

Обоснование параметров буровзрывных работ, обеспечивающих герметичность замораживающих колонок

Кузина А. В.^{1*}, Ключев Р. В.²

¹ Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
г. Москва, Россия

*e-mail: 1314598@mail.ru

Реферат

Целью работы является совершенствование технологии проходки шахтных стволов с замораживанием массивов, сложенных породами малой прочности. Статья содержит результаты исследования технологии создания ледопородного массива с заданными свойствами.

Методология проведения исследований заключается в нормировании массы зарядов, безопасных по воздействию взрывной волны на основе оценки состояния ледопородного ограждения при буровзрывной проходке стволов тензометрическим и сейсмическим методами, что позволяет достоверно оценить параметры сохранности ледопородного ограждения.

Результаты и их анализ. Установлено, что разрушение замораживающих колонок под действием давления связано с деформированием ледопородного массива. При динамическом нагружении деформации увеличиваются, причем при переходной форме они могут быть более глубокими. Определено, что процессы в мерзлых породах требуют дополнительных затрат энергии на фазовое превращение льда. Установлено, что прямая ударная волна безопасна для замораживающих колонок на расстоянии более 1,5 м. Получены сейсмограммы взрывания шпуров на разном расстоянии от забоя. Приведены модели процессов распространения волн в массиве. Рекомендовано определять сейсмобезопасность сооружений по действию отраженных волн, в результате которого в массиве и около поверхностей отражения возникают растягивающие напряжения.

Ключевые слова: шахтный ствол; замораживание; ледопородный массив; взрывная волна; замораживающая колонка.

Введение. Проблеме влияния взрывных работ на сохранность замораживающих колонок посвящены многие работы, связанные с проходкой шахтных стволов с искусственным замораживанием. Аналогичные исследования выполнены на Михайловском ГОКе и на Яковлевском руднике (Курская магнитная аномалия) в глинистых породах.

В публикациях рассматривается воздействие на замораживающие колонки только прямой взрывной волны сжатия, а сам замороженный массив принимается монолитным и прочным [1, 2]. Разрушение колонок под действием давления на ледопородное ограждение при последовательной схеме проходки шахтного ствола связано с деформированием ледопородного ограждения. При динамическом нагружении число вмятин увеличивается [3, 4]. На переходном этапе деформирование может протекать в более активной форме, чем на основном [5, 6].

В исследованиях [7, 8] рекомендована методика взрывания, при которой безопасным расстоянием до замораживающих колонок от контурного ряда считается 1,2 м.

При меньшем расстоянии предложено применять специальные приемы (двухступенчатый вруб, контурное взрывание, электродетонаторы короткозамедленного действия).

В [9] подчеркивается, что в мерзлых породах не успевают образовываться плоскости ослабления, что повышает их сопротивляемость деформированию. При работе в двухслойном массиве, представленном грунтом и слоем замороженного грунта, необходимо учитывать отражение и преломление взрывных волн при их переходе через границу раздела.

Оценка обеспечения сейсмобезопасности сооружений в породном массиве сводится к определению безопасной массы зарядов и безопасных расстояний воздействия взрывной волны. Существующие исследования по использованию взрывных работ при проходке стволов способом замораживания не дают достаточно полного представления о результатах их воздействия на состояние ледопородного массива и расположенного в нем оборудования. Исследования влияния взрывных работ в шахтных стволах, проходимых с замораживанием пород, являются актуальными и нуждаются в продолжении.

Методика исследования. Параметры сохранности ледопородного ограждения оцениваются тензометрическим и сейсмическим методами, исходя из данных о состоянии массива и напряжениях слагающих его пород [10, 11].

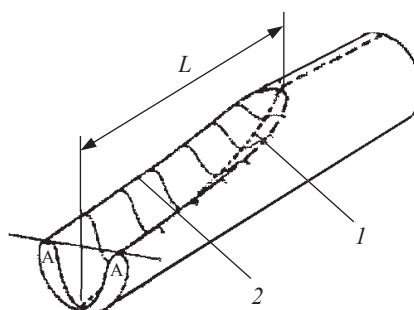


Рисунок 1. Схема деформирования массива: 1 – центральная трещина; 2 – периферийные трещины

Figure 1. The rock mass deformation scheme: 1 – central crack; 2 – marginal cracks

Таблица 1. Условия деформирования массива в модели
Table 1. Conditions for the rock mass deformation in the model

Количество ВВ, кг	Расстояние до труб, см	Параметры труб, мм	Деформации, мм
Аммонит 6ЖВ			
1,2	20	146 × 8	500 × 120 × 42 570 × 90 × 8
1,5	12	146 × 8	520 × 85 × 7 605 × 40 × 8
1,8	16	146 × 8	500 × 108 × 12
Детонит А10			
1,2	12	152 × 8	520 × 85 × 7
1,5	12	146 × 8	520 × 120 × 58
Скальный аммонит			
1,2	16	152 × 8	520 × 85 × 7
1,2	20	152 × 8	520 × 85 × 7
		146 × 8	610 × 85 × 8

Скорость смещения частиц массива определяется индукционными датчиками с выводом сигналов на электронный осциллограф.

Сложность организации натуральных исследований в глубоком стволе обусловила необходимость создания полупромышленного стенда на базе неглубокого ствола,

разработанного Всероссийским научно-исследовательским проектным институтом ОАО «ВИОГЕМ».

Результаты. Измерением количественных параметров воздействия взрывов установлено, что воздействие взрывания врубовых шпуров по величине больше, чем оконтуривающих зарядов, что не согласуется с некоторыми теоретическими представлениями.

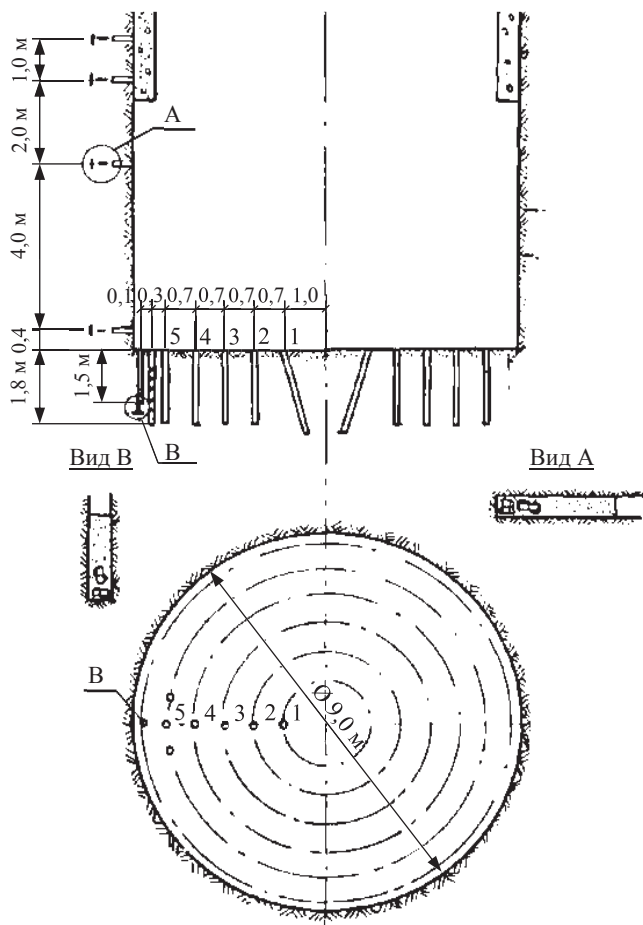


Рисунок 2. Схема установки датчиков в стволе
Figure 2. Diagram of sensors installation in the mine shaft

При взрывании 1,5 кг скального аммонита № 1 на расстоянии 20 см от трубы в колонке образовалась вмятина длиной $L = 520$ мм, шириной 85 мм и глубиной 7 мм, а при взрывании 1,2 кг детонита 10А на расстоянии 12 см образовалась вмятина шириной 120, длиной 440 и глубиной 58 мм (рис. 1). Деформирование происходит при взрывании более 1,5 кг взрывчатого вещества на расстоянии менее 20 см от замораживающей колонки (табл. 1).

Деформирование замораживающих колонок под действием прямой ударной волны происходит на расстоянии менее 1,5 м от эпицентра взрыва [12, 13].

Процесс деформирования ледопородного ограждения исследовали с помощью индукционных датчиков (рис. 2). Результаты взрывания шести рядов шпуров забоя даны в табл. 2.

Для каждого ряда шпуров были определены зависимости скорости смещения грунта от расстояния до забоя по следующим зависимостям:

$$\begin{cases} V_{rk}^{\max} = A_{rk}^{\max} e^{-\alpha k Z}, \\ V_{Zk}^{\max} = A_{Zk}^{\max} e^{-\alpha k Z}, \\ V_{rk}^{\text{cp}} = A_{rk}^{\text{cp}} e^{-\beta k Z}, \\ V_{Zk}^{\text{cp}} = A_{Zk}^{\text{cp}} e^{-\beta k Z}, \end{cases}$$

где V_{rk}^{\max} , V_{Zk}^{\max} – максимальные значения амплитуд скоростей смещения для каждого ряда (номером 1 обозначается вруб, последующие от вруба ряды обозначаются цифрами натурального ряда), см/сек; V_{rk}^{cp} , V_{Zk}^{cp} – средние значения амплитуд скоростей смещения для каждого ряда соответственно в радиальном и вертикальном направлениях, см/сек; A_{rk}^{\max} , A_{Zk}^{\max} , A_{rk}^{cp} , A_{Zk}^{cp} – постоянные коэффициенты для каждого ряда шпуров для различных рядов; αk , βk – коэффициент затухания для каждого ряда; Z – расстояние от точки наблюдения до груди забоя в вертикальном направлении, м. Значения коэффициентов определялись по методу наименьших квадратов.

Таблица 2. Количественные результаты действия заряда ВВ
Table 2. Quantitative results of the explosive charge action

Номер ряда шпуров	A_{rk}^{\max}	A_{Zk}^{\max}	A_{rk}^{cp}	A_{Zk}^{cp}	α_r	α_z	β_r	β_z
1	71,93	64,72	50,91	–	0,78	0,65	0,67	–
2	51,42	72,97	41,98	40,25	0,66	0,76	0,76	0,67
3	56,26	76,71	55,70	43,33	0,65	0,70	0,77	0,67
4	66,02	79,84	56,91	53,91	0,69	0,64	0,74	0,67
5	76,71	74,44	63,82	67,83	0,68	0,61	0,84	0,80
6	75,94	72,97	58,32	52,67	0,68	0,63	0,80	0,78

A_{rk}^{\max} , A_{Zk}^{\max} , A_{rk}^{cp} , A_{Zk}^{cp} – постоянные коэффициенты для каждого ряда шпуров для различных рядов, k – номер шпура; α_r , α_z , β_r , β_z – коэффициенты затухания для каждого ряда.

Из табл. 2 видно, что для коэффициентов α_r , α_z , β_r , β_z не наблюдается систематической зависимости от положения заряда и его веса. Следовательно, можно для всех зависимостей взять коэффициент затухания постоянным и равным его среднеарифметическому значению. Среднее значение коэффициента затухания $\alpha = 0,71$.

Количественные значения скорости смещения врубовых, оконтуривающих и отбойных шпуров практически не различаются [14, 15].

Взрывание врубовых зарядов инициируется электродетонаторами мгновенного действия, разброс срабатывания которых составляет 4 мс, поэтому концентрация взрывчатых веществ (ВВ) на единицу объема породы невелика. Влияние взрывания вруба больше, чем последующих шпуров, несмотря на то, что расстояние между ним и массивом значительнее (табл. 3).

При взрыве забоя в незакрепленной части заходки действуют дифрагированные волны, возникающие при достижении возмущения от взрывания зарядов забоя и угла заходки [16]. После этого угол заходки становится генератором продольных

и поперечных волн, которые распространяются в вертикальном направлении вдоль незакрепленной части заходки в глубину ледопородного образования, которое смещается, т. е. взрыв забоя формирует поле напряжений с развитием существующих трещин и с образованием новых трещин и заколов [17, 18].

Форма импульсов совпадает с формой импульса скоростей смещения частиц от действия сферического излучателя упругих волн. Генерируемые сферическим излучателем упругие волны деформируют массив на глубину 20–30 см, а далее распространяются в виде упругого сжатия и не образуют трещин или отколов, что характерно для отраженных волн.

Феномен возникновения отражения упругих волн от внешней поверхности ледопородного ограждения поясняется рис. 3, на котором показаны варианты отражения волны как от свободной поверхности – а, так и от поверхности раздела между высоко- и низкоскоростным материалом – б.

Таблица 3. Параметры смещения пород взрывом и их значения
Table 3. Parameters of rock displacement by explosion and their values

Номер ряда шпуров	В радиальном направлении		В вертикальном направлении	
	Расстояние, м	Время, мс	Расстояние, м	Время, мс
1	3,7	2,41	3,7	2,47
2	3,0	1,62	3,0	1,92
3	2,3	1,67	2,3	1,82
4	1,6	1,70	1,6	1,74
5	0,9	1,39	0,9	1,58
6	0,2	1,46	0,2	1,82

Исследованный феномен отражения волн в стволе «В-4» относится к случаю б. Прямая волна со скоростью 4300 м/с в замороженном песке подходит к талому песку со скоростью 850 м/с. При отражении импульса сжатия от свободной поверхности рождается упругая волна, которая сохраняет нулевое напряжение. На поверхности возникает импульс, который для поддержания нулевого нормального напряжения должен быть растягивающим. В течение короткого времени растягивающий и сжимающий импульсы суммируются, и полное напряжение является суммой напряжений в каждом из импульсов.

Скорость импульса сжатия описывается моделью:

$$\sigma L = -\rho_0 U_L C_L;$$

$$U_L = \frac{\sigma_L}{\rho_0 C_L},$$

где ρ_0 – плотность песка.

Взаимодействие импульса сжатия с границей раздела сред, где скорость справа (850 м/сек) меньше скорости слева (4300 м/с), показано на рис. 3, б.

При переходе границы раздела возникает импульс сжатия. Этот отраженный импульс меньше, чем импульс, отраженный от свободной поверхности. В исследованном случае скорость отраженной волны составила 80 % от скорости прямой волны:

$$\Delta = 4300 - 850 = 3450 \text{ м/с.}$$

Поверхность ледопородного ограждения с близкой к нулю температурой отражает продольные волны сжатия, формируя в стенках ствола зону нарушенных

пород глубиной 0,2–0,4 м, которую следует учитывать при расчете ледопородного ограждения. Скорости продольной волны не являются преломленными скоростями с затуханием, а представляют собой скорости отраженных растягивающих волн, как разницы отраженного и частично прошедшего за преграду не преломленного импульса сжатия в не замороженных песках.

При строительстве Яковлевского рудника на контакте песков и глин в глинах на глубине 310 м было повреждено сразу шесть колонок, имеющих отклонение на 0,3 м от проектного направления. Первая поврежденная колонка находилась на расстоянии 4 м от оконтуривающих зарядов, и не должна была быть разрушенной. За четыре месяца весь внутренний ряд замораживающих колонок был выведен из строя взрывными работами. Его отключили, оставив только наружный ряд, который не был поврежден. На стволах № 1 и № 3 колонки внутреннего ряда были выведены из строя на тех же глубинах и с той же последовательностью.

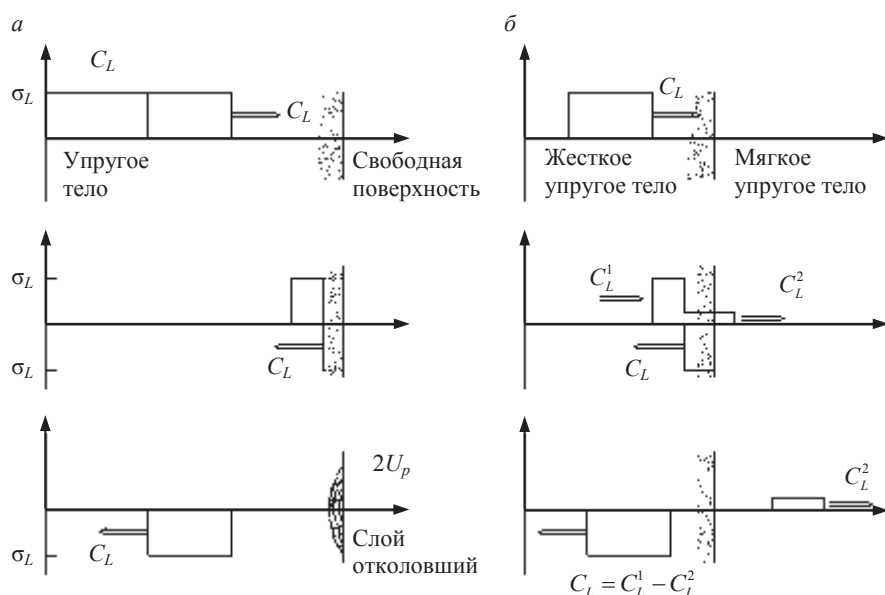


Рисунок 3. Параметры отраженного импульса давления: C_L – скорость отраженной волны; σ_L – амплитуда напряжения, U_p – массовая скорость

Figure 3. Parameters of the reflected pressure pulse: C_L – reflected wave speed; σ_L – stress amplitude, U_p – mass velocity

Предлагается определять сейсмобезопасность сооружений по действию отраженных волн, в результате которых в массиве и около поверхностей отражения возникают растягивающие напряжения. При этом приоритетен не критический поток энергии волны сжатия, а скорость распространения взрывной волны и физические характеристики массива.

Выводы. Сохранность ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов с замораживанием обеспечивается нормированием массы зарядов и взрывных волн на основе оценки напряженного состояния массивов.

В ледопородных массивах затраты энергии на фазовое превращение льда превышают энергоёмкость строительства ствола.

Рекомендуется определять сейсмобезопасность сооружений в ледопородных массивах по действию отраженных волн, в результате которых в массиве возникают растягивающие напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иудин М. М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2009. Т. 6. № 1. С. 46–50.
2. Дорман Я. А. Специальные способы работ при строительстве метрополитенов. М.: Транспорт. 1981. 303 с.
3. Дороговейко И. З., Курманов М. М., Голубятников А. Е. Особенности буровзрывных работ при проходке шахтных стволов способом замораживания // Шахтное строительство. 1976. № 6. С. 28–29.
4. Кузина А. В. Систематизация причин повреждений замораживающих колонок при строительстве глубоких вертикальных стволов с использованием метода искусственного замораживания // ГИАБ. 2006. № 11. С. 396–420.
5. Паланков И. М. Некоторые особенности буровзрывных работ в стволах шахт, проходимых способом искусственного замораживания // ГИАБ. 2015. № 6. С. 281–286.
6. Кузина А. В., Ключев Р. В., Валиев Н. Г. Прогнозирование состояния ледопородного массива при проходке вертикального шахтного ствола с замораживанием // Известия УГТУ. 2023. Вып. 3(71). С. 87–93. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-3-87-93
7. Паланков И. М. Методика расчета безопасного расстояния замораживающих колонок от оконтуривающих шпуров при проходке стволов в замороженных породах // Маркшейдерия и недропользование. 2017. № 2(88). С. 13–17.
8. Кузина А. В. Особенности буровзрывных работ при проходке вертикальных стволов с применением способа искусственного замораживания грунтов // ГИАБ. 2006. № 10. С. 394–401.
9. Трупаков Н. Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных стволов шахт. М.: Недра, 1983. 270 с.
10. Gao G., Guo W., Ren Y. Coupled modelling of artificial freezing along clay-sand interface under seepage flow conditions // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 211. Art. 103865. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103865
11. Nikolaev P., Jivkov A. P., Margetts L., Sedighi M. Modelling artificial ground freezing subjected to high velocity seepage // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. Vol. 221. Art. 125084. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125084
12. Liu Zh., Guo W., Sun Y., Li Q. Hydro-thermal-solid modeling of artificial ground freezing through cold gas convection // International Journal of Thermal Sciences. 2024. Vol. 198. Art. 108893. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.108893
13. Yan Q., Wu W., Zhong H., Zhao Z., Zhang Ch. Temporal and spatial variation of temperature and displacement fields throughout cross-passage artificial ground freezing // Cold Regions Science and Technology. 2023. Vol. 209. Art. 103817. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103817
14. Zueter A. F., Sasmito A. P. Cold energy storage as a solution for year-round renewable artificial ground freezing: Case study of the Giant Mine Remediation Project // Renewable Energy. 2022. Vol. 203. P. 664–676. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.093
15. Gao G., Guo W., Ren Y. Numerical study on coupled modelling of artificial freezing marine soil // Computers and Geotechnics. 2023. Vol. 159. Art. 105409. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105409
16. Гендлер С. Г., Медова Е. А. Обеспечение аэрологической безопасности рабочего персонала карьеров при массовых взрывах // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 132–143. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-132-143
17. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Kondratiev V. V., Tynchenko V. S., Gladkikh V. A., Iushkova L. V., Brigida V. S. Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for extracting Pb and Zn // Materials. 2023. No. 16. Art. 7004. DOI: 10.3390/ma16217004
18. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyshev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing // Metallurgist. 2023. Vol. 67. No. 1-2. P. 96–103. DOI: 10.1007/s11015-023-01493-5

Поступила в редакцию 28 февраля 2024 года

Сведения об авторах:

Кузина Александра Владимировна – заведующая кафедрой техники и технологии горного и нефтегазового производства Московского политехнического университета. E-mail: 1314598@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8064-2366>

Ключев Роман Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией управления горнотехническими системами Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук. E-mail: klyuev-roman@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>

Rationale for the drilling and blasting parameters which provide the tightness of the freezing columns

Aleksandra V. Kuzina¹, Roman V. Kliuev²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.

² Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract

Research objective is to improve the technology of sinking mine shafts with freezing of massifs composed of rocks of low strength. The article contains the results of a study of the technology of creating an ice-bearing massif with specified properties.

Methods of research are reduced to the normalizing the mass of charges and explosion-safe charges based on the assessment of the condition of the ice wall during drilling and blasting of shafts by strain-gauge and seismic methods, which makes it possible to reliably assess the parameters of the ice-wall safety.

Research results and analysis. It has been established that the destruction of the freezing columns under the influence of pressure is associated with the ice massif deformation. Under dynamic loading, deformations increase, and with a transitional form they can be deeper. It is determined that the processes in frozen rocks require additional energy costs for the ice phase transformation. It was determined that a direct shock wave is safe for freezing columns at a distance of more than 1.5 m. Seismograms of blasting holes at different distances from the face were obtained. Models of wave propagation processes in the rock mass are introduced. It is recommended to determine the seismic safety of structures by the action of reflected waves, as a result of which tensile stresses occur in the rock mass and near the reflection surfaces.

Keywords: mine shaft; freezing; ice massif; blast wave; freezing column.

REFERENCES

1. Iudin M. M. Safety provision of bore stability during defrosting of ice barrier. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M. K. Ammosova = Proceedings of the Ammosov North-Eastern Federal University*. 2009; 6(1): 46–50. (In Russ.)
2. Dorman Ia. A. *Special methods of work during the construction of subways*. Moscow: Transport Publishing; 1981. (In Russ.)
3. Dorogoveiko I. Z., Kurmanov M. M., Golubiatnikov A. E. Features of drilling and blasting operations when sinking mine shafts using the freezing method. *Shakhtnoe stroitelstvo = Mine construction*. 1976; 6: 28–29. (In Russ.)
4. Kuzina A. V. Systematization of causes of damage to freezing columns during construction of deep vertical shafts using the artificial freezing method. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2006; 11: 396–402. (In Russ.)
5. Palankoev I. M. Particular qualities of blasting in shafts, constructed by method of ground freezing. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 6: 281–286. (In Russ.)
6. Kuzina A. V., Klyuev R. V., Valiev N. G. Prediction of the state of the ice-bearing massif during the penetration of a vertical mine shaft with freezing. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2023; 3(71): 87–93. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/2307-2091-2023-3-87-93
7. Palankoev I. M. Particular qualities of blasting in shafts, constructed by method of ground freezing. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2017; 2(88): 13–17. (In Russ.)
8. Kuzina A. V. Features of drilling and blasting when sinking vertical shafts using the methods of artificial ground freezing. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2006; 10: 394–401. (In Russ.)
9. Trupak N. G. *Freezing of rocks during the construction of vertical mine shafts*. Moscow: Nedra Publishing; 1983. (In Russ.)
10. Gao G., Guo W., Ren Y. Coupled modelling of artificial freezing along clay-sand interface under seepage flow conditions. *Cold Regions Science and Technology*. 2023; 211: 103865. Available from: doi: 10.1016/j.coldregions.2023.103865

11. Nikolaev P., Jivkov A. P., Margetts L., Sedighi M. Modelling artificial ground freezing subjected to high velocity seepage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023; 221: 125084. Available from: doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125084

12. Liu Zh., Guo W., Sun Y., Li Q. Hydro-thermal-solid modeling of artificial ground freezing through cold gas convection. *International Journal of Thermal Sciences*. 2024; 198: 108893. Available from: doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.108893

13. Yan Q., Wu W., Zhong H., Zhao Z., Zhang Ch. Temporal and spatial variation of temperature and displacement fields throughout cross-passage artificial ground freezing. *Cold Regions Science and Technology*. 2023; 209: 103817. Available from: doi: 10.1016/j.coldregions.2023.103817

14. Zueter A. F., Sasmito A. P. Cold energy storage as a solution for year-round renewable artificial ground freezing: Case study of the Giant Mine Remediation Project. *Renewable Energy*. 2022; 203: 664–676. Available from: doi: 10.1016/j.renene.2022.12.093

15. Gao G., Guo W., Ren Y. Numerical study on coupled modelling of artificial freezing marine soil. *Computers and Geotechnics*. 2023; 159: 105409. Available from: doi: 10.1016/j.compgeo.2023.105409

16. Gendler S. G., Medova E. A. Ensuring the aerologic safety of open pit workforce under largescale blasting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 132–143 (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-4-132-143

17. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Kondratiev V. V., Tynchenko V. S., Gladkikh V. A., Iushkova L. V., Brigida V. S. Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for extracting Pb and Zn // *Materials*. 2023; 16: 7004. Available from: doi: 10.3390/ma16217004

18. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Zyukin D. A., Karlina A. I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing // *Metallurgist*. 2023; 67(1-2): 96–103. Available from: doi: 10.1007/s11015-023-01493-5

Received 28 February 2023

Information about the authors:

Aleksandra V. Kuzina – Head of the Department of Mining and Oil and Gas Production Equipment and Technology, Moscow Polytechnic University. E-mail: 1314598@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8064-2366>

Roman V. Kliuev – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Mine Engineering Systems Control, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences. E-mail: kluev-roman@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>

Для цитирования: Кузина А. В., Ключев Р. В. Обоснование параметров буровзрывных работ, обеспечивающих герметичность замораживающих колонок // *Известия вузов. Горный журнал*. 2024. № 2. С. 92–100. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-92-100

For citation: Kuzina A. V., Kliuev R. V. Rationale for the drilling and blasting parameters which provide the tightness of the freezing columns. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 2: 92–100 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-92-100