10,8	0,8	0,3
2	29	69	Песок кварцевый мелкозернистый	17,3	18,1	1,3	0,4
3	41	86	Аргиллит и глина	24,0	25,1	1,8	0,8
4	67	128	Кварцит	5,4	6,0	0,4	0,9
5	81	147	Кварцит	6,2	6,5	0,5	1,1



**Рис. 4. Расположение измерных баз на стинках тюбингов**

Маяки, представляющие собой металлические стержни диаметром 4 мм, запрессовали в стинки тюбингов (рис. 4). Расстояние между ними периодически измеряли механическим тензодатчиком конструкции ЦНИИС с точностью до 0,01 мм [4]. В общей сложности на 22 тюбингах было установлено 68 измерных баз, из них 33 в вертикальном и 35 в горизонтальном направлениях. Первоначальные замеры проводили после установки тюбингов в ствол. По измеренным деформациям определяли тангенциальные напряжения, а по ним – нагрузки на крепь  $P_{\text{ф}}$  [13]:

$$P_{\text{ф}} = \frac{\sigma_{\text{в(2)}}}{k_{\text{в(2)}}(m'_{\text{в(2)}} - k_{\text{в(2)}}m'_{\text{в(2)}})}$$

где  $\sigma_{\text{в(2)}}$  – измеренные тангенциальные напряжения в тюбингах;  $k_{\text{в(2)}}$ ,  $k_{\text{в(2)}}$  – коэффициенты передачи напряжений через слои крепи;  $m'_{\text{в(2)}}$ ,  $m'_{\text{в(2)}}$  – коэффициенты, учитывающие размеры слоев крепи.

В табл. 2 представлены основные результаты измерений и расчетов по измерным станциям. Приведенные величины напряжений в крепи являются наибольшими, так как соответствуют наименьшим температурам замораживания околоствольных пород.

Из данных табл. 2 следует, что расчетные величины давлений на крепь в замороженных породах превышают в 1,5–2 раза проектные величины. Это соответствует результатам натуральных наблюдений, проведенных институтом ВИОГЕМ на Яковлевском руднике [4, 15]. Наибольшие напряжения в тюбингах крепи зафиксированы в замороженных глинах, а наименьшие – в трещиноватых кварцитах.

**Заключение**

1. **Натурные наблюдения**, выполненные на шахте им. Губкина, направлены на повышение безопасной эксплуатации стволов в период дальнейшей разработки полезных ископаемых на более глубоких горизонтах.
2. **Диагностика напряженного состояния крепи ствола № 1** показала, что крепь сохраняет свою несущую способность во всех

типах пород. Это позволяет продолжить безопасную эксплуатацию и исключить затраты на усиление крепи.

3. **Натурные наблюдения** в клетевом стволе показали, что давление на крепь в замороженных породах превышает в 1,5–2 раза проектные величины. Рекомендуется их продолжить для оценки возможного влияния процесса сдвижения массива на крепь ствола в ходе дальнейшей разработки месторождения.

**Библиографический список**

1. Бобаянц Г. М., Вейлейб Л. К., Згурин М. Я. и др. Подземная разработка железных залежей. – М.: Недра, 1988. – 168 с.
2. Казиков Д. М., Козырев А. А., Костыкин Э. В., Мороз М. А. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождения полезных ископаемых: учебное пособие. – М.: Горная книга, 2016. – 490 с.
3. Ding Yu, Kejin Yin, Jinxing Ma, Hideki Shimada. Vertical shaft support improvement studies by stata grouting at aquifer zone // *Advances in Civil Engineering*, 2018, Vol. 2018, ID 5365987. DOI: 10.1155/2018/5365987
4. Казиков Д. М., Сергеев С. В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. – М.: Горная книга, 2011. – 244 с.
5. Walton G., Kim E., Sirha S., Sturgis G., Beberick 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, P. 160–171.
6. Методические рекомендации по проведению натурных наблюдений в стволах, сооружаемых в сложных горно-геологических условиях. – Белгород: ВНОГЕМ, 1985. – 35 с.
7. Сентябов С. В. Исследование и прогноз изменения напряженно-деформированного состояния крепи шахтных стволов на Гайском руднике // *ГИАБ*, 2018, № 10, С. 79–85.
8. Саммал А. С., Сергеев С. В., Анциферов С. В., Деев П. В. Определение области применения бетонной крепи стволов в зонах тектонических нарушений // *Известия Ульяновского государственного университета. Научно-Естественнонаучный журнал*, 2018, № 4, С. 317–326.

9. Анциферов С. В., Саммал А. С., Деев П. В. Оценка напряженно-деформированного состояния многослойной крепи вертикального ствола с учетом отклонений форм поперечных сечений от проектных // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, 2017, Т. 4, № 2, С. 19–25.
10. Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao. Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling // *Processes*, 2019, Vol. 7, Iss. 1, DOI: 10.3390/pr7010002
11. Kunli Hong, Eunchol Han, Kwangsoo Kang. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, Vol. 9, Iss. 4, P. 702–708.
12. Волк Н. П. Напряженное состояние обделов из чугунных тубингов // *Метрострой*, 1990, № 1, С. 17–19.
13. Булычев Н. С. Механика сооружений : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
14. Самодетельство в государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016616080. Оценка технического состояния основных видов несущих конструкций подземных выработок по измеренным деформациям «Sivol-V» / С. В. Сергеев, Е. Д. Воробьев, А. В. Зинченко // *Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных ; дата регистрации 06.06.2016.*
15. Xiangdong Hu, Tao Fang, Jin Chen, Hui Ren, Wang Guo. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction // *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, Vol. 72, P. 55–63.

«ГОРНЫЕ ЗЕМЛЯ», 2020, № 10, pp. 64–67  
 DOI: 10.17580/gz.2020.10.05

**Engineering diagnostics of shaft lining in Gubkin Mine**

**Information about authors**

**S. V. Sergeev**<sup>1</sup>, Professor, Doctor of Engineering Sciences, sergey.sergeev.vgn@mail.ru  
**E. D. Vambiev**<sup>1</sup>, Director, Candidate of Engineering Sciences  
**L. M. Ignatenko**<sup>2</sup>, Director of the Institute of Earth Sciences, Candidate of Engineering Sciences  
**A. V. Zinchenko**<sup>3</sup>, Senior Researcher  
<sup>1</sup>GeoshellMonitoring BelGU, Belgorod, Russia  
<sup>2</sup>Belgorod State University, Belgorod, Russia  
<sup>3</sup>VOGEM, Belgorod, Russia

**Abstract**

Shafts in Gubkin Mine, KMAruda have been in operation since the late 1940s. The shafts are sunk in difficult hydrogeological conditions. At the present time, due to transition to deeper levels, deeper mine dumps are required. It is necessary to reinforce shaft lining in watered rocks. During long-term service of shaft 1, due to corrosion, thickness of liner plates and horizontal ribs has decreased by 1.5–2 and 3–5 mm, respectively (two-side corrosion). As a result, the load-bearing capacity of the tubbing has lowered by 5–7%. At the same time, the actual stresses are not higher than 22 MPa, which is 10 times less than the design compression resistance of gray cast iron as per Construction Code SP 16.13330.2017. Field studies have been performed in Gubkin Mine toward improvement of operating safety of shafts during mineral mining at deeper levels. Stress state diagnostics of lining in shaft 1 shows that the lining preserves its load-bearing capacity in all types of rocks. Thus, safe operation can be continued without extra expenses connected with the lining reinforcement. The field studies in the cage shaft show that pressure on the lining in looser rocks is 1.5–2 times higher than the design values. It is recommended to continue the studies to estimate effects of possible rock displacements on the lining during further mining.

**Keywords:** mine shaft, mixed-type support, concrete, tubbing, operational control, deformationer, stresses, strains, load on lining.

**References**

1. Bobayants G. M., Veyleyb L. K., Zhurin M. Ya. et al. Underground mining of ferrous quarities. Moscow: Nedra, 1988. 168 p.
2. Kazikov D. M., Kozlyev A. A., Kostykin E. V., Moroz M. A. Geomechanical behavior contour in mineral mining: Teaching aid. Moscow: Gornaya kniga, 2016. 490 p.

3. Ding Yu, Kejin Yin, Jinxing Ma, Hideki Shimada. Vertical shaft support improvement studies by stata grouting at aquifer zone. *Advances in Civil Engineering*, 2018, Vol. 2018, ID 5365987. DOI: 10.1155/2018/5365987
4. Kazikov D. M., Sergeev S. V. Diagnostics and monitoring of stressed state of vertical shafts timbering. Moscow: Gornaya kniga, 2011. 244 p.
5. Walton G., Kim E., Sirha S., Sturgis G., Beberick 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.
6. Guidelines on Field Studies in Mine Shafts Constructed in Difficult Geological Conditions. Belgorod: VNOGEM, 1985. 35 p.
7. Sentjabov S. V. Analysis and prediction of change in stress state of shaft lining in Gubkin mine. *GOR*, 2018, No. 10, pp. 79–85.
8. Sammal A. S., Sergeev S. V., Antsiferov S. V., Deev P. V. Estimating concrete shaft lining applica tion field in zones of tectonic disturbance. *Izvestiya Ulyanovskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauchno-Ezhestvennaya Seriya*, 2018, No. 4, pp. 317–326.
9. Antsiferov S. V., Sammal A. S., Deev P. V. Stress-strain state estimation in multilayer support of vertical shafts, considering off-design cross-sectional deformation. *Fundamentallye i prikladnyye voprosy gornykh nauk*, 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 19–25.
10. Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao. Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling. *Processes*, 2019, Vol. 7, Iss. 1, DOI: 10.3390/pr7010002
11. Kunli Hong, Eunchol Han, Kwangsoo Kang. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, Vol. 9, Iss. 4, pp. 702–708.
12. Volk N. P. Stress state in lining made of cast iron tubbing. *Metrostroy*, 1990, No. 1, pp. 17–19.
13. Bulychen N. S. Mechanics of underground structures: textbook. 2nd enlarged and revised edition. Moscow: Nedra, 1994. 382 p.
14. Sergeev S. V., Vorobev E. D., Zinchenko A. V. Engineering assessment of basic load-bearing structures in underground mines by deformation measurements using Sivol-V Software. State Registration Certificate No. 2016616080. Unified Register of Russian Programs for Computers and Databases. Registered: 06.06.2016.
15. Xiangdong Hu, Tao Fang, Jin Chen, Hui Ren, Wang Guo. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, Vol. 72, pp. 55–63.