

ОСОБЕННОСТИ ПРОХОДКИ ЗОНЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПОРОД

А.Г. Апарин¹, А.А. Санковский¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: alekseyap@icloud.com

Аннотация: Изучены причины прорыва рассолов в зоне температурного градиента при строительстве вертикальных шахтных стволов с применением метода искусственного замораживания пород. С целью предотвращения попадания рассолов в ствол предложено проведение тампонажа горных пород в этой зоне как обязательного мероприятия, а также обоснована необходимость совершенствования способов его проведения. Проблема аварийных водопроявлений характерна, в основном, при строительстве рудников для добычи калийных и соляных руд, что связано с растворимостью галитовых, сильвинитовых и карналлитовых отложений, слагающих соляную толщу. Главной опасностью при разработке данных типов месторождений является необратимость затопления рудника и невозможные потери полезного ископаемого. Приток грунтовых вод может до такой степени повлиять на способ разработки, что вместо сухой добычи будет возможна только добыча с подземным растворением солей. По этой причине технологии строительства рудников для добычи соли очень требовательны к вопросам защиты от водопритокков и безопасной организации работ. Аварии, связанные с прорывами вод, происходили на разных этапах освоения месторождений, в том числе и при проходке вскрывающих выработок. Наиболее распространенным способом охраны выработок при вертикальной проходке через водоносные горизонты при вскрытии соляных месторождений является замораживание вмещающих пород. Из истории применения метода искусственного замораживания пород известно, что наиболее часто аварийные ситуации возникали на границе между замороженными и незамороженными породами, из чего следует, что технологии ведения работ на данном участке требуют особого анализа и прогноза.

Ключевые слова: проходка ствола, искусственное замораживание, горные породы, соль, температурный градиент, трещины, гидроизоляция, тампонаж горных пород.

Для цитирования: Апарин А. Г., Санковский А. А. Особенности проходки зоны температурного градиента при строительстве вертикальных стволов с использованием метода искусственного замораживания пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 51–61. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_51.

Peculiarities of passing through a temperature gradient in vertical shaft sinking with artificial ground freezing

A.G. Aparin¹, A.A. Sankovsky¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: alekseyap@icloud.com

Abstract: The causes of brine breakouts in temperature gradients in vertical shaft sinking and construction with artificial ground freezing are analyzed. Aimed to prevent brine inrushes in shafts, it is proposed to obligatory perform grouting in such zones using improved and advanced techniques. The problem connected with water inrush accidents is mainly typical of potash and salt mines due to solubility of halite, sylvinite and carnallite rocks composing salt strata. The primary hazard in mining of such ore is the irreversibility of the mine flooding and, accordingly, the non-recoverability of the mineral loss. The groundwater inflows can affect a mining method so that only mining with underground dissolution of salt can be used instead of dry mining. For this reason, the salt mine construction technologies are extremely particular about safety of operations and protection from inflows of water. Accidents connected with water breakouts take place in different phases of mining, including accessing. A common method of protection of openings in vertical sinking across aquifers when accessing salt deposits is freezing of enclosing rock mass. History of the artificial ground freezing method shows that the most frequent accidents take place at the interface of frozen and non-frozen rocks, which means that the work technique in this zone requires special analysis and prediction.

Key words: shaft sinking, artificial ground freezing, rocks, salt, temperature gradients, fractures, hydraulic seal, rock mass grouting.

For citation: Aparin A. G., Sankovsky A. A. Peculiarities of passing through a temperature gradient in vertical shaft sinking with artificial ground freezing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(2):51-61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_51.

Введение

Искусственное замораживание пород является эффективным методом временного изменения свойств вмещающих пород при геотехнических работах. Это обратимый процесс без существенного воздействия на окружающую среду, применяемый для изменения гидромеханических свойств (прочность, жесткость и проницаемость) массива и обеспечения локального улучшения несущей способности.

Метод искусственного замораживания широко использовался ранее как метод надежного снижения рисков повреждения существующих конструкций при строительстве вертикальных стволов, в частности при подготовке стволов для разработки соляных месторождений, а также для эффективного контроля грунтовых вод на этапе проходки.

Данный способ был запатентован в Германии в XIX в. и с тех пор, постоянно совершенствуясь, достиг современной технической зрелости [1]. До наших дней способ замораживания пород многократно применялся при строительстве вертикальных стволов, однако не все проекты были завершены успешно [2–4]. Как опробованная технология в горной отрасли искусственное замораживание пород выступает проверенным способом, обеспечивающим надежные условия для проходки стволов. Метод искусственного замораживания пород заключается в бурении кругового контура скважин глубиной до 1000 м вокруг будущего ствола и обсаживании их стальными трубами. В них помещают питающие полимерные трубы, а затем по замкнутой кольцевой системе нагнетают охлажденный, как правило, до -30 – 40 °С, циркули-

рующий хладоноситель. Применяемые при замораживании температуры зависят от свойств подземных вод и непосредственно от их засоленности [5, 6]. В настоящее время ведутся исследования по оптимизации расположения замораживающих скважин при наличии постоянного водопритока [7, 8].

Процесс формирования ледопородного ограждения состоит из трех фаз: формирование льда вокруг каждой отдельно взятой колонки; соединение отдельных ледяных участков между собой; рост ледяной завесы внутрь и наружу. Время формирования ледопородного контура вокруг выработки зависит от температуры хладоносителя, а также скорости его циркуляции. Необходимая защита и безопасные условия для начала строительства формируются во второй фазе, рис. 1. С целью сокращения энергопотребления на период активного замораживания ведутся исследования технологии переменного замораживания [9]. Расширение ледяной завесы в сторону выработки исключает осыпание пород во время ведения работ.

Необходимо принимать во внимание силы давления, которые возникают при замораживании пород [10]. Они оказывают воздействие на замораживающие колонки и на крепь шахтного ствола [11]. В случае недоформированности ледопородного ограждения с образованием непромороженных участков, или «окон», могут возникнуть катастрофические последствия в самом начале строительства [12].

Метод замораживания пород

Целью замораживания пород является обеспечение герметизации имеющихся горизонтов подземных вод до верхней части покровной соли. Из этого следует, что, с одной стороны, необходимо ввести замораживающие колонки на такую глубину в соляные толщи, чтобы

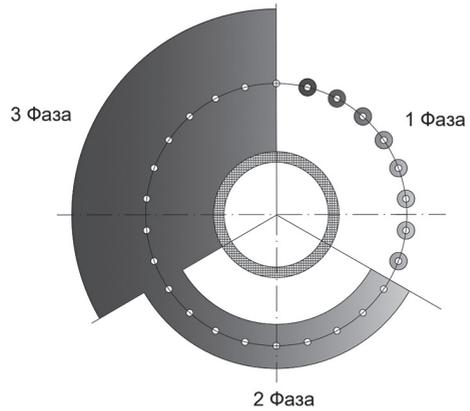


Рис. 1. Фазы формирования ледопородного ограждения вокруг ствола

Fig. 1. Phases of frozen wall construction around mine shaft

надежно защитить строящийся ствол от водопритоков, и, с другой стороны, замораживающие колонки должны быть введены в соляные породы на минимально необходимую глубину, чтобы избежать образования значительных зон температурных разрывов в результате термических деформаций соляного массива [13].

В прошлом применение указанного метода при проходке шахт на калийных месторождениях сопровождалось множественными затруднениями [14–16]. Прорывы рассолов на границе между покровными и соляными толщами приводили к необходимости изменения способа ведения проходческих работ [17]. Это связано с большими финансовыми, временными и техническими затратами [18–20].

Причинами являлись:

- отклонения скважин в процессе бурения от вертикали, вследствие чего замораживающие колонки не достигали соляной толщи, что являлось причиной образования непромороженных участков в ледопородной завесе, из-за которых не были заморожены рассолопритоки в зоне перехода к соляным породам [21–23];

- замораживающие станции не обладали достаточной холодопроизводительностью для замораживания минерализованных подземных вод, вследствие чего в проектные сроки формировалось ледопородное ограждение недостаточной толщины, что вело к прорыву воды в ствол [24].

Однако при устранении указанных недочетов, то есть при введении замораживающих колонок в компактную соль и обеспечении достаточной холодопроизводительности замораживающей станции, происходили прорывы рассолов [25], несмотря на то, что в ходе опережающего бурения было установлено наличие компактных и без нарушений сплошности соляных пород [26].

Причины подобного были установлены Дайльманн-Ханиэль ГмбХ в недавнем прошлом, на стволах Коленфельд и Ридель, построенных для компании «K+S» [27].

При применении метода глубокого замораживания пород между средними температурами по окружности расположения замораживающих колонок и исходными температурами горных пород наблюдается значительное различие. В соляной толще, куда необходимо ввести замораживающие колонки (с целью замораживания рассолов, залегающих над соляной толщей), подобное расхождение температур может достигать 50 °С.

Замораживание до расхождения температур, равного 25 °С, является стандартным способом замораживания. При большей разнице температур имеется в виду глубокий способ замораживания, применяемый в первую очередь для строительства стволов на калийных и соляных месторождениях, где, наряду с обычными солями NaCl, встречаются насыщенные MgCl₂ рассолы, для эффективного замораживания которых требуется гораздо более низкая температура. Вследствие большого температурного

перепада в переходной зоне между замораживаемыми породами и соляной толщей образуются температурные разрывы [28, 29]. Это явление невозможно предотвратить, так как для устойчивого замораживания рассолов, заключенных в соляно-мергельной толще, необходима очень низкая температура замораживания. Вследствие этого в соляной толще вокруг строящегося ствола возникают вертикальные, радиальные и тангенциальные напряжения, которые значительно превышают прочностные характеристики соляных пород [30]. При этом вблизи окружности расположения замораживающих скважин происходит замораживание рассолов, проникающих в образовавшуюся систему разрывов. Таким образом, аксиальные и радиальные разрывы в замороженной области не представляют опасности для проходки [31].

Опасность представляют тангенциальные трещины и разрывы, образующиеся за границами ледопородного ограждения [32]. Особенно в том случае, если указанные разрывы имеют доступ к водопритокам вышележащих горизонтов и связаны с горизонтальными и радиальными разрывами в слабозамороженных породах, залегающих ниже замораживающих колонок [33].

В этом случае, если не проводятся предварительные тампонажные работы, существует большая вероятность поступления рассолов в ствол, из чего следует неизбежность проведения тампонажных работ.

Выводы и предложения

Зона температурных разрывов в переходной зоне (на контакте с соляным массивом) является потенциальным источником опасности, открывая новые каналы водопритоков в ствол как на этапе проходки, так и при последующей эксплуатации. Причиной образования

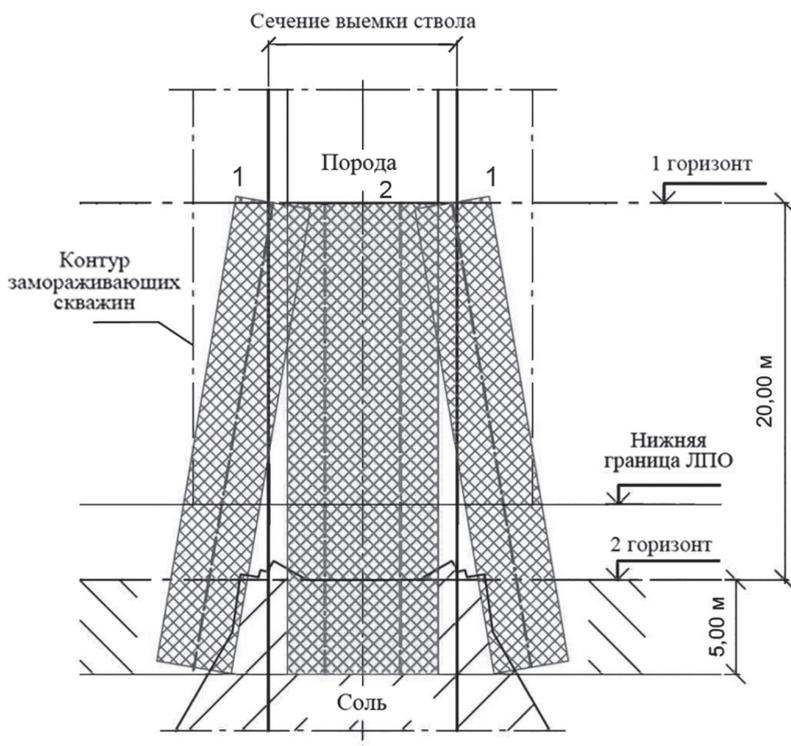


Рис. 2. Рекомендуемая схема опережающего бурения
 Fig. 2. Recommended advanced drilling pattern

трещин является разность между исходными температурами пород и температурой в замораживающей скважине. Чем ниже температура и больше длительность замораживания, тем выше интенсивность трещинообразования и скорость его распространения. С целью минимизировать образование и распространение температурных разрывов авторами рекомендуется проведение опережающего инъекционного тампонажа посредством цементации массива на данном участке строительства ствола. Предварительный тампонаж (цементацию) следует проводить при приближении забоя ствола к нижней границе ледопородного ограждения и, следовательно, к границе образования температурных трещин.

В настоящий момент уже разработаны тампонажные материалы, предназна-

ченные для применения при проведении проходческих работ при низких температурах. Одной из подобных технологий является метод цементации пород с применением низкотемпературных двухкомпонентных $MgO/MgCl_2$ смесей [34]. При контакте с водой полимерная пена увеличивается в объеме, заполняя трещины и полости, и обеспечивает гидроизоляцию и уплотнение породного массива. Проходка с предварительной цементацией требует проведения разведочных работ с целью качественного определения водоносных трещин и их потенциальной водопроницаемости [35].

Ниже авторами представлена принципиальная схема опережающего бурения на участке распространения температурных разрывов с устройством двух основных горизонтов, рис. 2. Заштрихованными областями обозначена зона

расположения тампонирующих скважин.

Перед достижением нижней отметки ледопородного ограждения устраивается забой опережающего бурения с вертикальными и наклонными (порядка $6^\circ - 12^\circ$ от оси) опережающими скважинами, глубиной до 25 м, для монтажа обсадных труб и последующего нагнетания через них цементного раствора. Все обсадные трубы оснащаются противовыбросовым оборудованием [36]. Для устройства каждой скважины предусматривается обсадная труба с задвижкой, чтобы при возникновении расчленения или при газопроявлениях она могла быть надежно перекрыта. Количество скважин определяется из условия достаточного обеспечения заполнения всех трещин. Бурение скважин возможно с применением стволовой буровой установки. При этом следует отметить, что рыхлая почва требует значительно большего количества скважин для цементации, нежели трещиноватая порода [37].

Оборудование для приготовления и нагнетания тампонажных растворов должно иметь производительность, обеспечивающую непрерывный процесс цементации [38]. Перед нагнетанием цемента, как правило, в скважины добавляются малое количество ПАВ. Это позволяет избежать избыточных потерь химических растворов через открытые каналы.

В первую очередь предусматривается заполнение сообщающихся опережающих скважин. При этом тампонаж следует осуществлять изнутри наружу, т.е. снизу вверх, в очередности от большего водопритока к меньшему. В первую очередь следует тампонировать скважины, из которых наблюдается выход воды. Перерыв нагнетания раствора в шпур продолжительностью более половины времени его схватывания недопустим, поскольку при этом не образу-

ется однородной структуры. При тампонировании применяемое давление нагнетания может приводить к гидравлическому разрыву породного массива (гидроудару), что обуславливает необходимость тщательного контроля данного процесса, а также применяемого при этом материала и оборудования [39].

После затвердевания тампонажного материала продолжается бурение опережающих скважин следующего горизонта, которые также исследуются на наличие притоков и в дальнейшем тампонируются. Глубина следующего опережающего горизонта определяется так, чтобы он находился в пределах последнего участка пробуренных разведочных скважин.

После тампонирования пробуренных скважин и затвердевания тампонажного раствора возможна дальнейшая проходка ствола с применением БВР.

Заключение

Следует заметить, что любой вид проектирования тампонажных работ является лишь начальным этапом и подлежит постоянному пересмотру и проверке эффективности, так как распределение трещин, а также наличие каналов перетоков остаются, вплоть до производства буровых работ, неизвестными. Фактический режим тампонажных работ следует корректировать по ходу работ в зависимости от результатов наблюдений. Поскольку принимать все необходимые меры для обеспечения и поддержания надежных условий проходки ствола на основе поступающих данных представляется довольно сложной задачей и к тому же приводит к значительному увеличению затрат времени на тампонажные работы, в дальнейшем следует уделять большее внимание вопросам прогнозирования и моделирования процесса трещинообразования и герметизации зоны температурных разрывов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cocker M. D., Orris G. D.* World potash developments / Proceedings of the 48th Annual Forum on the Geology of Industrial Minerals. Phoenix, 2012, pp. 1–16.
2. *Зубов В. П., Смычник А. Д.* Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод // Записки Горного Института. — 2015. — Т. 215. — С. 29–37.
3. *Лаптев Б. В.* Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магнезиальных солей // Безопасность труда в промышленности. — 2009. — № 8. — С. 28–31.
4. *Whyatt J. K., Varley F. D.* Catastrophic failures of underground evaporite // Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, 2008, pp. 113–122.
5. *Томас А., Ральф Ш.* Буровые работы для проходимых способом замораживания стволов в России — Усть-Яйвинский рудник // Mining Report 149. 2013, no. 2, Отдельный выпуск, pp. 80–87. DOI: 10.1002/mire.201300010.
6. *Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F.* Modeling heat and mass transfer during ground freezing subjected to high seepage velocities // Computers and Geotechnics. 2016, vol. 73, pp. 1–15.
7. *Marwan A., Meng-Meng Zhou, Zaki M., Meschke G.* Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow // Computers and Geotechnics. 2016, no. 75, pp. 112–125.
8. *Alzoubi M., Ghoreishi-Madiseh S., Hassani F., Sasmito A. P.* Heat transfer analysis in artificial ground freezing under high seepage: Validation and heatlines visualization // International Journal of Thermal Sciences. 2019, no. 139, pp. 1–45.
9. *Alzoubi M., Zueter A., Nie-Rouquette A., Sasmito A. P.* Freezing on demand. A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, no. 29, pp. 1–25.
10. *Pingsheng Wang, Guoqing Zhou* Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process // International Journal of Mining Science and Technology. 2018, vol. 28, no. 2, pp. 287–296.
11. *Паланков И. М.* Анализ причин возникновения аварийных ситуаций при проходке вертикальных стволов способом искусственного замораживания грунтов // Безопасность труда в промышленности. — 2014. — № 2. — С. 49–53.
12. *Головатый И. И., Левин Л. Ю., Паршаков О. С., Диулин Д. А.* Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов // Горный журнал. — 2018. — № 8. — С. 48–53.
13. *Паньков И. Л.* Изучение влияния температурного фактора на прочностные и деформационные показатели пород надсолевой толщи при объемном нагружении // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. — С. 105–107.
14. *Красноштейн А. Е., Барях А. А., Санфиоров И. А.* Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2013. — № 2. — С. 40–49.
15. *Васильчук М. П., Иофис М. А.* Анализ геомеханических процессов и причин аварий на Верхнекамском месторождении калийно-магнезиальных солей // Маркшейдерский вестник. — 2007. — № 1(59). — С. 30–32.
16. *Домрачев А. Н., Говорухин Ю. М., Криволапов В. Г., Палеев Д. Ю.* Анализ и прогноз динамики аварий и инцидентов на предприятиях горной промышленности и подземного строительства Российской Федерации // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2019. — № 5. — С. 448–450.
17. *Куликова А. А., Овчинникова Т. И.* К вопросу снижения геоэкологических рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 251–262. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262.

18. Рудковский Р. Р., Трофимов В. Л., Хазиев Ф. Ф. Блуждающие рассолы соляных толщ и мероприятия по защите горных выработок от их затопления // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 1. — С. 66–73.

19. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 5–25. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.

20. Пономаренко Т. В. Экологические, экономические и социальные последствия аварийных ситуаций на калийных рудниках // Management Systems in Production Engineering. — 2012. — № 2(6). — С. 28–31.

21. Батурин Е. Н., Меньшикова Е. А., Блинов С. М., Наумов Д. Ю., Белкин П. А. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — С. 613.

22. Паланкоев И. М. Оценка степени риска возникновения аварийных ситуаций при строительстве вертикальных шахтных стволов способом искусственного замораживания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 6. — С. 44–51.

23. Левин Л. Ю., Колесов Е. В., Семин М. А. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения замораживающих колонок при проходке шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 11. — С. 257–265.

24. Ударцев А. А. Параметры ползучести пород надсолевой толщи новоликамского участка ВКМКС в условиях отрицательных температур // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2016. — С. 126–128.

25. Ван Хайден Т., Бьерн В. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов // Горный журнал. — 2014. — № 9. — С. 65–67.

26. Тарасов В. В., Кошев Г. Я., Загвоздкин И. В. Решение проблем безопасности при строительстве вертикальных стволов на калийных месторождениях // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 8. — С. 64–67.

27. Greinacher J., Oellers T., Ahlbrecht T. The importance of mines for ultimate storage at Deilmann-Haniel Shaft Sinking. Der Stellenwert des Endlagerbergbaus bei der Deilmann-Haniel Shaft Sinking. Germany, 2011.

28. Прохоров А. Е., Плехов О. А. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2019. — № 1. — С. 131–139.

29. Витязь П. А., Головатый И. И., Прушак В. Я., Диулин Д. А. Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов петриковского ГОКа // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. — 2019. — Т. 64. — № 3. — С. 366–377.

30. 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.

31. Карасев М. А. Влияние температуры на напряженно-деформированное состояние системы «крепь-массив» // Записки Горного института. — 2004. — Т. 159. — С. 80–82.

32. Сулейманов Р. Н., Чекалкин А. А. Математическое моделирование температурных полей ледопородных массивов с учетом фазовых переходов в процессе проходки шахтных стволов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2020. — № 2. — С. 6–16.

33. Попов М. Г., Синегубов В. Ю. Использование экспериментально-численного метода прогноза смещений вокруг выработки в рудном массиве // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2011. — № 6. — С. 70–73.

34. Федосеев С. М., Ларионов В. Р. О возможности применения молекулярных соединений для изоляции горных выработок криолитозоны от притока пластовых вод // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2013. — № 69. — С. 24–27.

35. Demenkov P. A., Karasev M. A., Petrov D. N. Predicting land-surface deformations during the construction of underground facilities of complex spatial configuration // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017, vol. 8, no. 11, pp. 1161–1171.

36. Плешко М. С., Армейсков В. Н., Петренко Л. А., Сулименко Р. И. О проблеме применения технологии струйной цементации при строительстве глубоких подземных сооружений // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1 (40). — С. 47.

37. Трушко В. Л., Шоков А. Н. Влияние качества тампонажа закрепного пространства на напряженно-деформированное состояние пород призабойной зоны в протерозойских глинах // Записки Горного института. — 2012. — Т. 196. — С. 101–104.

38. Асанов В. А. Параметрическое обеспечение проектирования проходки стволов на новых участках ВКМКС // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. — С. 102–104.

39. Шиповский К. А., Цивинский Д. Н. Оптимизация процесса бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин на основе мониторинга технико-технологических и геолого-геофизических параметров // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2012. — № 11. — С. 9–15. **ТАБЭ**

REFERENCES

1. Cocker M. D. Orris G. D. World potash developments. *Proceedings of the 48th Annual Forum on the Geology of Industrial Minerals*. Phoenix, 2012, pp. 1–16.

2. Zubov V. P., Smychnik A. D. Flooding risk reduction in potash mines in case of groundwater inrush in underground openings. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 215, pp. 29–37. [In Russ].

3. Laptev B. V. Accidents at the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit. *Occupational Safety in Industry*. 2009, no. 8, pp. 28–31. [In Russ].

4. Whyatt J. K., Varley F. D. Catastrophic failures of underground evaporite. *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, 2008, pp. 113–122.

5. Tomas A., Ralf S. Drilling operations for shafts sinkable with artificial ground freezing in Russia – Ust Yaiva Mine. *Mining Report 149*. 2013, No 2, Special edition, pp. 80–87. [In Russ]. DOI: 10.1002/mire.201300010.

6. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Modeling heat and mass transfer during ground freezing subjected to high seepage velocities. *Computers and Geotechnics*. 2016, vol. 73, pp. 1–15.

7. Marwan A., Meng-Meng Zhou, Zaki M., Meschke G. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow. *Computers and Geotechnics*. 2016, no. 75, pp. 112–125.

8. Alzoubi M., Ghoreishi-Madiseh S., Hassani F., Sasmito A. P. Heat transfer analysis in artificial ground freezing under high seepage: Validation and heatlines visualization. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019, no. 139, pp. 1–45.

9. Alzoubi M., Zueter A., Nie-Rouquette A., Sasmito A. P. Freezing on demand. A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, no. 29, pp. 1–25.

10. Pingsheng Wang, Guoqing Zhou Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 2, pp. 287–296.

11. Palankov I. M. Causes of accidents in vertical shaft sinking with artificial ground freezing *Occupational Safety in Industry*. 2014, no. 2, pp. 49–53. [In Russ].

12. Golovatyy I. I., Levin L. U., Parshakov O. S., Diulin D. A. Optimization of frozen wall formation in mine shaft construction. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 8, pp. 48–53. [In Russ].

13. Pan'kov I. L. Temperature effects on strength and deformation characteristics of above-salt rock mass under three-dimensional loading. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov: sbornik nauchnykh trudov* [Strategy and Processes of Georesources Development: Collection of Scientific Papers], Perm, GI UrO RAN, 2014, pp. 105–107.

14. Krasnoshteyn A. E., Baryah A. A., Sanfirov I. A. Geotechnical accidents: Flooding of Bezniki Potash Mine 1. *Perm Federal Research Centre Journal*. 2013, no. 2, pp. 40–49. [In Russ].

15. Vasil'chuk M. P., Iofis M. A. Geomechanical processes and causes of accidents at the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit. *Mine Surveying Bulletin*. 2007, no. 1(59), pp. 30–32. [In Russ].

16. Domrachev A. N., Govoruhin U. M., Krivolapov V. G., Paleev D. U. Analysis and prediction of history of accidents and incidents in mining and underground construction in the Russian Federation. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2019, no. 5, pp. 448–450. [In Russ].

17. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. On the issue of reducing geocological risks at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 251–262. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262.

18. Rudkovskiy R. R., Trofimov V. L., Haziev F. F. Migrating brines and protection of underground openings from flooding in saline deposits. *Prospect and protection of mineral resources*. 2011, no. 1, pp. 66–73. [In Russ].

19. Baryah A. A., Evseev A. V. Closure of potash and salt mines: Review and analysis of the problem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 9, pp. 5–29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.

20. Ponomarenko T. V. Ecological, economic and social consequences of emergencies on potash mine. *Management Systems in production engineering*. 2012, no. 2(6), pp. 28–31.

21. Baturin E. N., Men'shikova E. A., Blinov S. M., Naumov D. Yu., Belkin P. A. Challenges of mining at the largest potash deposits in the world. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012, no. 6, pp. 613. [In Russ].

22. Palankoev I. M. Degree estimation of an accident situation risk in vertical shafts during them sinking by ground freezing method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 6, pp. 44–51. [In Russ].

23. Levin L. Yu., Kolesov E. V., Semin M. A. Dynamics of ice wall under conditions of damaged freezing pipes when shaft sinking. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 11, pp. 257–265. [In Russ].

24. Udartsev A. A. Over-saline complex creep under negative temperatures in Novosolikamsk Site of the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov: sbornik nauchnykh trudov* [Strategy and Processes of Georesources Development: Collection of Scientific Papers], Perm, GI UrO RAN, 2016, pp. 126–128.

25. Van Hajden T., Bern V. Advanced ground freezing technology as a case-study of two facilities composed of five vertical mine shafts under construction. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 9, pp. 65–67. [In Russ].

26. Tarasov V. V., Koshev G. Ya., Zagvozdkin I. V. Safety of vertical shaft construction at potash deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2015, no. 8, pp. 64–67. [In Russ].

27. Greinacher J., Oellers T., Ahlbrecht T. *The importance of mines for ultimate storage at Deilmann-Haniel Shaft Sinking*. Der Stellenwert des Endlagerbergbaus bei der Deilmann-Haniel Shaft Sinking. Germany, 2011.

28. Prohorov A. E., Plekhov O. A. Monitoring of nonstationary temperature and deformation in water-saturated soil under conditions of phase transition based on fiber-optic sensors. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2019, no. 1, pp. 131–139.

29. Vityaz' P. A., Golovatyy I. I., Prushak V. Ya., Diulin D. A. Frozen wall construction technology in mine shaft sinking as a case-study of Petrikovsky GOK. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk*. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 366 – 377. [In Russ].
30. Iudin M. M. Shaft stability and safety in thawing of frozen wall. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*. 2009, vol. 6, no. 1. 46 – 50. [In Russ].
31. Karasev M. A. Temperature effect on the stress–strain behavior of the support–rock mass system. *Journal of Mining Institute*. 2004, vol. 159, pp. 80 – 82. [In Russ].
32. Suleymanov R. N., Chekalkin A. A. Mathematical modeling of temperature fields in frozen rock mass with regard to phase transitions during mine shaft sinking. *Perm Federal Research Centre Journal*. 2020, no. 2, pp. 6 – 16. [In Russ].
33. Popov M. G. Sinegubov V. Yu. Experimental numerical method of displacement prediction in ore body around a stope. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2011, no. 6, pp. 70 – 73. [In Russ].
34. Fedoseev S. M., Larionov V. R. Applicability of molecular compounds in isolation of underground openings from brine water inflows in permafrost zone. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2013, no. 69, pp. 24 – 27. [In Russ].
35. Demenkov P. A., Karasev M. A., Petrov D. N. Predicting land-surface deformations during the construction of underground facilities of complex spatial configuration. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017, vol. 8, no. 11, pp. 1161 – 1171.
36. Pleshko M. S., Armeyskov V. N., Petrenko L. A., Sulimenko R. I. Problem of application of jet cement grouting technologies in deep-level underground construction. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2016, no. 1 (40), pp. 47. [In Russ].
37. Trushko V. L., Shokov A. N. Influence of grouting quality in void space outside shaft lining on the stress–strain behavior of bottomhole rocks in Proterozoic clay. *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 196, pp. 101 – 104. [In Russ].
38. Asanov V. A. Parametric provision of shaft sinking design in new sites at the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposit. Strategy and Processes of Georesources Development: Collection of Scientific Papers. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov: sbornik nauchnykh trudov* [Strategy and Processes of Georesources Development: Collection of Scientific Papers], Perm, GI UrO RAN, 2014, pp. 102 – 104.
39. Shipovskiy, K. A., Tsvinskiy D. N. Optimization of inclined and horizontal directional drilling based on monitoring of geological, geophysical and process-dependent parameters. *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*. 2012, no. 11, pp. 9 – 15. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Апарин Алексей Геннадьевич¹ – аспирант,
Санковский Александр Андреевич¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: alekseyap@icloud.com,
¹ Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Апарин А.Г., e-mail: alekseyap@icloud.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Aparin¹, Graduate Student,
A.A. Sankovsky¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: alekseyap@icloud.com,
¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.G. Aparin, e-mail: alekseyap@icloud.com.

Получена редакцией 30.06.2021; получена после рецензии 13.10.2021; принята к печати 10.01.2022.
Received by the editors 30.06.2021; received after the review 13.10.2021; accepted for printing 10.01.2022.