ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(8):51-69
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.253 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_51

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОТТАИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОХОДКЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ СПОСОБОМ ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ

О.С. Паршаков[1], Л.Ю. Левин[1], М.А. Семин[1]

[1] Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия,
e-mail: olegparshakov@gmail.com

Аннотация: Представлены экспериментальные данные, полученные в результате контролирования состояния ледопородных ограждений, строящихся шахтных стволов двух рудников, разрабатывающих Старобинское и Верхнекамское месторождения калийных солей. На основе экспериментальных данных приведен сравнительный анализ динамики температуры рассматриваемых горных пород в различные периоды эволюции ледопородных ограждений стволов. Для оценки теплового баланса участков породного массива выполнен расчет количества теплоты, отобранной и привнесенной в соответствующие периоды замораживания и оттаивания горных пород. Принимая во внимание опыт проходки шахтных стволов способом искусственного замораживания, установлено, что выбор способа размораживания породного массива преимущественно зависит от фактического план-графика строительства отдельного горнодобывающего предприятия. При помощи откалиброванных моделей термодинамических процессов, происходящих в замораживаемых участках породного массива, произведена серия численных расчетов теплораспределения, ориентированных на повышение эффективности и безопасности проходки вертикальных стволов. Результаты многовариантного моделирования позволили определить наиболее целесообразные способы оттаивания горных пород с учетом условий их предварительного замораживания и текущего графика строительства горно-обогатительных комплексов. Установлено, что при использовании способа искусственного оттаивания длительность периода стабилизации температурного поля предварительно замороженного породного массива до состояния, близкого к естественной геотермии породного массива (с отклонением не более чем ± 2 °С), превышает весь срок строительства шахтных стволов.

Ключевые слова: ледопородное ограждение, породный массив, искусственное замораживание, оттаивание горных пород, температурное поле, шахтный ствол, система контроля, экспериментальные данные.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-30008.

Для цитирования: *Паршаков О. С., Левин Л. Ю., Семин М. А.* Анализ процесса оттаивания горных пород при проходке шахтных стволов способом искусственного замораживания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 51–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_51.

© О.С. Паршаков, Л.Ю. Левин, М.А. Семин. 2021.

Thawing of rocks in shaft sinking with artificial ground freezing

O.S. Parshakov[1], L.Yu. Levin[1], M.A. Semin[1]

[1] Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: olegparshakov@gmail.com

Abstract: The article describes the experimental data on frozen walls of mine shafts under construction in two underground mines operating in Starobin and Upper Kama potassium salt deposits. On the evidence of the experimental data, the temperature dynamics in rock mass is analyzed in different periods of evolution of frozen walls around the shafts. For the temperature balance assessment in rock mass, the amount of heat output and input in rocks in certain freeze and thaw periods is calculated. In view of the experience gained in sinking of mine shafts with artificial ground freezing, the choice of the rock mass thawing method is mostly governed by the actual construction plan of a specific mine. Using the calibrated models of thermodynamics in rock mass areas subjected to freezing, a series of numerical calculations of heat distribution is performed with a view to enhancing safety and efficiency of vertical shaft sinking. The multivariate modeling results made it possible to identify the most efficient methods to thaw rocks with regard to their preliminary freezing conditions and with respect to the current plan of construction of mining and processing infrastructure. It is found that with the artificial ground freezing method, duration of the temperature stabilization period in frozen rocks to reach the state of natural geothermy (at a bias not more than by ± 2 °C) is longer than the entire construction period of mine shafts.

Key words: frozen walls, rock mass, artificial ground freezing, rack thawing, temperature field, mine shaft, control system, experimental data.

Acknowledgements: The studies were supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-77-30008.

For citation: Parshakov O. S., Levin L. Yu., Semin M. A. Thawing of rocks in shaft sinking with artificial ground freezing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(8):51-69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_51.

Введение

Основным способом проходки шахтных стволов через обводненные, слабоустойчивые участки породных массивов является искусственное замораживание горных пород. Технология замораживания позволяет создать вокруг вскрывающей выработки ледопородное ограждение (ЛПО), обеспечивающее требуемую прочность и устойчивость пород для сдерживания давления подземных вод, а также предотвращения неконтролируемых обрушений стенок выработки [1 – 5].

Процесс искусственного замораживания породного массива принято делить на следующие периоды формирования и поддержания ЛПО требуемых параметров:

- период активного замораживания – образование ледопородного ограждения до начала проходки ствола;
- период пассивного замораживания — поддержание сформированного ограждения до возведения постоянной крепи ствола.

На практике периоды активного и пассивного замораживания считаются

наиболее ответственными и значимыми. Контроль протекания процесса замораживания горных пород регламентируется нормативными документами [6, 7]. Одним из распространенных способов контроля является термометрический, для его осуществления бурятся контрольно-термические скважины, в которых устанавливаются датчики измерения температуры. Таким образом, при помощи скважин отслеживается динамика температурного поля замораживаемого участка породного массива. На основе экспериментальных данных делаются выводы о фактических параметрах состояния ЛПО в различные периоды заморозки [8].

По окончании сооружения крепи шахтного ствола наступает период оттаивания — размораживание горных пород до их естественного состояния. В процессе оттаивания происходит перераспределение напряжений в породном массиве, крепь ствола получает полную нагрузку, изменяется температура самой крепи. Параллельно с оттаиванием проводятся работы по герметизации тюбинговой крепи (подтяжка болтов, чеканка соединительных швов, дополнительное уплотнение пикотажных швов) и контрольный тампонаж [9]. Это свидетельствует о том, что процесс оттаивания ЛПО является не менее ответственным и требует должного внимания на протяжении всего времени выравнивания температуры пород, то есть до окончания стабилизации температурного режима породного массива. Под стабилизацией температурного режима понимается достижение значений температур горных пород, близких к естественной геотермии породного массива (с отклонением не более чем ±2 °С) за исключением приконтурной зоны пород с шахтным стволом.

При этом, как показывает опыт, длительность стабилизации температурного режима участка породного массива в зависимости от условий его предварительного замораживания и последующего оттаивания может превышать весь срок строительства шахтных стволов. Однако после завершения проходки ствола и возведения его постоянной крепи ликвидируются контрольно-термические скважины совместно с замораживающими скважинами. В результате в период оттаивания экспериментальные измерения температуры горных пород зачастую не производятся.

Вопросы оттаивания обводненного породного массива, предварительно подвергнутого длительному искусственному замораживанию (более 1 года), крайне редко рассматриваются в литературе. Существуют отдельные примеры исследований поведения замороженного массива и крепи ствола при производстве работ по контрольной гидроизоляции [10, 11]. Анализ изменения температурного состояния массива пород в течение длительного периода после отключения замораживающей станции стволов ранее не производился.

В целях изучения процесса оттаивания породного массива необходимо решить следующие задачи:

- произвести сравнительный анализ динамики температуры различных горных пород на основе экспериментальных данных, полученных в результате выполнения контроля ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов;
- оценить влияние горно-геологических условий и параметров искусственного замораживания на динамику температуры горных пород в период их размораживания;
- определить время достижения положительных значений температур горных пород, соответствующих естественной геотермии изучаемого участка породного массива.

Экспериментальные данные и теоретические исследования позволят сделать выводы о протекании процесса оттаивания горных пород, залегающих в различных горно-геологических условиях.

Условия замораживания участков породного массива

В 2018 г. началось активное освоение новых участков Старобинского месторождения калийных солей и Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. По причине непростых гидрогеологических условий разрабатываемых участков проходка стволов производилась специальным способом искусственного замораживания горных пород с использованием рассольной схемы. В табл. 1 представлены краткие сведения о гидрогеологических характеристиках участков месторождений и параметрах их замораживания.

На рассматриваемых объектах (горно-обогатительных комплексах) применялся комбайновый способ проходки вертикальных стволов, который обладает рядом преимуществ по сравнению с буровзрывным способом [12].

Кроме этого, для повышения надежности и точности определения температурных полей замораживаемых пород на объектах применялась автоматизированная система термометрического контроля ледопородных ограждений шахтных стволов [13]. В ходе выполнения контроля за формированием и состоянием ЛПО строящихся стволов собраны следующие экспериментальные данные:

- параметры работы замораживающих станций — температура прямого и обратного потоков хладоносителя, циркулирующего в замораживающих скважинах, а также его объемный расход;
- динамика температуры замораживаемых горных пород в контрольно-термических скважинах.

Сбор, обработка и анализ экспериментальных данных произведены при помощи специализированного программного обеспечения «FrozenWall» [14].

Таблица 1

Краткие сведения о месторождениях и параметрах замораживания
Brief description of test deposits and freezing parameters

Месторождение	**Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей**	**Старобинское месторождение калийных солей**
Способ проходки шахтного ствола	**механизированный**	**механизированный**
Диаметр стволов в проходке, м	10,5	10,2
Максимальное суммарное (горное и гидростатическое) давление, МПа	3,90	1,96
Максимальный прогнозный водоприток, м^3/ч	5710,5	949,13
Глубина замораживания, м	222	160
Рабочая температура хладоносителя, °С	–38	–35
Диаметр расположения замораживающих скважин, м	18	16
Внешний диаметр замораживающей колонки, мм	146	146
Количество замораживающих скважин, шт.	48	40
Количество контрольно-термических скважин, шт.	3	4
Проектная максимальная толщина ледопородного ограждения, м	6,2	3,8

На рис. 1, 2 представлены графики, характеризующие параметры работы замораживающих станций в различные периоды эволюции ледопородных ограждений шахтных стволов рудников, разрабатывающих Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей и Старобинское месторождение калийных солей соответственно.

Для условий строительства ствола на Верхнекамском месторождении на создание ЛПО проектных параметров затрачено 258 сут при обеспечении температуры прямого потока хладоносителя –38 °С и его объемного расхода в среднем 320 м³/ч, период поддержания продлился 267 сут с учетом снижения расхода хладоносителя до 240 м³/ч. Продол-

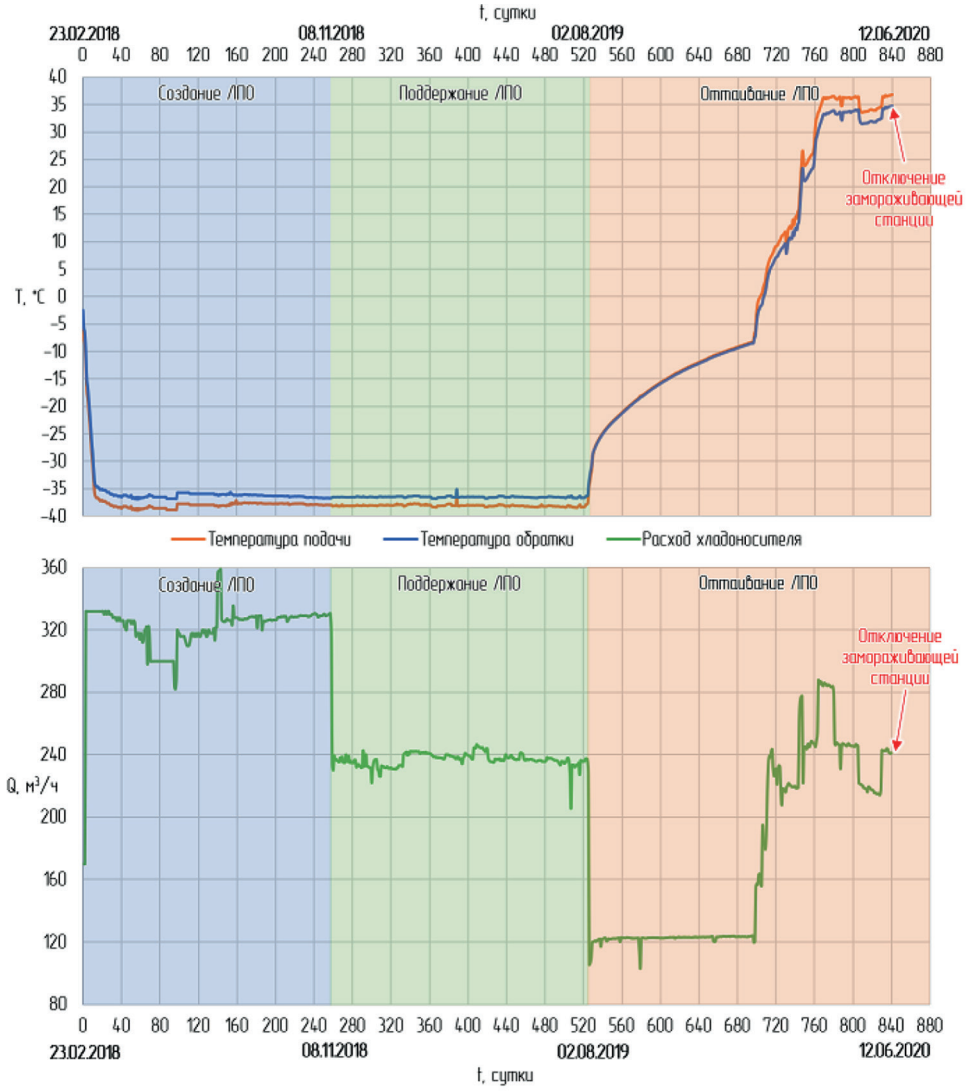

Рис. 1. График замораживания горных пород для условий рудника, разрабатывающего Верхнекамское месторождение

Fig. 1. Rock freezing schedule for mines in Upper Kama deposit

жительность работы замораживающей станции в период оттаивания горных пород составила 315 сут (рис. 1).

Для условий строительства ствола на Старобинском месторождении на создание ледопородного ограждения проектных параметров затрачено 100 сут при обеспечении температуры прямого потока хладоносителя –36 °С и его объемного расхода в среднем 240 м³/ч, период поддержания продлился 462 сут с учетом периодического повышения температуры прямого потока хладоносителя до –20 °С и снижения его расхода в среднем до 200 м³/ч. Продолжительность работы замораживающей станции в период оттаивания горных пород составила 99 сут (рис. 2).

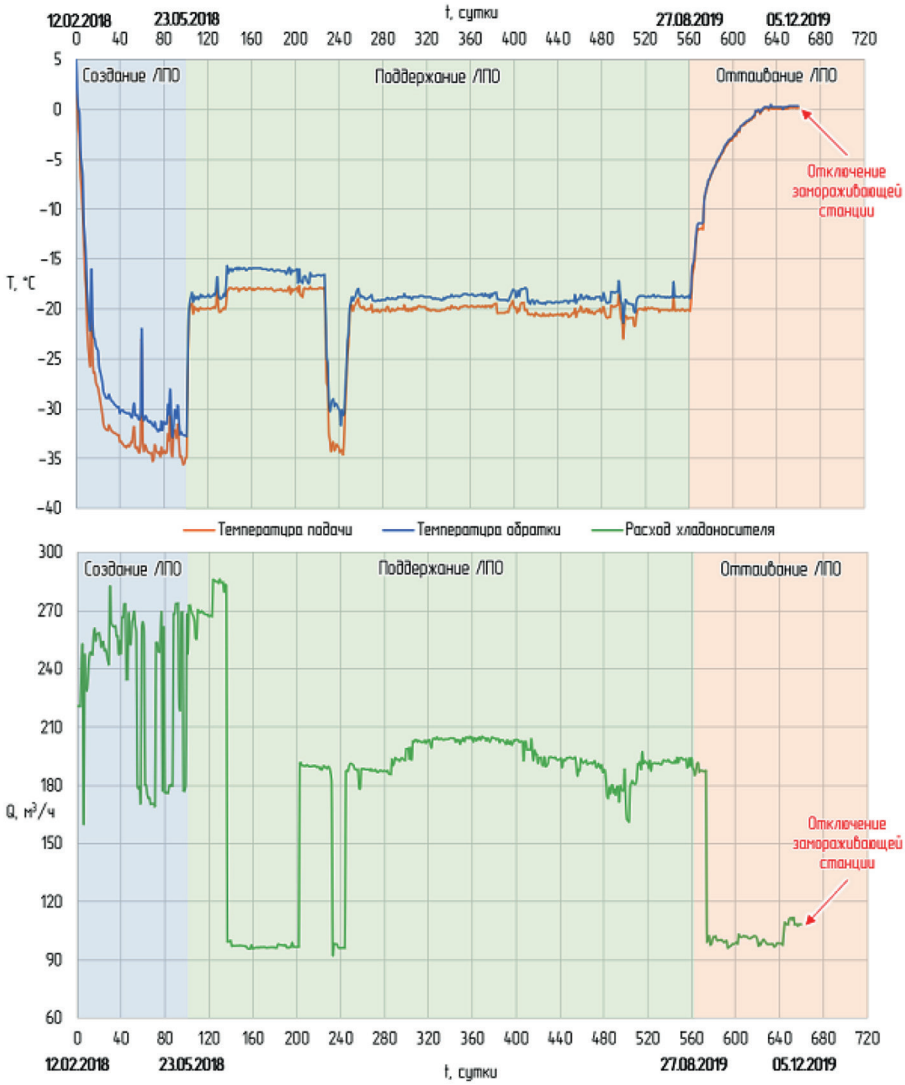

Рис. 2. График замораживания горных пород для условий рудника, разрабатывающего Старобинское месторождение

Fig. 2. Rock freezing schedule for mines in Starobin deposit

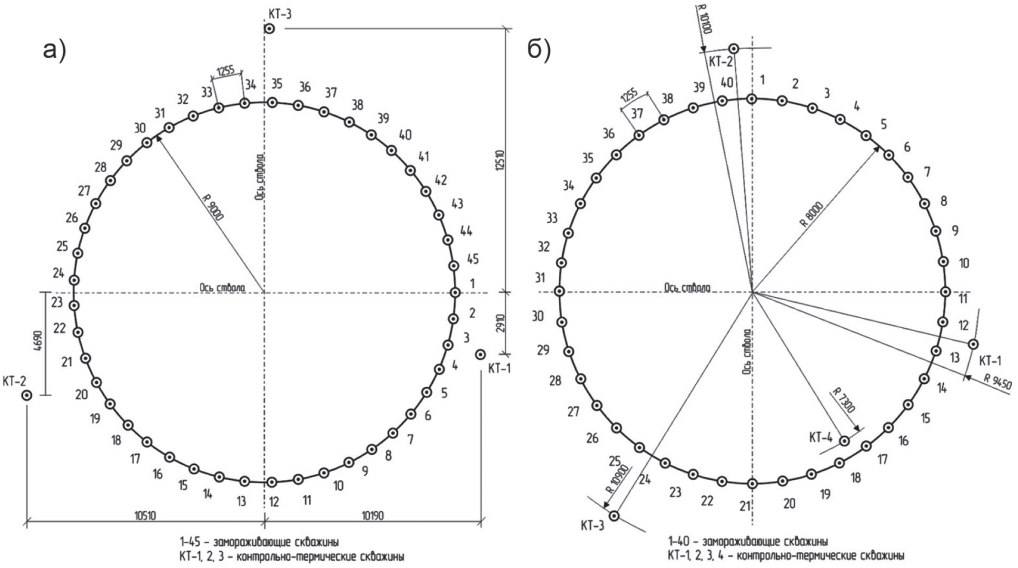

Рис. 3. Расположение замораживающих и контрольно-термических скважин: Верхнекамское месторождение (а); Старобинское месторождение (б)

Fig. 3. Layout of freeze and heat control boreholes: Upper Kama deposit (a); Starobin deposit (b)

Фактические параметры работы замораживающих станций использовались для расчета термодинамических процессов, происходящих в замораживаемых участках породного массива. Следует отметить, что для создания эффективных и безопасных условий проходки шахтных стволов принятие технических решений по корректировке режима работы замораживающей станции основывалось на использовании результатов моделирования, которые получены на базе разработанных и верифицированных термодинамических моделях замораживаемых участков породных массивов.

Экспериментальные измерения температуры горных пород проводились с использованием технологии оптоволоконной термометрии [15, 16]. Значения температуры считывались с оптоволоконного кабеля, проложенного по всей глубине контрольно-термических скважин шахтных стволов. Схемы расположения замораживающих и контрольно-термических скважин стволов представлены на рис. 3.

Динамика температуры для наименее (аргиллит, алевролит) и наиболее (мергель) теплопроводных слоев горных пород Верхнекамского месторождения, а также наименее (мел) и наиболее (глина) теплопроводных слоев Старобинского месторождения приведены на рис. 4, 5 соответственно. Теплофизические свойства рассматриваемых слоев горных пород представлены в табл. 2.

Из рис. 4, 5 видно, что графики температуры пород качественно повторяют графики замораживания, представленные на рис. 2, 3 соответственно. Количественные отличия изменений значений температуры для одного и того же участка месторождения обусловлены различием теплофизических свойств и глубиной залегания пород, а также пространственным расположением замораживающих колонок в слое породы. При этом нетрудно заметить, что динамика температуры пород для условий Верхне-

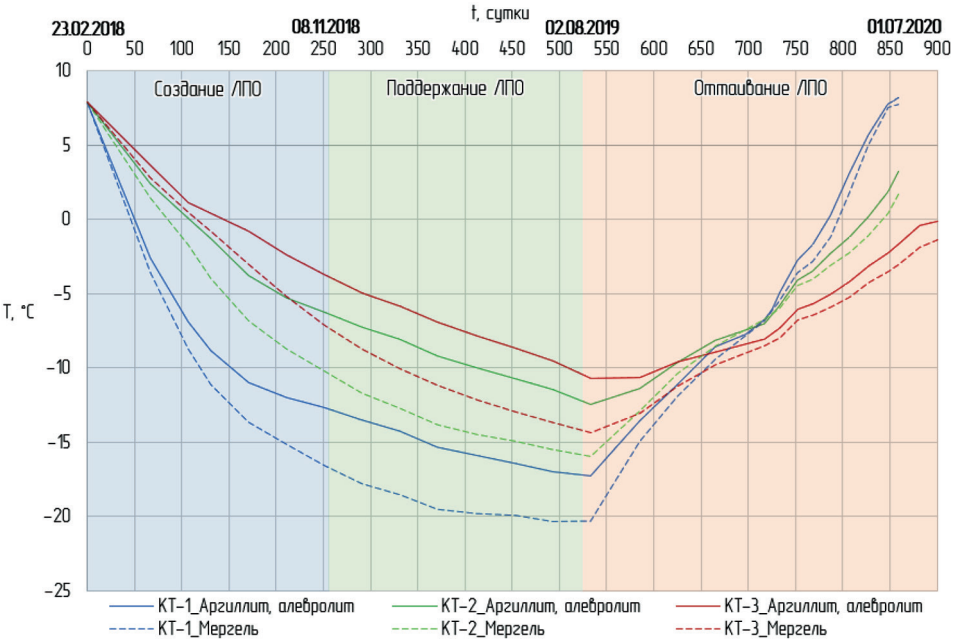

Рис. 4. Динамика температуры рассматриваемых слоев горных пород в контрольно-термических скважинах для условий Верхнекамского месторождения

Fig. 4. Temperature dynamics in test rock layers in heat control boreholes in Upper Kama deposit

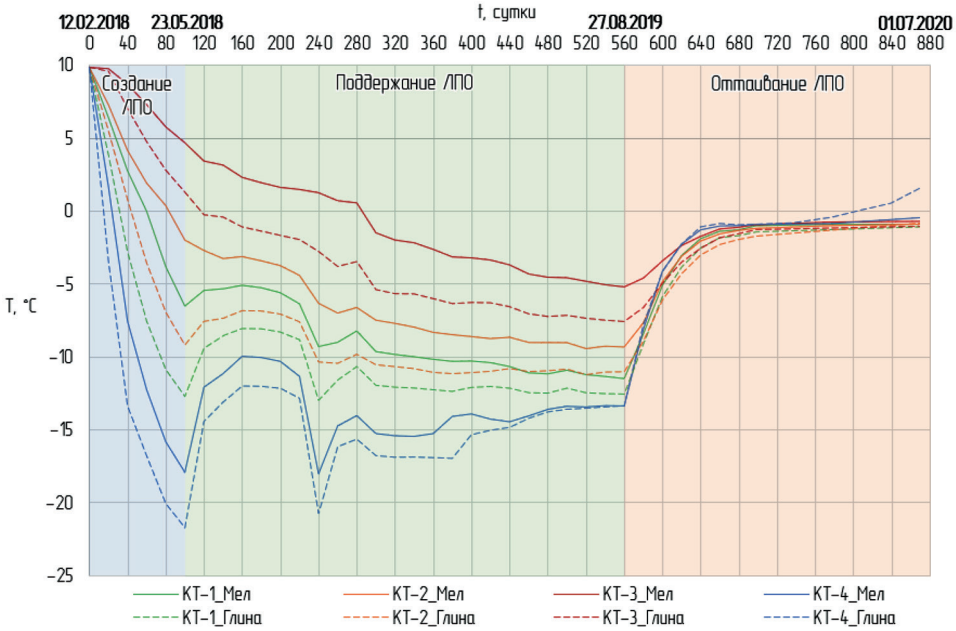

Рис. 5. Динамика температуры рассматриваемых слоев горных пород в контрольно-термических скважинах для условий Старобинского месторождения

Fig. 5. Temperature dynamics in test rock layers in heat control boreholes in Starobin deposit

Таблица 2

Теплофизические свойства горных пород
Thermophysical properties of rocks

Параметр	Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей		Старобинское месторождение калийных солей	
Горная порода	**аргиллит, алевролит**	**мергель**	**мел**	**глина**
Глубина, м – кровли слоя породы – подошвы слоя породы	 –13,9 –30,6	 –187,03 –227,83	 –87,0 –113,0	 –138,9 –157,0
Естественная температура породы, °С	7,9	8,0	10,3	10,8
Температура кристаллизации поровой воды, °С	–3,0	–4,0	–0,3	–0,7
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С) – замороженной породы – непотревоженной породы	 1050 1140	 920 950	 1164 1720	 1090 1373
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С) – замороженной породы – непотревоженной породы	 2,7 1,7	 3,1 2,9	 2,5 1,7	 3,1 2,6
Влажность породы, кг/кг	0,11	0,12	0,16	0,11
Плотность породы, кг/м^3	2360	2130	1870	2000

камского и Старобинского месторождений напрямую зависит от горно-геологических характеристик участка породного массива и его параметров замораживания.

На основании информации об изменении температуры пород в процессе замораживания и оттаивания делались выводы о параметрах состояния ледопородных ограждений шахтных стволов. Кроме этого, для прогнозирования достоверного температурного поля во всем объеме замораживаемого породного массива измеряемые температуры применялись для корректировки параметров математических моделей посред-

Таблица 3

Количество отобранной теплоты в период замораживания горных пород
Amount of heat output in rock freezing period

Горная порода	Количество отобранной теплоты в период замораживания			
	активный период	**пассивный период**	**всего**	**в пересчете на 1 м мощности**
Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей				
Аргиллит, алевролит, ГДж	1157,8	481,5	1639,3	98,2
Мергель, ГДж	3844,2	1069,4	4913,6	120,4
Старобинское месторождение калийных солей				
Мел, ГДж	925,3	579,1	1504,4	57,9
Глина, ГДж	778,8	296,5	1075,3	59,4

ством регуляризации обратной задачи Стефана и ее последующего численного решения [17].

На основе полученных экспериментальных данных для участков месторождений произведен расчет количества теплоты, отобранной в периоды активного и пассивного замораживания горных пород. Результаты расчета для наиболее и наименее теплопроводных слоев горных пород, слагающих замораживаемые породные массивы, приведены в табл. 3. Следует отметить, что суммарное количество рассчитанной тепловой энергии включает:

- количество теплоты, отобранной для охлаждения породы с начальной положительной температуры до температуры фазового перехода:

$$Q_1 = c_n \cdot m_n \cdot \Delta T \ , \qquad (1)$$

где $c_п$ — удельная теплоемкость непотревоженной породы, Дж/(кг·°С); ΔT — разница температур породы, °С; $m_п$ — общая масса цилиндрического кольца породы, кг. Равна:

$$m_n = \rho_n \cdot V_n = \rho_n \cdot \pi \cdot \left(r^2_{внеш} - r^2_{внутр}\right) \cdot h_ц$$

где $\rho_п$ — плотность породы, кг/м^3; $V_п$ — объем цилиндрического кольца породы, м^3; $r_{внеш}$ — радиус внешнего контура ЛПО, м; $r_{внутр}$ — радиус внутреннего контура ЛПО, м; $h_ц$ — мощность слоя породы, м;

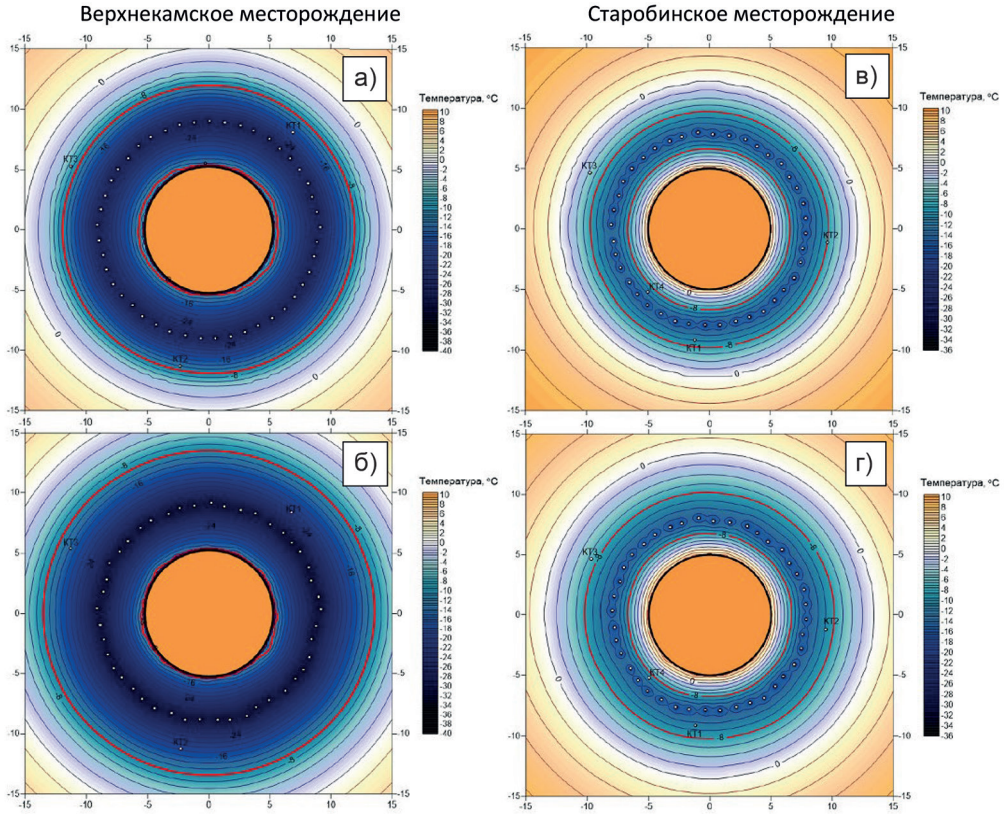

Рис. 6. Температурные поля исследуемых слоев горных пород на окончание периода поддержания ЛПО: аргиллит, алевролит (а); мергель (б); мел (в); глина (г)

Fig. 6. Temperature fields in test rock layers at the end of frozen wall maintenance period: siltstone, mudstone (a); marl (b); chalk (v); clay (g)

• количество теплоты, отобранной для совершения фазового перехода поровой воды в твердое агрегатное состояние:

$$Q_2 = m_в \cdot L, \qquad (2)$$

где L — удельная теплота плавления льда, Дж/кг; $m_в$ — общая масса поровой воды в цилиндрическом кольце породы, кг. Равна:

$$m_в = m_п \cdot w,$$

где w — влажность породы, кг/кг;

• количество теплоты, отобранной для охлаждения горных пород до температуры, зафиксированной в контрольно-термических скважинах в момент перехода на режим размораживания, определяется по формуле:

$$Q_3 = c_м \cdot m_? \cdot \Delta T \qquad (3)$$

где $c_м$ — удельная теплоемкость замороженной породы, Дж/(кг·°С).

Результаты расчета показывают, что в период замораживания у горных пород, относящихся к Верхнекамскому месторождению, отобрано значительно больше теплоты в сравнении с породами Старобинского месторождения. Главным образом это обусловлено более низкотемпературным режимом заморозки пород на Верхнекамском месторождении (рис. 1), чем на Старобинском (рис. 2). Кроме этого, результаты расчета позволили подтвердить следующую закономерность: для одинаковых условий количество отбираемой теплоты у наиболее теплопроводных слоев всегда больше, чем у наименее теплопроводных.

Модельные температурные поля на момент окончания периода поддержания ЛПО для рассматриваемых слоев горных пород представлены на рис. 6. Расчет выполнен при помощи программы «FrozenWall».

Температурные поля свидетельствуют о том, что в период поддержания ЛПО, несмотря на обеспечение его минимально требуемой толщины, границы влияния заморозки значительно шире. На основании полученных экспериментальных данных и моделирования замораживания пород ниже исследуется процесс оттаивания горных пород.

Оттаивание горных пород

Оттаивание горных пород производится естественным или искусственным путем [1, 18, 19]. Естественное оттаивание ЛПО происходит за счет теплоты, отбираемой от непотревоженного породного массива и воздуха, поступающего на проветривание шахтного ствола. Искусственное оттаивание осуществляется за счет циркуляции тепло/хладоносителя в замораживающих колонках или нагнетания в шахтный ствол подогретого воздуха. На сегодняшний день способ искусственного оттаивания горных пород получил наибольшее распространение, однако на практике полная стабилизация температурного режима породного массива возможна только при естественном оттаивании.

Способ искусственного оттаивания с применением циркуляции тепло/хладоносителя по технологическому критерию условно можно разделить на:

• пассивное оттаивание, предусматривающее только циркуляцию тепло/хладоносителя в замораживающих колонках без учета его искусственного подогрева;

• активное оттаивание, которое предусматривает применение нагревательного оборудования для искусственного повышения температуры циркулирующего тепло/хладоносителя;

• комбинированное оттаивание, при котором последовательно используются первые два способа.

Необходимо отметить, что при пассивном оттаивании горных пород, в отличие от традиционного естественного оттаивания, циркуляция хладоносителя не прекращается.

Активное оттаивание позволяет ускорить процесс размораживания ледопородного ограждения, однако ввиду значительных перепадов температуры горных пород не исключены температурные деформации крепи шахтного ствола [9]. Пассивное оттаивание исключает недостатки активного, при этом время достижения естественного состояния породного массива, как показывает практика, может длиться более 2 лет. При применении комбинированного оттаивания на первом этапе за счет циркуляции хладоносителя в замораживающих колонках без включения нагревательного оборудования обеспечивается плавное повышение температуры горных пород по высоте и окружности ствола. В итоге скачкообразного увеличения нагрузки на крепь не происходит. На втором этапе после достижения определенной температуры хладоносителя включается нагревательное оборудование, за счет работы которого осуществляется нагрев.

Комбинированный способ оттаивания целесообразно использовать для повышения безопасности ведения горных работ и качества выполнения технологических операций при сооружении крепи ствола. Например, в период выполнения контрольного тампонажа затюбингового пространства ствола, когда необходимо сохранить сплошность ЛПО с учетом создания требуемой оттаявшей приконтурной зоны, производится пассивное размораживание. Далее после завершения работ по гидроизоляции ствола для стабилизации температурного режима породного массива переходят к активному оттаиванию.

Следовательно, выбор того, или иного способа оттаивания горных пород преимущественно зависит от план-графика строительства шахтных стволов. В связи с чем в целях повышения эффективности строительства стволов зачастую приходится управлять процессом оттаивания ледопородного ограждения. Управление оттаиванием осуществляется на основе интеграции математического моделирования и экспериментальных измерений температуры горных пород в контрольно-термических скважинах и заключается в подборе требуемых параметров работы нагревательного оборудования и калориферных установок шахтных стволов в зависимости от применяемого способа размораживания. В итоге за счет определения требуемых параметров обеспечивается необходимая скорость оттаивания горных пород [20].

При этом протекание процесса размораживания напрямую зависит от горно-геологических условий участка породного массива и параметров его предварительного замораживания. Таким образом, с учетом условий замораживания участков Верхнекамского и Старобинского месторождений, а также при опоре на план-график строительства горно-обогатительных комплексов, выполнены прогнозные расчеты оттаивания горных пород с учетом различных способов размораживания ЛПО.

На основании многовариантного моделирования установлено, что для ствола, строящегося на Верхнекамском месторождении, целесообразно использовать комбинированный способ размораживания горных пород. В результате циркуляция хладоносителя без его искусственного подогрева позволила обеспечить сохранение сплошности ледопородного ограждения при плавном повышении его температуры по всему объему, при этом за счет одновременной подачи в ствол подогретого воздуха к началу выполнения работ по гидроизоляции крепи была создана оттаявшая зона пород вокруг ствола в радиусе 0,5—1,0 м. Следует добавить, что данный способ оттаивания с учетом сохранения ЛПО и соответственно его внутреннего кон-

тура делает возможным сократить объем тампонажного раствора, закачиваемого в массив [19]. После завершения гидроизоляции крепи ствола применение нагревательного оборудования, предусмотренного для искусственного повышения температуры хладоносителя, позволило создать в замороженном участке породного массива необходимую зону с положительными температурами горных пород в целях ликвидации замораживающих и контрольно-термических скважин.

Для Старобинского месторождения анализ моделирования и план развития работ по строительству шахтного ствола показал, что эффективнее всего производить оттаивание ледопородного ограждения только за счет циркуляции хладоносителя и одновременной подачи подогретого воздуха в ствол (пассивное размораживание). Учитывая отсутствие необходимости формирования вокруг замораживающих и контрольно-термических скважин оттаявшей приконтурной зоны, требуемой для их ликвидации, активное размораживание горных пород не использовалось.

Результаты прогнозного расчета теплораспределения для исследуемых слоев горных пород различных месторождений с учетом выбранных способов их размораживания представлены на рис. 7. Модельные тепловые поля рассчитаны

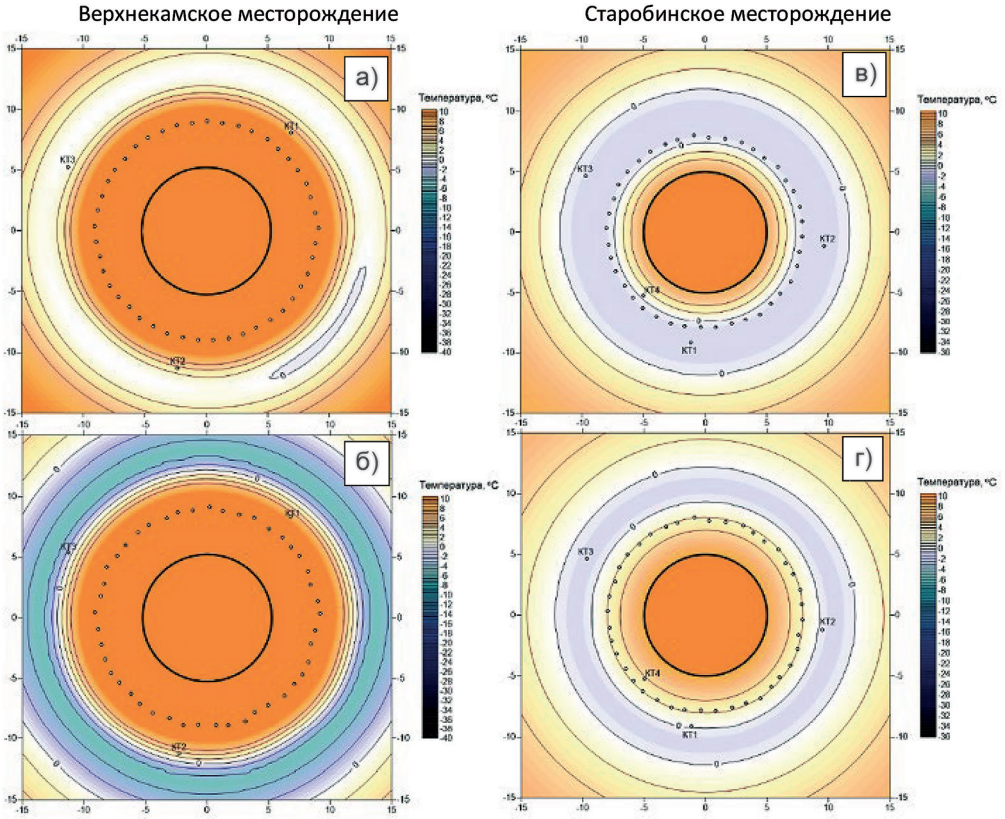

Рис. 7. Температурные поля исследуемых слоев горных пород на момент ликвидации замораживающих и контрольно-термических скважин: аргиллит, алевролит (а); мергель (б); мел (в); глина (г)

Fig. 7. Temperature fields in test rock layers at the time of closure of freeze and heat control boreholes: siltstone, mudstone (a); marl (b); chalk (v); clay (g)

Таблица 4

Количество привнесенной теплоты в период оттаивания горных пород
Amount of heat input in rock thawing period

Горная порода	Количество привнесенной теплоты в период оттаивания					
	циркуляция тепло-носителя	провет-ривание ствола	земные теплопри-токи	контроль-ный тампонаж	всего	в пересчете на 1 м мощности
Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей						
Аргиллит, алевролит, ГДж	1104,6	7,8	186,4	0,9	1299,7	77,8
Мергель, ГДж	3496,9	19,2	598,5	1,7	4116,3	100,9
Старобинское месторождение калийных солей						
Мел, ГДж	65,9	39,3	334,3	1,6	441,1	17,0
Глина, ГДж	77,1	27,4	304,0	1,1	409,6	22,6

на момент начала ликвидации замораживающих и контрольно-термических скважин, то есть на окончание завершения активного оттаивания горных пород на Верхнекамском месторождении и пассивного оттаивания на Старобинском. Следует отметить, что ликвидация замораживающих скважин начинается только после завершения контрольной гидроизоляции шахтной крепи и одновременно сопровождается демонтажом замораживающих станций стволов.

Для оценки влияния различных факторов на оттаивание ЛПО выполнен расчет количества теплоты, привнесенной в период оттаивания горных пород за счет циркуляции тепло/хладоносителя, проветривания стволов, естественного теплопритока со стороны непотревоженного массива и тампонажа затюбингового пространства. Результаты расчета для исследуемых слоев горных пород приведены в табл. 4. Суммарное количество рассчитанной тепловой энергии включает:

- количество теплоты, привнесенное за счет циркуляции тепло/хладоносителя:

$$Q_1 = \alpha \cdot \left(T_x - T_n\right) \cdot S_k \cdot \Delta t\,, \qquad (4)$$

где T_x — температура тепло/хладоносителя, °С; T_n — температура породы на границе с замораживающей колонкой, °С; S_k — площадь теплообмена замораживающих колонок с породой, м^2; Δt — промежуток времени циркуляции тепло/хладоносителя, с; α — коэффициент теплоотдачи между породным массивом и тепло/хладоносителем, Вт/м^2·°С. Коэффициент теплоотдачи зависит от режима движения тепло/хладоносителя и определяется в соответствии с [1].

- количество теплоты, привнесенной в результате проветривания выработки:

$$Q_2 = \alpha \cdot (T_в - T_{кр}) \cdot S_{кр} \cdot \Delta t, \qquad (5)$$

где $T_в$ — температура воздуха в стволе, °С; $T_{кр}$ — температура крепи ствола, °С; $S_{кр}$ — площадь теплообмена воздуха с крепью, м^2; Δt — время проветривания ствола, с; α — коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости движения воздуха в стволе, Вт/м^2·°С. Равен [21]:

$$\alpha = 3,4\frac{v^{0,8}}{d^{0,2}}\,,$$

где v — скорость движения воздуха, м/с; d — диаметр ствола, м;

- количество теплоты, привнесенной за счет земных теплопритоков [1]:

$$Q_3 = 1{,}13T_0 \cdot \sqrt{\lambda_n c_n \rho_n} \cdot \sqrt{\Delta t} \cdot S_{ЛПО} \quad (6)$$

где T_0 — температура породного массива в непотревоженном состоянии, °С; $\lambda_п$ — коэффициент теплопроводности непотревоженной породы, Вт/(м·°С); $c_п$ — удельная теплоемкость непотревоженной породы, Дж/(кг·°С); $\rho_п$ — плотность непотревоженной породы, кг/м^3; Δt — период размораживания, с; $S_{ЛПО}$ — площадь внешней границы ЛПО, м^2;

- количество теплоты, привнесенной в результате реакции твердения бетона:

$$Q_4 = \rho_б \cdot L_б \cdot V_б \quad (7)$$

где $\rho_б$ — плотность бетона, кг/м^3; $L_б$ — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; $V_б$ — объем бетона, закаченного в породный массив, м^3.

Таким образом, для условий Верхнекамского месторождения, где применялось комбинированное оттаивание, основное количество теплоты привнесено за счет циркуляции теплоносителя. Как для слоя аргиллита, алевролита, так и для слоя мергеля количество привнесенной теплоты от общего в процентном соотношении составило 85%. Для условий Старобинского месторождения, где использовалось пассивное оттаивание, основное количество теплоты привнесено за счет земных теплопритоков. Для слоя мела и для слоя глины количество привнесенной теплоты от общего в процентном соотношении составило 76% и 74% соответственно. При этом процентное соотношение количества привнесенной теплоты в период оттаивания породного массива по сравнению с количеством отобранной теплоты в период его замораживания для участка Верхнекамского месторождения, а именно для слоев аргиллита, алевролита и мергеля, составило 79% и 84% соответственно, для участка Старобинского месторождения для слоев мела и глины — 29% и 38% соответственно.

Из результатов расчета суммарной отобранной теплоты в пересчете на 1 м мощности слоев горных пород в период их замораживания (табл. 3), а также суммарной привнесенной теплоты в период их оттаивания (табл. 4) следует, что до полной стабилизации температурного режима слоев аргиллита, алевролита и мергеля Верхнекамского месторождения для 1 м мощности необходимо привнести еще 20,4 ГДж и 19,5 ГДж теплоты соответственно, а для слоев мела и глины Старобинского месторождения — 40,9 ГДж и 36,8 ГДж соответственно.

Можно сделать вывод, что оттаивание горных пород на Верхнекамском месторождении, несмотря на более низкотемпературный режим заморозки, происходило значительно интенсивнее, чем на Старобинском месторождении. Это объясняется применением различных способов искусственного оттаивания горных пород.

Для определения времени достижения положительной температуры горных пород, соответствующей естественной геотермии рассматриваемых участков, в программе «FrozenWall» выполнен прогноз размораживания породного массива. При моделировании процесса естественного оттаивания пород учитывалась величина земных теплопритоков и влияние теплообмена воздуха, поступающего на проветривание горных работ, с крепью ствола. В результате для условий породного массива Верхнекамского месторождения полная стабилизация температурного режима произойдет не ранее чем через 2 года после ликвидации замораживающих и контрольно-термических скважин, для Старобинского месторождения — не ранее чем через 5 лет.

Следует отметить, что при моделировании не учитывалось возможное движение подземных вод [22, 23], верти-

кальные тепловые потоки между слоями пород и влияние тампонажных работ при ликвидации скважин. Кроме этого, необходимо добавить, что долгосрочный прогноз (более 300 сут) термодинамических процессов не может гарантировать полного соответствия модельного распределения температуры с фактическим. Для получения достоверной информации о тепловом поле породного массива требуется производить уточнение (калибровку) математической модели на основе экспериментальных данных на протяжении всего периода стабилизации температурного режима горных пород. При этом момент достижения значений температур пород, соответствующих температуре плавления льда во всем объеме участка породного массива, может свидетельствовать о водопритоках в стволе.

Заключение

Представленный в работе сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных на различных месторождениях калийных солей, показал, что протекание процесса оттаивания горных пород напрямую зависит от их горно-геологических условий залегания и параметров замораживания. Подчеркнуто, что температурный контроль замораживаемых участков породного массива важен на всех этапах эволюции ледопородного ограждения. При этом для адекватной оценки температурного поля породного массива в период его оттаивания необходимо продолжать осуществлять измерения температуры горных пород в контрольно-термических скважинах.

На основе результатов измерений производится калибровка термодинамической модели, которая, в свою очередь, позволяет выбрать наиболее целесообразный способ оттаивания горных пород с учетом план-графика строительства стволов. Кроме этого, появляется возможность управлять процессом оттаивания пород в процессе ведения горных работ и прогнозировать время стабилизации температурного режима во всем объеме участка породного массива.

При помощи моделирования термодинамических процессов установлено, что время размораживания пород до состояния, близкого к естественной геотермии породного массива (с отклонением не более чем ±2 °C), для рассмотренных в работе горно-геологических и технологических условий может быть более 5 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трупак Н. Г.* Замораживание горных пород при проходке стволов. — М.: Углетехиздат, 1954. — 896 с.

2. *Трупак Н. Г.* Замораживание грунтов в подземном строительстве горных. — М.: Недра, 1974. — 281 с.

3. *Долгов О. А.* Методика расчета процесса замораживания горных пород при проходке стволов шахт способом замораживания на большую глубину / Замораживание горных пород при проходке стволов шахт. — М.: изд-во АН СССР, 1961. — С. 9—64.

4. *Alzoubi M. A., Nie-Rouquette A., Sasmito A. P.* Conjugate heat transfer in artificial ground freezing using enthalpy-porosity method: Experiments and model validation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018, vol. 126, pp. 740—752.

5. *Liu Z., Sun Y., Wang B., Li Q.* Experimental study of artificial ground freezing by natural cold gas injection // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 17, article 6055. DOI: 10.3390/app10176055.

6. *СП 103.13330.2012* Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод, утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 30.06.2012 г. — 68 с.

7. *СП 45.13330.2012* Земляные сооружения, основания и фундаменты, утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) 29.12.2011 г. — 140 с.

8. *Sopko J.* Ground control // Tunnels and tunneling. Technical/Geotechnical Engineering. 2017, October-November, pp. 34—37.

9. *Ольховиков Ю. П.* Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.

10. *Пугин А. В.* Исследование динамики тепловых полей при размораживании ледопородных ограждений строящихся стволов // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2018. — Т. 16. — С. 272—275. DOI: 10.7242/GDSP.2018.16.73.

11. *Tao H., Weihao Y., Zhijiang Y., Chi Z., Dongliang B.* Monitoring study of shaft lining concrete strain in freezing water-bearing soft rock during mine shaft construction period in West China // Procedia Engineering. 2011, vol. 26, pp. 992—1000. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2266.

12. *Астафьева Т., Иголка Д.* Механизированная проходка шахтных стволов: быстро, экономично, безопасно // Глобус. Геология и бизнес. — 2020. — № 4(63). — С. 128—135.

13. *Паршаков О. С.* Разработка автоматизированной системы термометрического контроля ледопородных ограждений: Дис. ... канд. техн. наук. — Пермь, 2019. — 140 с.

14. *Левин Л. Ю.*, *Богомягков А. В.*, *Паршаков О. С.*, *Семин М. А.* Применение программного комплекса «FrozenWall» для расчета искусственного замораживания пород // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2019. — № 4. — С. 269—281.

15. *Шишкин В. В.*, *Грачев И. В.*, *Шелемба И. С.* Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. — 2016. — Т. 3. — № 1. — С. 61—75.

16. *Hoffmann L., Müller M. S., Krämer S., Giebel M., Schwotzer G., Wieduwilt T.* Applications of fibre optic temperature measurement // Estonian Journal of Engineering. 2007, vol. 13, no. 4, pp. 363—378.

17. Левин Л .Ю., *Семин М. А.*, *Паршаков О. С.* Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. — 2019. — Т. 237. — С. 268—274.

18. *Иудин М. М.* Обеспечение безопасности устойчивости ствола при оттаивании ледопородного ограждения // Вестник ЯГУ. — 2009. — Т. 6. — № 1. — С. 46—50.

19. *Тарасов В. В.*, *Кошев Г. Я.*, *Загвоздкин И. В.*, *Чагинов А. В.*, *Николаев П. В.* О решении проблем безопасности при строительстве вертикальных стволов на калийных месторождениях в период оттаивания ледопородного ограждения // Безопасность труда в промышленности. — 2016. — № 9. — С. 55—59.

20. *Alzoubi M. A.*, *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, vol. 29, no. 4, pp. 621—627.

21. *Щербань А. Н.*, *Кремнев О. А.* Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Т. 1. — Киев: изд-во АН УССР, 1959. — 430 с.

22. *Hu R., Liu Q., Xing Y.* Case study of heat transfer during artificial ground freezing with groundwater flow // Water (Switzerland). 2018, vol. 10, no. 10. DOI: 10.3390/w10101322.

23. *Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F.* Thermo-hydraulic modeling of artificial ground freezing: Application to an underground mine in fractured sandstone // Computers and Geotechnics. 2016, vol. 75, pp. 80–92. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.01.024. ГИАБ

REFERENCES

1. Trupak N. G. *Zamorazhivanie gornykh porod pri prokhodke stvolov* [Freezing rocks during shaft sinking], Moscow, Ugletekhizdat, 1954, 896 p.

2. Trupak N. G. *Zamorazhivanie gruntov v podzemnom stroitel'stve gornykh* [Freezing of soils in underground mining], Moscow, Nedra, 1974, 281 p.

3. Dolgov O. A. Methodology for calculating the process of freezing rocks when driving mine shafts by freezing to a great depth. *Zamorazhivanie gornykh porod pri prokhodke stvolov shakht* [Freezing of rocks during sinking of mine shafts], Moscow, izd-vo AN SSSR, 1961, pp. 9 — 64.

4. Alzoubi M. A., Nie-Rouquette A., Sasmito A. P. Conjugate heat transfer in artificial ground freezing using enthalpy-porosity method: Experiments and model validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, vol. 126, pp. 740 — 752.

5. Liu Z., Sun Y., Wang B., Li Q. Experimental study of artificial ground freezing by natural cold gas injection. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 17, article 6055. DOI: 10.3390/app10176055.

6. *Zashchita gornykh vyrabotok ot podzemnykh i poverkhnostnykh vod SP 103.13330.2012*, utv. prikazom Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii (Minregion Rossii) 30.06.2012 g. [Construction Regulations SP 103.13330.2012 Protection of Underground Openings from Ground and Surface Water. Approved by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation, Order as of Jun 30, 2012], 68 p. [In Russ].

7. *Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenty SP 45.13330.2012*, utv. prikazom Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii (Minregion Rossii) 29.12.2011 g. [Construction Regulations SP 45.13330.2012 Earth Structures, Basements and Foundations], 140 p. [In Russ].

8. Sopko J. Ground control. Tunnels and tunneling. *Technical/Geotechnical Engineering*. 2017, October-November, pp. 34 — 37.

9. Ol'khovikov Yu. P. *Krep' kapital'nykh vyrabotok kaliynykh i solyanykh rudnikov* [Support for capital workings of potash and salt mines], Moscow, Nedra, 1984, 238 p.

10. Pugin A. V. Investigation of the dynamics of thermal fields during defrosting of ice walls of shafts under construction. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov*. 2018, vol. 16, pp. 272 — 275. [In Russ]. DOI: 10.7242/GDSP.2018.16.73.

11. Tao H., Weihao Y., Zhijiang Y., Chi Z., Dongliang B. Monitoring study of shaft lining concrete strain in freezing water-bearing soft rock during mine shaft construction period in West China. *Procedia Engineering*. 2011, vol. 26, pp. 992 — 1000. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2266.

12. Astaf'eva T., Igolka D. Mechanized shaft sinking: fast, economical, safe. *Globus. Geologiya i biznes*. 2020, no. 4(63), pp. 128 — 135. [In Russ].

13. Parshakov O. S. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy termometricheskogo kontrolya ledoporodnykh ograzhdeniy* [Development of an automated system for thermometric control of frozen wall], Candidate's thesis, Perm, 2019, 140 p.

14. Levin L. Y., Bogomyagkov A. V., Parshakov O. S., Semin M. A. The application of «FrozenWall» software in simulation of artificial ground freezing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2019, no. 4, pp. 269 — 281. [In Russ].

15. Shishkin V. V., Grachev I. V., Shelemba I. S. Domestic experience in the production and application of fiber optic sensors. *Prikladnaya fotonika*. 2016, vol. 3, no. 1, pp. 61 — 75. [In Russ].

16. Hoffmann L., Müller M. S., Krämer S., Giebel M., Schwotzer G., Wieduwilt T. Applications of fibre optic temperature measurement. *Estonian Journal of Engineering*. 2007, vol. 13, no. 4, pp. 363 — 378.

17. Levin L. Yu., Semin M. A., Parshakov O. S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 268 — 274. [In Russ].

18. Iudin M. M. Ensuring the safety of the stability of the shaft during thawing of the frozen wall. *Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009, vol. 6, no. 1, pp. 46 — 50. [In Russ].

19. Tarasov V. V., Koshev G. Ya., Zagvozdkin I. V., Chaginov A. V., Nikolaev P. V. On the solution of safety problems during the construction of vertical shafts at potash deposits during the thawing period of the frozen wall. *Occupational Safety in Industry*. 2016, no. 9, pp. 55 — 59. [In Russ].

20. Alzoubi M. A., 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, vol. 29, no. 4, pp. 621 — 627.

21. Shcherban' A. N., Kremnev O. A. *Nauchnye osnovy rascheta i regulirovaniya teplovogo rezhima glubokih shaht* [Scientific basis for calculating and regulating the thermal regime of deep mines], vol. 1. Kiev, izd-vo AN USSR, 1959, 430 p.

22. Hu R., Liu Q., Xing Y. Case study of heat transfer during artificial ground freezing with groundwater flow. *Water (Switzerland)*. 2018, vol. 10, no. 10. DOI: 10.3390/w10101322.

23. Vitel M., Rouabhi A., Tijani M., Guérin F. Thermo-hydraulic modeling of artificial ground freezing: Application to an underground mine in fractured sandstone. *Computers and Geotechnics*. 2016, vol. 75, pp. 80–92. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.01.024.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Паршаков Олег Сергеевич[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: olegparshakov@gmail.com,
Левин Лев Юрьевич[1] — д-р техн. наук, зав. отделом
аэрологии и теплофизики, e-mail: aerolog.lev@gmail.com,
Семин Михаил Александрович[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: mishkasemin@gmail.com,
[1] Горный институт Уральского отделения РАН.
Для контактов: Паршаков О.С., e-mail: olegparshakov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

O.S. Parshakov[1], Junior Researcher,
e-mail: olegparshakov@gmail.com,
L.Yu. Levin[1], Dr. Sci. (Eng.),
Head of Aerology and Thermophysics Department,
e-mail: aerolog.lev@gmail.com,
M.A. Semin[1], Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: mishkasemin@gmail.com,
[1] Mining Institute of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.
Corresponding author: O.S. Parshakov, e-mail: olegparshakov@gmail.com.

Получена редакцией 21.10.2020; получена после рецензии 20.11.2020; принята к печати 10.07.2021.
Received by the editors 21.10.2020; received after the review 20.11.2020; accepted for printing 10.07.2021.