

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 622.363.2.062:622.257.1(045)(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377>

Поступила в редакцию 14.02.2019
Received 14.02.2019

П. А. Витязь^{1,2}, И. И. Головатый³, В. Я. Прушак⁴, Д. А. Диулин⁵

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

³ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Беларусь

⁴Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Беларусь

⁵ОАО «Трест Шахтоспецстрой», Солигорск, Беларусь

ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ПЕТРИКОВСКОГО ГОКА

Аннотация. Изучены научно-технические аспекты технологии использования ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов в водоносных горных породах на примере объектов строящегося Петриковского ГОКа. Описан алгоритм процесса замораживания горного массива. Разработана методика расчета основных параметров ледопородного ограждения, основанная на классических научных представлениях в области геотехнологии, геомеханики и горной теплофизики, содержащая модифицированные формулы толщины и времени образования ледопородной стенки. Высокая эффективность разработанной методики подтверждается результатами успешного использования полученных численных значений параметров ограждения при реализации проекта проходки стволов. Показана возможность выбора способа размораживания мерзлых пород на основе анализа реальной трехмерной модели ледопородного ограждения. Важнейшим критерием такого выбора является равномерность толщины ледопородного ограждения по окружности вертикального ствола. Сделан вывод о достигнутой высокой научной и практической компетенции белорусских шахтостроителей – ученых и специалистов. В стране разработана надежная система научно-технического обеспечения технологии проходки вертикальных шахтных стволов с использованием временных ледопородных ограждений. Созданы эффективные методики проведения предварительных геологических исследований, расчета параметров ледопородных ограждений и замораживающего оборудования, выбора технологии проведения работ. Сформирована необходимая материально-техническая база для быстрого и качественно выполнения всего комплекса работ по сооружению шахтных стволов специальным способом.

Ключевые слова: шахтный вертикальный ствол, ледопородное ограждение, замораживание, гидрогеологическое и геофизическое строение

Для цитирования: Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов Петриковского ГОКа / П. А. Витязь [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 366–377. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377>

P. A. Vityaz^{1,2}, I. I. Golovaty³, V. Ya. Prushak⁴, D. A. Diulin⁵

¹Presidium of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³JSC “Belaruskali”, Soligorsk, Belarus

⁴Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk, Belarus

⁵JSC “Trest Shahtospetsstroy”, Soligorsk, Belarus

TECHNOLOGY OF PERFORMANCE OF ICE WALL WHEN SINKING SHAFTS AT THE EXAMPLE OF THE OBJECTS OF THE PETRIKOV MINING

Abstract. Scientific-technical aspects of technology of use of the ice wall when shaft sinking in water-bearing rocks, using an example of objects under construction of the Petrikov mining and processing plant, are studied. The algorithm of process of freezing of the mountain massif is described. The method is developed of calculation of the main parameters of the

ice barrier, based on classical scientific concepts in the field of geotechnology, geomechanics and mountain thermal physics, containing modified formulas of thickness and time of the ice wall formation. The high efficiency of the developed technique is confirmed by the results of the successful use of the obtained numerical values of the parameters of the fence in the implementation of the project of sinking shafts. It is shown the possibility of choosing a method of defrosting frozen rocks, based on the analysis of a real three-dimensional model of the ice barrier. The most important criterion for this choice is the uniformity of the thickness of the ice barrier along the circumference of the vertical cylinder. The conclusion is made about the high scientific and practical competence of Belarusian mine builders – scientists and specialists. The country has developed a reliable system of scientific and technical support for the technology of sinking vertical mine shafts using temporary ice fences. Effective methods of preliminary geological studies, calculation of parameters of ice-rock fences and freezing equipment, selection of technology of work have been created. The necessary material and technical base for fast and high-quality performance of all complex of works on a construction of mine trunks in the special way is created.

Keywords: mine vertical shaft, ice wall, freeze, hydrogeological and geophysical structure

For citation: Vityaz P. A., Golovaty I. I., Prushak V. Ya., Diulin D. A. Technology of performance of ice wall when sinking shafts at the example of the objects of the Petrikov mining. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 366–377 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-366-377>

Введение. С 2014 г. ОАО «Беларуськалий» реализует инвестиционный проект по промышленной разработке Петриковского месторождения калийных солей с вводом в эксплуатацию нового горно-обогатительного комплекса (ГОК) мощностью не менее 1,5 млн т хлорида калия в год. Проектом оговорено возведение двух вертикальных шахтных стволов – скипового глубиной 808,4 м и клетьевого глубиной 725,95 м – специальным способом, предусматривающим создание вокруг будущей выработки шахтного ствола временного защитного ограждения из замороженной породы, предохраняющего выработку при ее строительстве от разрушения в неустойчивых породах и поступления грунтовых вод из водоносных горизонтов. Работы по созданию указанного ледопородного ограждения (ЛПО) и проходке стволов были начаты в 2016 г. В настоящее время проходческие работы закончены на обоих стволах на глубинах значительно ниже водоносных горизонтов, а ЛПО находятся в стадии ликвидации. За период создания и использования такого типа ограждения получен большой объем информации, представляющей научный и практический интерес. Несмотря на то, что технология создания ЛПО в общих чертах достаточно проработана [1, 2], многие научно-практические аспекты ее использования требуют дальнейшего изучения и совершенствования с точки зрения учета сложных горно- и гидрогеологических факторов на участке проходки, повышения надежности и технологичности процессов замораживания и размораживания породного массива, снижения энергоемкости процесса. В связи с этим анализ информации, полученной в процессе мониторинга ЛПО при проходке стволов, представляется важным и актуальным.

Результаты и их обсуждение. Проходка спроектированных скипового и клетьевого стволов осуществляется, как уже упоминалось, специальным способом, предусматривающим создание искусственного защитного ЛПО на участке залегания водоносных горизонтов. Указанный способ искусственного замораживания горных пород состоит в том, что в водоносных породах вокруг места расположения будущего шахтного ствола образуют временное цилиндрическое ограждение, защищающее ствол от проникновения в него воды или пльвуна во время проходки [1, 2].

Работы по замораживанию горных пород состоят из следующих основных процессов: предварительное геологическое и гидрогеологические исследования участка замораживания; составление проекта работ по замораживанию горных пород; бурение замораживающих скважин; монтаж замораживающей станции и рассольной сети; образование ЛПО, то есть собственно замораживание, и контроль за процессом замораживания; поддержание ЛПО в замороженном состоянии в течение всего времени производства горнопроходческих работ и возведения постоянной крепи; оттаивание (искусственное или естественное) замороженных горных пород по окончании проходки ствола шахты; ликвидация замораживающих скважин; демонтаж холодильной установки и рассольной сети.

Геологическое и гидрогеологические исследования участка замораживания выполнялись в течение многих лет. На основании анализа результатов бурения гидрогеологических и контрольно-стволовых скважин, а также других ранее выполненных исследований особенностей гидрогеологического и геофизического строения Петриковского месторождения калийных солей была выполнена оценка гидрогеологических условий на участке заложения шахтных стволов Петриковского ГОКа.

В результате исследования установлено, что месторождение калийных солей, расположенное в центральной части Припятского артезианского бассейна, является сложной гидрогеологической системой, состоящей из ряда напорных водоносных горизонтов и комплексов, разделенных водоупорными породами. В гидрогеологическом разрезе участка проходки стволов выделяются три гидродинамические и гидрохимические зоны.

В состав верхней зоны активного водообмена входят водоносные горизонты и комплексы, которые относятся к обводненным отложениям четвертичных, неогеновых, палеогеновых, меловых, юрских, триасовых образований. Эти водоносные горизонты и комплексы гидравлически связаны между собой. К ним относятся пресные гидрокарбонатные, магниевые-кальциевые воды.

Водоносные горизонты в обводненных прослоях нижнекарбонатных отложений и надсолевого девона относятся к зоне замедленного водообмена. К ним приурочены хлоридные натриевые воды с высоким содержанием сульфатов и минерализацией от нескольких граммов до более 100 г/дм³.

Водоносные горизонты и комплексы, залегающие под соленосной толщей, относятся к зоне замедленного водообмена. К ней приурочены хлоридные кальциевые-натриевые и натриевые воды с минерализацией более 300 г/дм³.

С точки зрения оценки необходимости создания ЛПО и определения его параметров, обеспечивающих безопасную проходку стволов, были подробно рассмотрены гидрогеологические условия горизонтов и комплексов, залегающих выше соленосной толщи, так как ниже этой толщи находятся водоупорные слои породы, безопасные с точки зрения водопритоков.

Установлено, что на рассматриваемом участке породного массива можно выделить следующие водоносные горизонты и комплексы и разделяющие их относительно водоупорные породы:

- водоносный комплекс неоген-четвертичных отложений;
- водоносный киевский и харьковский терригенный комплекс;
- слабоводоносный туронский карбонатный комплекс;
- водоносный сеноманский терригенный горизонт;
- водоносный юрский терригенно-карбонатный комплекс;
- водоносный нижнетриасовый карбонатно-терригенный горизонт;
- водоупорный локально слабоводоносный комплекс нижнего карбона;
- водоупорный локально водоносный полесский карбонатно-терригенный комплекс;
- водоупорный локально слабоводоносный стрешинский терригенно-карбонатный комплекс;
- водоупорный галогенно-карбонатно-терригенный комплекс верхнего девона.

Таким образом, при прохождении шахтных стволов до калийных горизонтов опасность водопритока представляли водоносные горизонты и комплексы, расположенные выше водоупорного локально слабоводоносного комплекса нижнего карбона, верхняя отметка залегания которого находится на глубине 255 м, а нижняя – на глубине 265 м. При этом ниже подошвы указанного водоупорного комплекса располагаются другие водоупорные комплексы, простирающиеся до соленосной толщи. Соответственно расчет ожидаемых при проходке шахтных стволов водопритоков целесообразно было выполнять для обводненных горизонтов, расположенных выше отметки 255 м, то есть выше массива водоупорных комплексов. Однако фактически расчет был выполнен с некоторым запасом, до глубины 290 м. При этом максимальные ожидаемые водопритоки определялись по каждому водоносному горизонту отдельно по модернизированной формуле Зихардта [3]

$$Q = 2,73 \frac{k_m \cdot S}{\lg R - \lg r},$$

где Q – водоприток в шахтный ствол, м³/сут; k_m – водопроводимость водоносного горизонта, м²/сут; S – понижение уровня до подошвы водоносного горизонта, м; r – радиус шахтного ствола, м; R – радиус влияния шахтного ствола, м, определяемый по формуле Кусакина

$$R = 2S\sqrt{kH},$$

в которой k – коэффициент фильтрации, м/сут; H – величина пьезометрического напора, м; S – понижение уровня до подошвы водоносного горизонта, м.

Согласно выполненным расчетам, при проходке скипового и клетьевого шахтных стволов суммарная величина ожидаемого водопритока в каждый из стволов составила около $112\,290\text{ м}^3/\text{сут}$ из водоносных горизонтов, расположенных на глубинах до 255 м. Ниже указанной глубины водоприток практически исключался (не более $5\text{ м}^3/\text{сут}$ из нижележащих горизонтов мощностью 80 м). Именно сложные гидрогеологические условия участка заложения стволов до глубины 255 м и предопределили необходимость применения специального способа проходки в пределах водоносных пород под защитой искусственно созданного ледопородного ограждения.

Искусственное замораживание горных пород предполагалось осуществлять в три этапа. Первый этап – активное замораживание, обеспечивающее образование ЛПО проектного размера. Второй этап – пассивное замораживание, гарантирующее поддержание созданного криогидратного ограждения в замороженном состоянии с сохранением необходимых параметров ЛПО в течение всего времени проходки ствола через замороженные породы с возведением постоянной крепи в виде тубингового крепления и цементационной завесы. Третий этап – оттаивание замороженных горных пород.

ЛПО вокруг шахтного ствола должно было выполнять функции временной крепи и водонепроницаемой завесы. Размеры данного ограждения, его толщина определялись расчетами, в которых учитывались физико-механические и теплофизические свойства пород, а также средняя температура ЛПО. В формулы расчетов входили коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, теплосодержания горных пород, термическое сопротивление, коэффициент холодопередающей способности замораживающих колонок, сопротивление условно-мгновенному и длительному сжатию замораживающих пород и др. Причем с изменением температуры, влажности, трещиноватости и пористости горных пород указанные характеристики изменяются в различных пределах. В качестве исходных данных при расчете теплосодержания и продолжительности замораживания были приняты результаты испытаний образцов керна горных пород Петриковского месторождения.

В расчетах прочности ЛПО исходили из предположения, что оно должно выдерживать внешнюю нагрузку со стороны неустойчивых горных пород и гидростатическое давление. Наибольшую нагрузку ограждение испытывает в тот период, когда грунт в его пределах вынут, а обнаженный замороженный массив не закрыт постоянной крепью.

Чрезвычайно важное значение имеет глубина замораживающих скважин. Чтобы полностью изолировать от воды горную выработку, скважины должны быть заглублены в пласт водоупорной горной породы. Несоблюдение этого условия часто приводило к авариям или осложнениям в работе, так как в тех местах, где скважины не доводили до водоупорного пласта, в выработку прорывались пльвун или вода. Кроме того, так как верхняя часть водоупорных горных пород часто бывает изрезана трещинами, сообщающимися с вышележащими водоносными породами, то и при недостаточном заглублении замораживающих скважин трещины могут проводить воду в ствол шахты, что приводит к серьезным затруднениям при выемке пород ниже замороженной зоны. Первоначально проектом предусматривалось устройство ЛПО до глубины 275 м. Затем, в процессе выполнения работ, на основании уточненных геологических данных глубина ЛПО была скорректирована до 267 м, что обеспечивало достаточное заглубление ЛПО – более чем на 10 м в плотные водоупорные породы.

Известно, что прочность замороженного грунта зависит от температуры, до которой он охлажден, и от петрографического состава грунта [4–6]. Поэтому ЛПО будет иметь неодинаковую прочность в разных местах. При этом распределение температур в ЛПО очень неравномерное. В зависимости от рассматриваемого направления температуры в ограждении изменяются по различным законам. Наиболее низкие температуры, равные температуре наружной стенки трубы, создаются возле замораживающей колонки и повышаются по мере удаления от нее до криогидратной точки. В целом можно считать, что в радиальном направлении изменение температуры ЛПО происходит по логарифмической зависимости с повышением в направлении от замораживающей колонки. Согласно расчетам, уже на расстоянии 0,5 м от замораживающей колонки такое повышение составляет около 11 °C при температуре охлаждающего рассола -20 °C . Значение коэффициента теплопередачи замораживающих труб величина переменная. После того как радиус криогидратного цилиндра вокруг колонки достигает 1 м, холодопередающая способность становится почти в 2 раза меньше первоначальной.

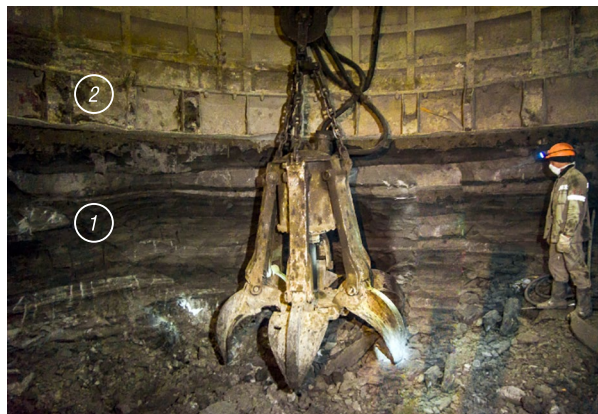


Рис. 1. Проходка скипового ствола на глубине 250 м: 1 – незащищенная крепью замороженная порода, 2 – тубинговая крепь

Fig. 1. Sinking of the skip shaft at a depth of 250 m: 1 – unprotected frozen rock, 2 – tubing

При предварительных расчетах процесса замораживания средняя температура замороженных пород на основании установленной эмпирической зависимости была принята равной 40 % температуры внешней стенки колонки, что составило $-7,5$ °С.

В связи с тем что нагрузка на ЛПО и его несущая способность для каждого породного слоя свои, необходимая толщина ограждения определялась для каждой литологической разности отдельно.

В исходных расчетах была принята совмещенная схема проходки стволов с возведением бетонной или тубинговой крепи вслед за забоем с отставанием крепи не более 5 м (рис. 1). Исходные данные для расчета внешних нагрузок и толщины ЛПО приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Исходные данные для расчета внешних нагрузок и толщины ЛПО

Table 1. Initial data for calculation of external loadings and thickness

Параметр	Литологический слой						
	глина	алевроит	песок	мел	песчаник	песок глинистый	глина аргиллитовая
Глубина от поверхности, м	23	58	85	136	146	255	267
Угол внутреннего трения пород, град	11	18	30	34	42	31	24
Сцепление пород, кПа	64	67	12	82	6	58	71
Прочность на сжатие замороженных пород через 24 ч, кПа	1400	2300	4800	6502	7607	8106	8602
Коэффициент деформации замороженных пород, кПа	2200	3900	5409	6905	7607	8106	9803
Коэффициент упрочнения замороженных пород	0,37	0,33	0,29	0,18	0,27	0,25	0,14
Допустимое смещение ЛПО по внутреннему контуру, м	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Высота участка ЛПО не подкрепленного крепью, м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Внутренний радиус ЛПО, м	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25

Полная горизонтальная нагрузка на ЛПО в обводненных грунтах определялась для каждой литологической разности как сумма давлений воды и горных пород:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{гидр}} + P_{\text{гор}},$$

где $P_{\text{гидр}}$ – гидростатическое давление на расчетной глубине, кПа; $P_{\text{гор}}$ – горное давление пород на расчетной глубине, кПа, которое определяется по формуле

$$P_{\text{гор}} = (\sum \gamma_i H_i - P_{\text{гидр}}) \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) - 2C \cdot \text{tg}(45^\circ - \varphi/2),$$

в которой $\sum \gamma_i H_i$ – средневзвешенный удельный вес горных пород кН/м^3 ; φ – угол внутреннего трения пород, град; C – сцепление пород, кПа.

Расчет толщины ЛПО велся по предельным состояниям из условий его прочности и деформации с использованием модифицированных формул Домке и Вялова [4]. По условию прочности толщина ограждения E_1 определялась по модифицированной формуле Домке, в которой ЛПО рассматривается как упругопластический толстостенный цилиндр правильной формы и бесконечно большой длины, сжатый равномерно распределенной внешней нагрузкой и вертикальным давлением от веса цилиндра. В соответствии с указанным подходом замороженные породы на внешней поверхности цилиндра не должны переходить в пластическое состояние, наступающее в случае, когда разность наибольшего и наименьшего главных нормальных напряжений становится равной пределу прочности замороженных пород на сжатие. Для получения запаса проч-

ности в формулу введен предел длительной прочности $\sigma_{сж24}$ при действии нагрузки в течение 24 ч. Известно, что замороженные грунты обладают свойством ползучести – способностью снижать свою прочность под действием длительно действующей нагрузки. Именно по этой причине в указанные формулы определения толщины ЛПО Домке и Вялова [4] были введены показатели длительной прочности, которые определялись экспериментальным путем для каждого литологического слоя отдельно. При этом исходили из особенностей технологии проходки, согласно которой время, в течение которого обнаженная стена ЛПО должна воспринимать на себя горное давление, составляет не более 24 ч, необходимых для проходки участка ствола и возведения одного кольца тубингов. Таким образом, модифицированная формула Домке имеет следующий вид:

$$E_1 = R_{вн} \left[0,29 P_{полн} / \sigma_{сж24} + 2,3 \cdot (P_{полн} / \sigma_{сж24})^2 \right],$$

где $R_{вн}$ – внутренний радиус ЛПО, равный радиусу ствола в проходке, м; $\sigma_{сж24}$ – прочность на сжатие замороженных пород через 24 ч, кПа.

Толщина ледопородного ограждения по условию деформации E_2 внутреннего контура в течение суток определялась по модифицированной формуле Вялова

$$E_2 = R_{вн} \left[\left(1 + 0,75 \frac{(1-m) P_{лпн} h^{(1+m)}}{A_{24} \cdot \Delta^m \cdot R_{вн}} \right)^{(1/(1-m))} - 1 \right],$$

где m – коэффициент упрочнения замороженных пород; h – высота участка ЛПО, не подкрепленного крепью, м; A_{24} – коэффициент деформации замороженных пород через 24 ч, кПа; Δ – допускаемое по технологическим соображениям радиальное смещение внутренней стенки ЛПО, м.

По результатам расчетов наиболее нагруженных участков (в песчаниках на глубине 85 м и 146 м) толщина ЛПО в замковой плоскости (рис. 2) была принята равной 2,5 м.

Правильность выполненных расчетов ширины ЛПО была подтверждена в дальнейшем в процессе проходки скипового и клетьевого стволов через замороженные водоносные горизонты. В течение всего времени проходки была полностью обеспечена необходимая прочность и водонепроницаемость ЛПО.

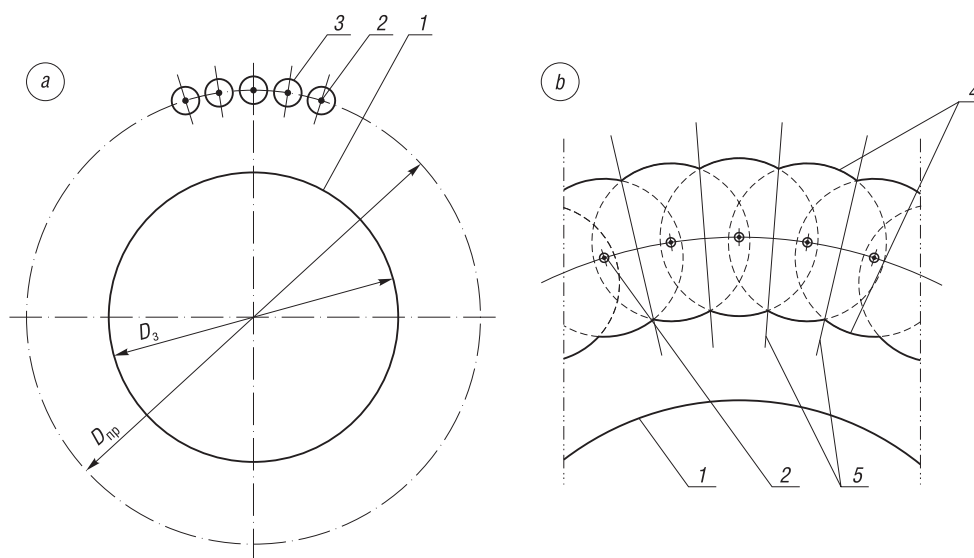


Рис. 2. Схема формирования ЛПО: *a* – начальный этап (формирование изолированных ледопородных цилиндров), *b* – конечный этап (смыкание ледопородных цилиндров с образованием ЛПО проектных размеров); 1 – проектный контур ствола, 2 – замораживающая колонка, 3 – криогидратная поверхность ледопородного цилиндра, 4 – криогидратная поверхность ЛПО, 5 – замковые плоскости ЛПО

Fig. 2. The scheme of formation of the ice wall: *a* – initial stage (the formation of isolated ice cylinders), *b* – final stage (the connection of the ice cylinders with the formation of ice wall design dimensions); 1 – design the contour of the mine shaft, 2 – freezing column, 3 – cryohydrate surface of the ice cylinder, 4 – cryohydrate surface of ice wall, 5 – locking plane of the ice wall

Диаметр окружности расположения замораживающих колонок D_3 определялся по формуле

$$D_3 = D_{\text{пр}} + 1,2L + 2a,$$

где $D_{\text{пр}}$ – диаметр ствола в проходке, м; L – расчетная толщина ледопородного ограждения, равная 2,5 м; a – допустимое отклонение замораживающих колонок от вертикали, м.

С учетом результатов расчетов, а также особенностей конструкции галереи распределительных рассолопроводов диаметр окружности расположения замораживающих колонок для каждого ствола был принят равным 16,5 м. При этом проектом предусматривалось устройство 41 замораживающей колонки при расстоянии между двумя соседними колонками 1,26 м. Кроме того, на каждом стволе планировалось устройство дополнительно двух контрольно-термических скважин, одной скважины ультразвукового контроля и двух скважин гидронаблюдения.

В качестве исходных данных при расчете теплосодержания и продолжительности замораживания были использованы результаты испытаний образцов керна горных пород Петриковского месторождения, проведенных в лаборатории Института природопользования НАН Беларуси, а также опыт ранее выполненных работ при строительстве соляных рудников ОАО «Беларуськалий» и научная база ОАО «Белгорхимпром». Исходные данные для расчета теплосодержания и продолжительности замораживания горных пород представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Исходные данные для расчета продолжительности замораживания горных пород

Table 2. Baseline data for the calculation of the duration of rock freezing

Параметр	Литологический слой						
	глина	алеваит	песок	мел	песчаник	песок глинистый	глина аргиллитовая
Глубина от поверхности, м	23	58	85	136	146	255	267
Расстояние между центрами замораживающих колонок на поверхности, м	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
Допустимое отклонение колонок от вертикали на расчетной глубине, м	0,5	0,5	0,5	0,77	0,79	1,0	1,05
Расчетная толщина ЛПО, м	1,6	1,9	2,5	1,85	2,5	2,0	1,5
Температура замерзания воды в породе, °С	-2,12	-0,35	-0,12	-0,09	-0,7	-0,81	-1,9
Температура внешней поверхности стенки замораживающей колонки, °С	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8	-17,8
Коэффициент теплопроводности пород, Вт/м · К	1,29	1,38	2,75	1,54	2,28	2,02	1,70
Наружный диаметр замораживающих колонок, м	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
Коэффициент, учитывающий теплопоток от охлаждающих пород	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Общее количество холода, необходимое для замораживания расчетного объема породы и грунтовой воды, кДж/м ³ · 10 ³	116	120	178	94,5	104	107	91,5
Максимальное отклонение между колонками, м	1,63	1,63	1,63	2,17	2,21	2,63	2,73
Радиус промерзания пород вокруг колонки, м	1,14	1,25	1,49	1,43	1,67	1,65	1,56

Прогнозируемое время активного замораживания ограждения T , сут, определялось при помощи модифицированной формулы Н. Г. Трупака [6], которая представляет собой упрощенную модель решения цилиндрической задачи Стефана:

$$T = \frac{(1 + \psi)P}{8 \cdot 24(T_3 - T_{\text{ст}})\lambda} \left[L_{\text{max}}^2 \ln \frac{L_{\text{max}}}{D_0} + \frac{1}{\pi} \ln \frac{2R}{D_0} \left(8R^2 \arcsin \frac{L_{\text{max}}}{2R} - \pi L_{\text{max}}^2 + 4L_{\text{max}} \sqrt{R^2 - 0,25L_{\text{max}}^2} \right) \right],$$

где ψ – коэффициент, учитывающий теплоприток от охлаждающих пород; P – общее количество холода, необходимое для замораживания расчетного объема породы и грунтовой воды, Дж/м³; T_3 – температура замерзания воды в породе, °С; $T_{\text{ст}}$ – температура внешней поверхности стенки замораживающей колонки, °С; λ – коэффициент теплопроводности пород, Вт/м · К; L_{max} – максимальное отклонение между колонками, м; L_0 – расстояние между центрами замораживающих

колонок, м; a – допустимое отклонение колонок от вертикали на расчетной глубине, м; D_0 – наружный диаметр замораживающих колонок, м; E – расчетная толщина ЛПО, м; R – радиус промерзания пород вокруг колонки, м, определяемый следующим образом:

$$R = \sqrt{\frac{E^2 + I_{\max}^2}{4}}.$$

Согласно выполненным расчетам, время образования ЛПО проектного размера для рассматриваемых литологических разностей должно было составлять от 82 до 91 сут, а для слоя глинистых пород на глубине свыше 255 м – 121 сут. То есть предполагалось, что полное время образования ограждения с нужными параметрами составит до 4 мес. В реальности процесс замораживания пород произошел быстрее. Согласно результатам оперативного инструментального контроля процесса замораживания породного массива с использованием внедренной интеллектуальной системы мониторинга формообразования и состояния ЛПО [7, 8], было установлено, что, уже по истечении 85 сут от начала процесса замораживания его проектные размеры были существенно превышены по всем литологическим слоям. Таким образом, расчет времени активного замораживания с использованием упрощенной модели решения цилиндрической задачи Стефана по модифицированной формуле Н. Г. Трупака дал несколько завышенный результат по сравнению с фактически установленным – 4 мес по расчету и менее 3 мес фактически.

По нашему мнению, выявленное несоответствие численных значений фактического и проектного времени образования ЛПО объясняется следующими причинами. Во-первых, было установлено, что естественная температура пластов ниже расчетной, принятой на основании предварительных геологических исследований. Во-вторых, реальные теплофизические параметры породных слоев также оказались несколько отличными от проектных. В-третьих, проходка скважин под замораживающие колонки была выполнена с высокой точностью, обеспечившей существенно меньшее отклонение колонок от вертикали на больших глубинах по сравнению с предельно допустимыми значениями, заложенными в расчете. В результате замораживание пород и смыкание ледопородных цилиндров с образованием ЛПО проектных размеров произошло быстрее расчетного времени. Таким образом, речь идет о погрешности некоторых исходных геофизических и геотехнических параметров, точное значение которых практически невозможно получить до начала работ по проходке скважин и замораживанию горной породы.

В связи с этим следует отметить, что проходка шахтных стволов с замораживанием пород всегда сопровождается корректировкой исходных геологических и геотехнических параметров. В одном случае могут быть незначительные корректировки, существенно не влияющие на технологию работ, как в нашем случае, что позволило начать работы по проходке стволов несколько раньше проектного срока. В ином случае могут быть корректировки, вносящие очень значительные изменения в технологию и параметры ЛПО. Например, существенная корректировка параметров ЛПО потребовалась при проходке скипового шахтного ствола №1 строящегося Гремячинского ГОКа. На этом объекте при достижении глубины забоя до отметки ниже сформированного ЛПО на основании полученных новых геологических данных было принято решение по увеличению глубины замораживания пород от 520 до 820 м [9].

Возвращаясь к проблеме целесообразности применения метода определения времени активного замораживания ЛПО с использованием модифицированной формулы Н. Г. Трупака, следует признать такое применение его оправданным. Метод не требует сложного математического аппарата и позволяет осуществлять оперативную оценку ожидаемого времени замораживания ЛПО, исходя из возможности реализации наиболее негативного сочетания геофизических и геотехнических факторов для производства горных работ. Вместе с тем в связи с развитием информационных технологий представляется целесообразным в дальнейшем исследовать возможность использования для расчетов времени активного замораживания ЛПО усовершенствованного метода трехмерного моделирования толщины данного ограждения, описанного в работах [10–12]. Указанный метод позволяет, в частности, осуществлять точный учет нестационарной тепловой диффузии в талой и мерзлой зонах, а также учет теплового влияния соседних скважин на формирование ЛПО. Основанием для такой рекомендации служит достаточно успешный опыт применения данного метода в качестве теоретической основы интеллектуальной системы

мониторинга формообразования и состояния ЛПО на участке сооружения шахтных стволов Петриковского ГОКа [7].

В процессе активного замораживания на первом этапе производилось охлаждение породного массива до температуры замерзания воды, а затем осуществлялось намораживание ледопородных цилиндров до их полного смыкания друг с другом (см. рис. 2). Процесс образования ЛПО контролировался за мерами температур в контрольно-термических скважинах с помощью оптоволоконного измерительного кабеля, позволяющего производить замеры температуры ледопородного массива в любой точке по всей глубине скважины. Кроме того, толщину ЛПО контролировали с помощью ультразвукового датчика, перемещаемого в скважине ультразвукового контроля.

Для обеспечения замораживания грунтов на площадку возле стволов устанавливались холодильные машины, собранные в контейнерах, полностью автоматизированные, укомплектованные трубопроводами, арматурой, приборами автоматики, щитами управления и питания (рис. 3).



Рис. 3. Размещение шахтных стволов и замораживающего оборудования на промплощадке Петриковского ГОКа (конец 2016 г.): 1 – замораживающая станция, 2 – проходческий копр скипового ствола, 3 – проходческий копр клетьевого ствола

Fig. 3. The location of the mine shafts and freezing equipment at the site of the Petrikov Mining (by the end of 2016): 1 – freezing station, 2 – sinking headgear of the skip shaft, 3 – sinking headgear of the cage shaft

Предварительная оценка необходимой полезной мощности замораживающей станции $Q_{п}$, Вт, определялась по формуле

$$Q_{п} = \pi d_k H_3 N_3 K_x,$$

где d_k – наружный диаметр замораживающей колонки, м; H_3 – длина замораживающей колонки, м; N_3 – количество замораживающих колонок, шт.; K_x – коэффициент теплопередачи от внешней поверхности замораживающих труб к окружающей среде Вт/м²·°С.

Потребляемая мощность замораживающей станции при активном режиме замораживания рассчитывалась с учетом неизбежных потерь следующим образом:

$$Q_{потр} = Q_{п} k,$$

где k – коэффициент учета потерь холода в рассольной сети, равный 1,2.

После образования ЛПО требуемых размеров в процессе активного замораживания замораживающую станцию перевели в пассивный режим, который предназначен для сохранения достигнутых в процессе активного замораживания проектных параметров ЛПО (толщина, средняя температура, прочность), чтобы не допустить оттаивания или ослабления ограждения за счет теплопритока к его внешней поверхности. Продолжительность работы в пассивном режиме определялась временем, необходимым для проходки ствола на участке замороженных пород и сооружения цементационных завес ниже участка замороженных пород.

Холодопроизводительность станции в период пассивного замораживания в расчетах была принята в размере 50 % производительности станции в период активного замораживания пород.

Все работы, связанные с процессом создания и поддержания ЛПО, контролировались с помощью технологии оптоволоконной телеметрии и ультразвуковой диагностики.

Активное замораживание пород вокруг скипового и клетьевого стволов производилось в 2016 г. Затем процесс замораживания был переведен в пассивный режим. После прохождения участка ствола с тубинговым креплением и выполнения цементационной завесы начался процесс размораживания ЛПО.

При окончательном выборе способа размораживания (естественного или искусственного) исходили из следующего. Известно, что интенсивное оттаивание ЛПО неизбежно ведет к значительным концентрациям температурных напряжений в многослойной конструкции крепи. Поэтому в случае значительной неравномерности толщины данного ограждения по окружности вертикального ствола наиболее безопасным способом оттаивания замороженного массива является естественный способ, использование которого позволяет устранить опасность аварийного разрушения выработки [13]. Однако естественное оттаивание ЛПО занимает много времени, что существенно сдерживает начало производства тампонажа закрепного пространства и качественного погашения замораживающих скважин, тогда как при искусственном способе оттаивания имеется техническая возможность управлять процессом размораживания мерзлых пород и технологические нарушения можно предотвращать. В результате анализа геометрических параметров трехмерной модели ЛПО обеих скважин было установлено, что оба ограждения имели довольно правильную цилиндрическую форму с относительно равномерной толщиной по окружности в горизонтальных сечениях каждой литологической разности. Соответственно наблюдались горнофизические и горнотехнические условия для использования способа комплексного управляемого искусственного оттаивания ЛПО. Сущность этого способа заключалась в прокачке через колонки хладоносителя определенной температуры, которая обеспечивала медленный нагрев замороженной породы, и подачи в ствол подогретого воздуха. Разработанный способ искусственного размораживания был успешно реализован на обоих стволах.

Заключение. Изучены научно-технические аспекты технологии использования ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов в водоносных горных породах на примере объектов строящегося Петриковского ГОКа. Описан алгоритм процесса замораживания горного массива. Представлена методика расчета основных параметров ледопородного ограждения, основанная на классических научных представлениях в области геотехнологии, геомеханики и горной теплофизики, содержащая модифицированные формулы толщины и времени образования ледопородной стенки. Высокая эффективность разработанной методики подтверждается результатами успешного использования полученных численных значений параметров ограждения при реализации проекта проходки стволов. Показана возможность выбора способа размораживания мерзлых пород на основе анализа реальной трехмерной модели ЛПО. Важнейшим критерием такого выбора является равномерность толщины данного ограждения по окружности вертикального ствола.

Анализируя результаты проходки шахтных стволов Петриковского ГОКа через водоносные горизонты, можно сделать вывод о достигнутой высокой научной и практической компетенции белорусских шахтостроителей – ученых и специалистов. На основании классических представлений в области геотехнологии, геомеханики и горной теплофизики разработана надежная система научно-технического обеспечения технологии проходки вертикальных шахтных стволов с использованием временных ЛПО. Созданы эффективные методики проведения предварительных геологических исследований, расчета параметров ЛПО и замораживающего оборудования, выбора технологии проведения работ. В стране сформирована необходимая материально-техническая база для быстрого и качественного выполнения всего комплекса работ по сооружению шахтных стволов специальным способом.

Список использованных источников

1. Михайлов, Ю. В. Строительство горных выработок специальными способами: учеб.-метод. пособие / Ю. В. Михайлов, В. Ф. Носков, В. Я. Прушак. – Минск: Тэхналогія, 2005. – 223 с.
2. Паланкоев, И. М. Обоснование параметров технологии проходки шахтных стволов в искусственно замороженных породах: дис. ... канд. техн. наук / И. М. Паланкоев. – М., 2015. – 192 с.
3. Указания по оценке гидрогеологических условий шахтных полей и прогнозу водопритоков в горные выработки / ВНИИ горн. геомеханики и маркшейдер. дела. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 98 с.
4. Маньковский, Г. И. Специальные способы проходки горных выработок / Г. И. Маньковский. – М.: Углетехиздат, 1958. – 454 с.
5. Дмитриев, А. П. Термодинамические процессы в горных породах: учеб. для вузов / А. П. Дмитриев, С. А. Гончаров. – М.: Недра, 1990. – 360 с.
6. Трупак, Н. Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных шахтных стволов / Н. Г. Трупак. – М.: Недра, 1983. – 270 с.
7. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / И. И. Головатый [и др.] // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 48–53. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.06>
8. Левин, Л. Ю. Контроль теплового режима породного массива на основе применения оптоволоконных технологий мониторинга температур в скважинах / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев, М. А. Семин // Горн. эхо. – 2016. – № 1. – С. 35–37.
9. Хайден, Т. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов / Т. Хайден, Б. Вегнер // Горн. журн. – 2014. – № 9. – С. 65–69.
10. Левин, Л. Ю. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л. Ю. Левин, М. А. Семин, О. С. Паршаков // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 154–161. <https://doi.org/10.15372/ftprpi20170517>
11. Левин, Л. Ю. Исследование динамики ледопородного ограждения в условиях повреждения замораживающих колонок при проходке шахтных стволов / Л. Ю. Левин, Е. В. Колесов, М. А. Семин // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2016. – № 11. – С. 257–265.
12. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов / Л. Ю. Левин [и др.] // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегазовое и гор. дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 255–267. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.6>
13. Иудин, М. М. Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения / М. М. Иудин // Вестн. Якут. гос. ун-та. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 46–51.

References

1. Mihailov Yu. V., Noskov V. F., Prushak V. Ya. *Construction of Mine Workings in Special Ways*. Minsk, Tehnologiya Publ., 2005. 223 p. (in Russian).
2. Palankoev I. M. *Evaluation of Shafting Technology Parameters for Artificially Frozen Rocks*. Moscow, 2015. 192 p. (in Russian).
3. *Guidance on the Assessment of the Hydrogeological Conditions of Mine Fields and the Forecast of Water Inflows into the Mine Workings*. Leningrad, VNIMI, 1987. 98 p. (in Russian).
4. Mankovskii G. I. *Special Methods of Mining Drilling*. Moscow, Ugleizdat Publ., 1958. 454 p. (in Russian).
5. Dmitriev A. P., Goncharov S. A. *Thermodynamic Processes in Rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 360 p. (in Russian).
6. Trupak N. G. *Rock Freezing in Shafting*. Moscow, Nedra Publ., 1983. 270 p. (in Russian).
7. Golovatii I. I., Levin L. Yu., Parshakov O. S., Diulin D. A. Optimization of frozen wall formation in shaft construction. *Gornyi Zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 48–53 (in Russian). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.06>
8. Levin L. Yu., Zaitsev A. V., Semin M. A. Control of the thermal regime of the rock massif based on the application of fiber-optic technologies for monitoring temperatures in wells. *Gornoe ekho* [Mountain Echo], 2016, no. 1, pp. 35–37 (in Russian).
9. Heyden T., Vegner B. Modern shaft freezing technology implemented in two big shaft sinking projects with total five surface mine shafts are being constructed. *Gornyi Zhurnal*, 2014, no. 9, pp. 65–69 (in Russian).
10. Levin L. Y., Semin M. A., Parshakov O. S. Mathematical Prediction of Frozen Wall Thickness in Shaft Sinking. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, iss. 5, pp. 938–944. <https://doi.org/10.1134/S1062739117052970>
11. Levin L. Yu., Kolesov E. V., Semin M. A. Dynamics of ice wall under conditions of damaged freezing pipes when shaft sinking. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2016, no. 11, pp. 257–265 (in Russian).
12. Levin L. Yu., Syomin M. A., Parshakov O. S., Kolesov E. V. Method for solving inverse Stefan problem to control ice wall state during shaft excavation. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 255–267. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.3.6>
13. Iudin M. M. Safety provision of bore stability during defrosting of ice barrier. *Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Yakutsk State University], 2009, vol. 6, no. 1, pp. 46–51 (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Головатый Иван Иванович – генеральный директор ОАО «Беларускалий» (ул. Коржа, 5, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: belaruskali.office@kali.by

Прушак Виктор Яковлевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by

Диулин Денис Александрович – генеральный директор, ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (Солигорск-4, 223710, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: trest@shahta.by

Information about the authors

Pyotr A. Vitiaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Ivan I. Golovaty – General Director, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: belaruskali.office@kali.by

Victor Y. Prushak – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by

Denis A. Diulin – Director General, JSC “Trest Shahtospetsstroy” (223710, Soligorsk-4, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: trest@shahta.by