



УДК 622.253

## Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах

Л.Ю.ЛЕВИН<sup>✉</sup>, М.А.СЕМИН, О.С.ПАРШАКОВ

Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

Освоение месторождений, залегающих в сложных геологических и гидрогеологических условиях, часто связано с необходимостью применения специальных способов проходки шахтных стволов. Наиболее надежным и универсальным способом проходки стволов является искусственное замораживание горных пород – создание ледопородного ограждения вокруг запроектированной горной выработки. Под защитой искусственно созданного сооружения в дальнейшем ведутся горнопроходческие работы. При этом проходка подземных горных выработок разрешается только после образования замкнутого замороженного контура проектной толщины. Кроме того, за состоянием замораживаемых горных пород должен быть организован систематический контроль. Опыт строительства рудников в сложных гидрогеологических условиях способом искусственного замораживания показывает, что современные технологии точечных и распределенных измерений температуры горных пород в контрольных скважинах не позволяют установить фактические параметры ледопородного ограждения. Современные теоретические модели и методы расчета теплового режима породного массива при его искусственном замораживании также не позволяют получить корректный прогноз параметров ледопородного ограждения в случае высокой погрешности исходных данных модели. В работе предлагается система контроля, которая осуществляет синтез экспериментальных измерений и теоретических расчетов параметров ледопородного ограждения. Такой подход позволяет провести сравнение измеренных в экспериментах и теоретически рассчитанных температур породного массива в контрольных скважинах и вычислить рассогласование между ними. На основании рассогласования температур уточняются параметры математической модели замораживаемого породного массива. Уточнение модельных параметров осуществляется посредством постановки обратной задачи Стефана, ее регуляризации и дальнейшего численного решения.

**Ключевые слова:** ледопородное ограждение; породный массив; искусственное замораживание пород; температурное поле; шахтный ствол; оптоволоконный кабель; контрольные скважины; замораживающие колонки; система контроля; задача Стефана

**Благодарность.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 17-11-01204.

**Как цитировать эту статью:** Левин Л.Ю. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, О.С.Паршаков // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 268-274. DOI 10.31897/PMI.2019.3.268

**Введение.** Сложные инженерно-геологические и гидрогеологические условия строительства подземных сооружений требуют применения специальных способов производства работ, в частности искусственного замораживания горных пород (ВСН 189-78 «Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей» / Минтрансстрой. М., 1978. 68 с.). Применительно к строительству шахтных стволов искусственное замораживание горных пород используется для создания ледопородного ограждения (ЛПО) вокруг запроектированной горной выработки (рис.1) [2, 10, 11, 14].

Образование ледопородного ограждения в процессе искусственного замораживания достигается следующим способом [10]: по контуру запроектированного к проходке ствола бурятся скважины, в которые опускаются замораживающие колонки. За счет работы замораживающих станций по колонкам осуществляется циркуляция хладоносителя (рассола). В результате циркуляции охлаждающего рассола в замораживающей колонке окружающий ее породный массив постепенно охлаждается, а содержащаяся в массиве вода кристаллизуется. По истечении некоторого времени вокруг замораживающих колонок образуются одиночные ледопородные цилиндры, которые в дальнейшем смыкаются, образуя ледопородное ограждение. Под защитой искусственно созданного ЛПО в дальнейшем ведутся горнопроходческие работы [3, 7].

Производство работ по проходке подземных выработок после замораживания разрешается только после образования замкнутого замороженного контура проектной толщины. Толщина за-

мороженого контура рассчитывается исходя из условий прочности [17, 19] таким образом, чтобы препятствовать поступлению грунтовых вод в шахтный ствол в течение всего периода строительства вертикальной горной выработки.

**Использование оптоволоконной термометрии для контроля формирования и состояния ледопородного ограждения.** При проходке горных выработок должен быть организован систематический контроль за состоянием замороженных пород (ПБ 03-428-02 «Правила безопасности при строительстве подземных сооружений»). Утверждены Постановлением Госгортехнадзора РФ от 02.11.2001, № 49). Контроль за процессом формирования ледопородного ограждения осуществляют, как правило, с помощью термо- и гидронаблюдательных скважин, ультразвукового способа и средств вычислительной техники [1]. На основании контроля устанавливается сплошность ледопородного ограждения и производится расчет его толщины. При этом опыт строительства рудников в сложных гидрогеологических условиях способом искусственного замораживания показывает, что современные технологии точечных и распределительных измерений температуры горных пород в контрольных скважинах не позволяют установить фактические параметры ледопородного ограждения [8, 18].

Неспособность существующих способов контролировать формирование ледопородного ограждения, а также недостаточная точность расчетов его параметров приводили к проблемам с обеспечением герметичности ледопородного ограждения на таких горных предприятиях, разрабатывающих месторождения с повышенной обводненностью, как Гремячинский ГОК минерально-химической компании «ЕвроХим», Гарлыкский ГОК государственного концерна «Туркменхимия», а также рудоуправления Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Возникающие аварийные случаи при строительстве выработок приводят к снижению безопасности ведения горных работ и дополнительным финансовым затратам [9]. Для исключения недостаточной точности теоретических методов прогнозирования параметров ЛПО и выполнения оперативного контроля его параметров отделом аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН разработана система контроля формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов, которая базируется на использовании оптоволоконной термометрии.

Особенность предложенной системы контроля заключается в том, что ее структурные элементы позволяют хранить все данные геологических и теплофизических свойств горных пород, осуществлять сбор параметров работы замораживающих станций стволов и обрабатывать данные экспериментальных измерений температуры породного массива в различные моменты времени (рис.2). При помощи данной системы производится математическая интерпретация результатов термометрии скважин, на основании которой определяется температурное поле породного массива в условиях искусственного замораживания. Разработанная система контроля апробирована и внедрена при проходке шахтных стволов рудника Петриковского горно-обогатительного комбината в ОАО «Беларуськалий».

В основу данного способа контроля ЛПО положено экспериментальное измерение температуры горных пород по всей глубине контрольных термических скважин с помощью оптического волокна [9]. Основными элементами системы являются волоконно-оптический регистратор и оптоволоконный кабель, при помощи которых производится распределенное измерение температуры. Волоконно-оптический регистратор служит для генерирования оптического сигнала, спектральной фильтрации света обратного рассеяния, преобразования света обратного рассеяния в электрические сигналы, а также для его усиления и электронной обработки. Оптоволоконный кабель

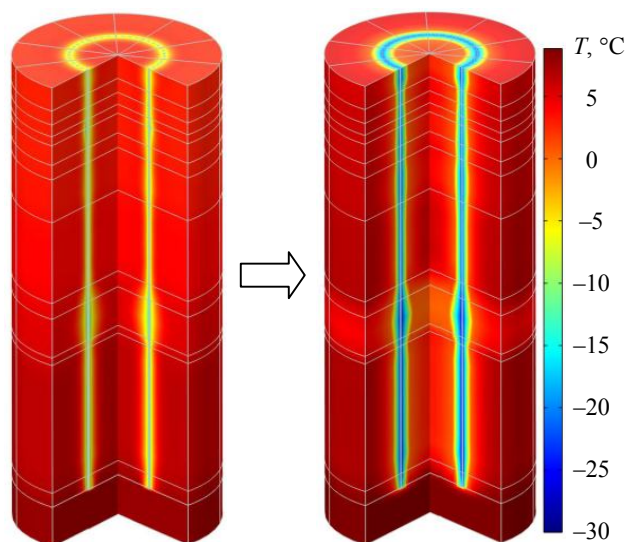


Рис. 1. Формирование ледопородного ограждения в условиях искусственного замораживания

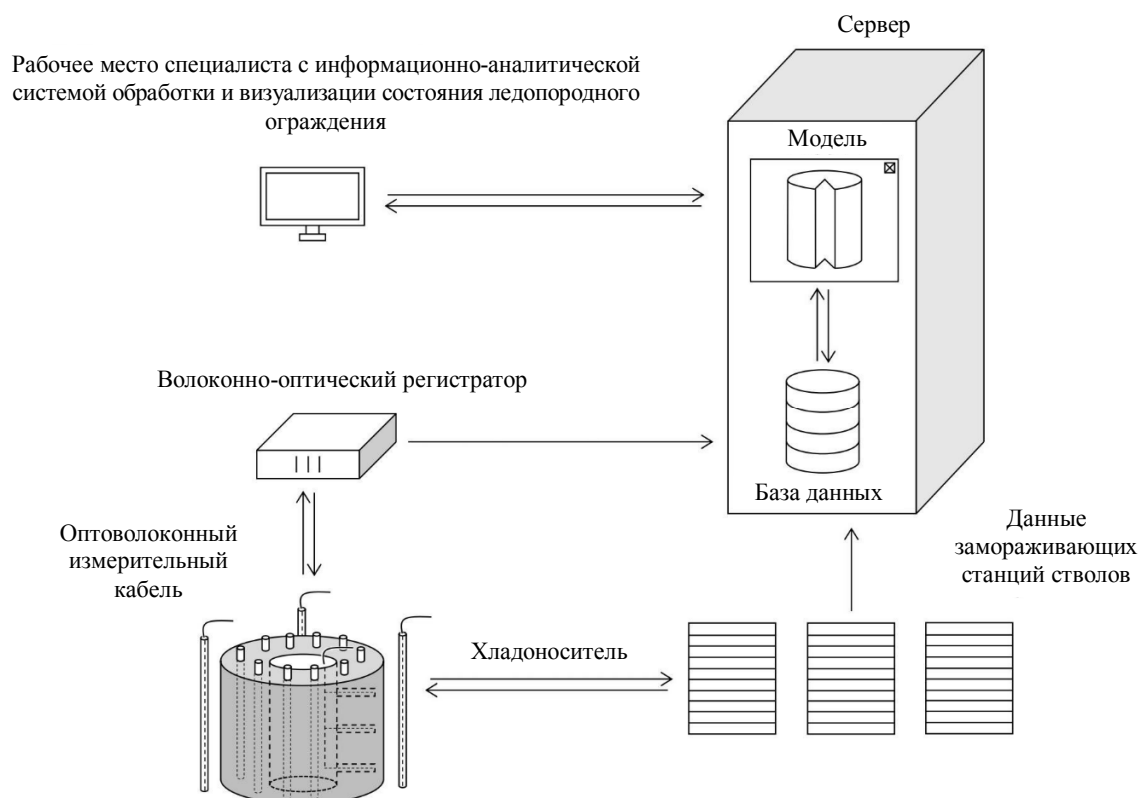


Рис.2. Обобщенная структурная схема системы контроля ЛПО

используется в качестве линейного датчика, который размещается в контрольных скважинах на всю их глубину.

Тепловое воздействие замораживающих колонок приводит к неравномерному по глубине изменению температуры горных пород, окружающих контрольные скважины. При этом температурная неравномерность вызывает внутримолекулярные колебания решетки оптоволокна и, как следствие, приводит к изменению характеристик пропускания света по длине оптоволоконного кабеля. Таким образом, принцип измерения распределенной температуры заключается в сравнении спектров и интенсивностей исходного лазерного излучения и излучения, рассеянного в обратном направлении после прохождения по оптоволокну. Благодаря обработке и интерпретации обратного комбинационного рамановского рассеяния температура вдоль оптического волокна определяется с пространственным разрешением 25 см и с точностью измерения 0,1 °C. При этом период измерения распределенной температуры в контрольных скважинах составляет всего несколько минут. На основе применения оптоволоконной технологии в скважинах определяется временная и пространственная динамика изменения температуры породного массива (рис.3).

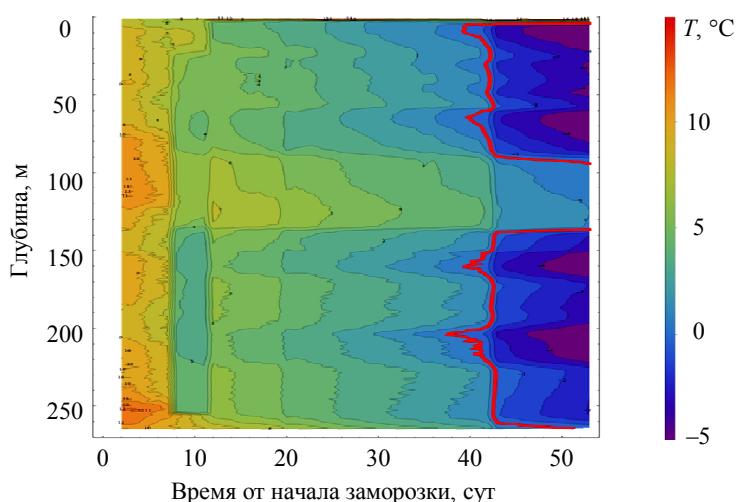


Рис.3. Динамика изменения температуры породного массива по глубине контрольной скважины ствола 1 Петриковского месторождения

Также система контроля формирования и состояния ледопородного ограждения автоматически осуществляет сбор параметров работы замораживающих станций стволов, таких как температура прямого и обратного потоков хладоносителя и его расход в замораживающих колонках.

**Математическое прогнозирование поля температур в породном массиве.** Прогнозирование поля температур во всем породном массиве при его искусственном замораживании осуществляется с использованием данных инженерно-геологических изысканий (фильтрационных, прочностных и теплофизических свойств слоев горных пород) и информации о системе замораживания (координаты устья и забоя каждой из замораживающих скважин, временные диаграммы температуры и расхода рассола, циркулирующего по системе замораживающих колонок).

В рамках описываемого исследования разработана математическая модель процессов тепло- и массообмена, протекающих во влагонасыщенном породном массиве с изотропными и однородными свойствами при его искусственном замораживании. Принимается, что теплообмен в вертикальном направлении пренебрежимо мал по сравнению с горизонтальным направлением [17] – это позволяет перейти к двумерной постановке и рассматривать задачу для каждого слоя горных пород в отдельности. Миграция влаги под действием градиентов давления и температуры не рассматривается. Также принимается, что фазовый переход протекает в заданном интервале температур по линейному закону, что выражается следующей функциональной зависимостью энтальпии  $H$  от температуры  $T$ :

$$H(T) = \begin{cases} \rho_{th} c_{th} (T - T_{p2}) + \rho_{th} w L & \text{при } T_{p2} < T; \\ \rho_{th} w L \phi_{ice} & \text{при } T_{p1} < T < T_{p2}; \\ \rho_{fr} c_{fr} (T - T_{p1}) & \text{при } T < T_{p1}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – массовая теплоемкость грунта, Дж/(°С·кг);  $w$  – влагосодержание грунта, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $L$  – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;  $T_{p1}$  – температура начала кристаллизации, °С;  $T_{p2}$  – температура конца кристаллизации, °С;  $\phi_{ice}$  – концентрация твердой фазы грунтовых вод; индекс «th» соответствует талым породам, а индекс «fr» – замерзшим.

В соответствии с (1), рассматривается энтальпийная постановка прямой задачи Стефана (или задачи теплопроводности с движущейся границей фазового перехода) [4]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(\phi_{ice}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(\phi_{ice}) \frac{\partial T}{\partial y} \right]; \quad (2)$$

$$\left[ \lambda(\phi_{ice}) \frac{\partial T}{\partial n} - \alpha(T_F - T) \right]_{\Omega_F} = 0; \quad (3)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0; \quad (4)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (5)$$

$$\phi_{ice}(H) = \begin{cases} 1 & \text{при } H < 0; \\ 1 - H / (\rho_{th} w L) & \text{при } 0 < H < \rho_{th} w L; \\ 0 & \text{при } \rho_{th} w L < H. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь  $\lambda(\phi_{ice}) = \phi_{ice} \lambda_{fr} + (1 - \phi_{ice}) \lambda_{th}$  – функция теплопроводности породного массива от концентрации фазы льда, Вт/(°С·м);  $t$  – физическое время, с;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена на границе массива с замораживающими колонками, Вт/(°С·м<sup>2</sup>);  $x, y$  – физические координаты, м;  $\Omega_F = \bigcup \Omega_{Fi}$  – границы со всеми замораживающими колонками  $i = 1, \dots, N$ ;  $\Omega_{out}$  – внешняя граница области моделирования;  $n$  – координата вдоль нормали к  $\Omega_F$ , м.

Экспериментально измеренное распределение температуры по глубине контрольно-термических скважин используется для калибровки теплофизических параметров задачи (1)-(6): теплопроводностей  $\lambda_{fr}$  и  $\lambda_{th}$ , теплоемкостей  $c_{fr}$  и  $c_{th}$ , влагосодержания  $w$ . Калибровка теплофизических параметров задачи (1)-(6) представляет собой решение коэффициентной обратной задачи Стефана [5, 6, 12, 13].



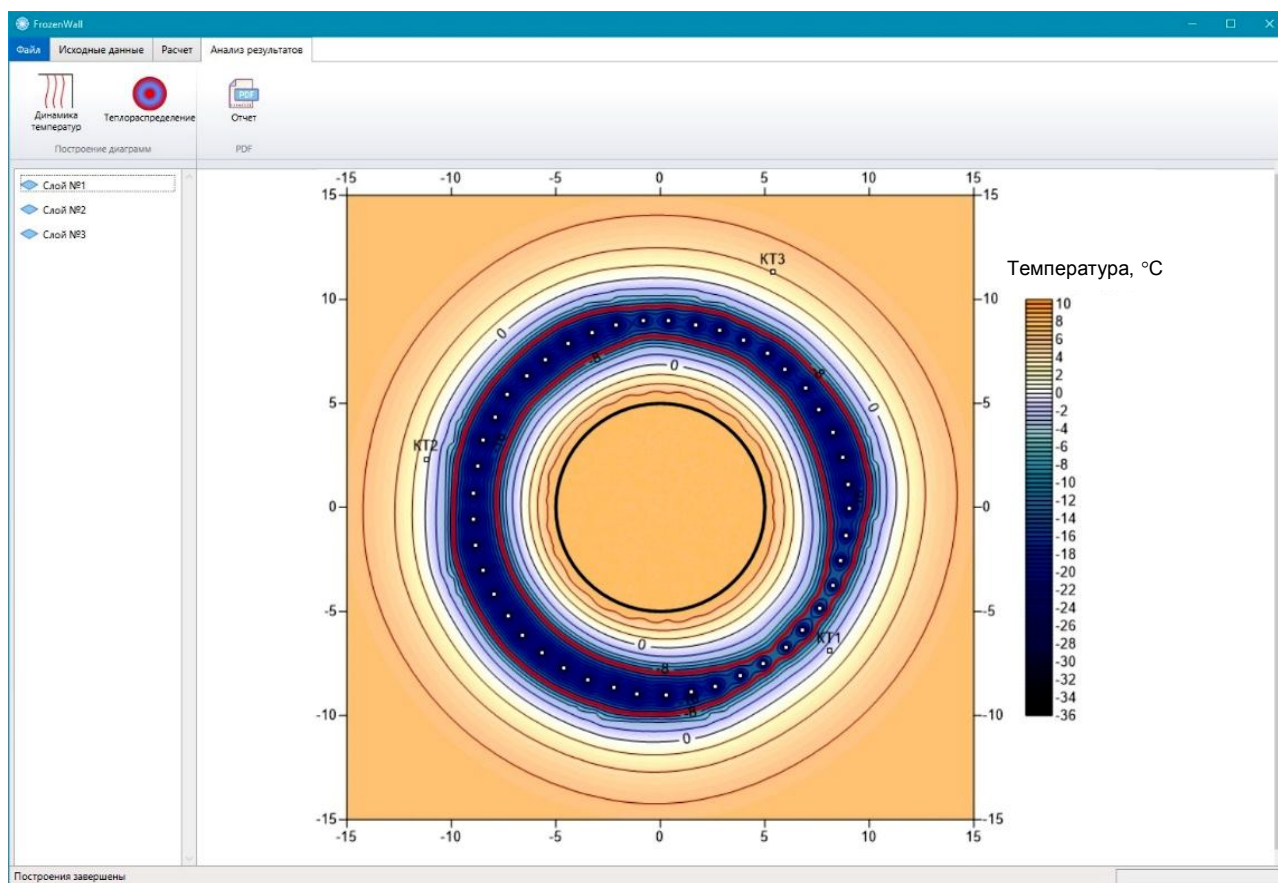


Рис.4. Рабочее окно информационно-аналитической системы Frozen Wall

Для формулировки обратной задачи необходимо переопределить прямую задачу (1)-(6) посредством введения экспериментально измеренных значений температуры  $T_i^{(c)}(t)$  в месте расположения  $(x_i, y_i)$  каждой контрольной скважины  $i$ :

$$T(t, x, y) = T_i^{(c)}(t) \quad \text{при } i = 1, \dots, N_C, \quad (7)$$

где  $N_C$  – количество контрольных скважин.

Под местом расположения контрольной скважины понимаются координаты  $(x_i, y_i)$  точки, в которой контрольная скважина пересекает срединный горизонтальный разрез исследуемого слоя горных пород.

Таким образом, решение коэффициентной обратной задачи Стефана в данном случае состоит в определении поля температур  $T(t, x, y)$  и значений теплофизических параметров массива, удовлетворяющих системе уравнений (1)-(7).

В данной работе вместо жесткого условия (7) рассматривался функционал рассогласований теоретических и экспериментально измеренных температур в контрольных скважинах:

$$I = \sum_{i=1}^{N_C} \int_0^{t_\Sigma} (T_i^{(e)} - T_i^{(m)})^2 dt, \quad (8)$$

где  $t_\Sigma$  – время заморозки, сут;  $T_i^{(m)}$  – модельная температура на  $i$ -й скважине, °C.

В этом случае решение обратной задачи Стефана заключается в минимизации функционала (8) с учетом условий (1)-(6). Параметры минимизации: теплопроводности  $\lambda_{fr}$  и  $\lambda_{th}$ , теплоемкости  $c_{fr}$  и  $c_{th}$  и влагосодержание  $w$ .



Численная минимизация функционала (8) осуществляется с помощью модифицированного метода градиентного спуска [15], включающего пропорционально-интегральное регулирование и представляющего собой итерационную процедуру. На каждой итерации численно решается прямая задача Стефана (1)-(6) для текущих значений параметров оптимизации, а также для их малых вариаций. Численное решение задачи (1)-(6) получается с помощью метода конечных разностей на регулярной неоднородной сетке со сгущением вблизи замораживающих колонок.

Численный алгоритм решения задачи (1)-(8) реализован в среде Visual Studio и включен в информационно-аналитическую систему Frozen Wall для обработки и визуализации процессов формирования и состояния ЛПО, разработанную в Горном институте УрО РАН (рис.4). Информационно-аналитическая система Frozen Wall является частью системы контроля формирования ледопородного ограждения (см. рис.2).

На основе рассчитанных температурных полей и проведенного комплексного анализа определяются прогнозные значения толщины ЛПО для строящихся стволов Петриковского горно-обогатительного комбината в ОАО «Беларуськалий».

**Заключение.** Предлагаемая система контроля формирования и состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов базируется на использовании технологии оптоволоконной термометрии. На основании сбора системой контроля данных экспериментальных измерений температуры в скважинах и параметров работы замораживающей станции разработан метод математической обработки и интерпретации результатов термометрии посредством решения прямой и обратной задач Стефана. В результате математический метод позволяет восстанавливать температурное поле во всем породном массиве по данным инженерно-геологических изысканий и уточнять его актуальное состояние по данным распределенных измерений температуры в контрольных скважинах.

Система контроля формирования ледопородного ограждения апробирована и внедрена при проходке шахтных стволов рудника Петриковского горно-обогатительного комбината в ОАО «Беларуськалий».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов П.В. Влияние пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения / П.В.Амосов, С.В.Лукичев, О.В.Наговицын // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 4 (27). С. 43-50.
2. Булычев Н.С. Расчет необходимых параметров ледопородного ограждения в замковой части / Н.С.Булычев, Д.С.Омаров, С.Б.Лукашин // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2012. Вып. 1, ч. 2. С. 54-60.
3. Гендлер С.Г. Обеспечение комплексной безопасности при освоении минерально-сырьевых и пространственных ресурсов недр // Горный журнал. 2014. № 5. С. 5-6.
4. Левин Л.Ю. Математический метод прогнозирования толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, О.С.Паршаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 5. С. 154-161.
5. Левин Л.Ю. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, А.В.Зайцев // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 3. С. 655-663.
6. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, О.С.Паршаков, Е.В.Колесов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. № 3. С. 255-267.
7. Новые технологические решения для тоннелей метрополитена в условиях мегаполиса / В.А.Маслак, К.П.Безродный, М.О.Лебедев, С.Г.Гендлер // Горный журнал. 2014. № 5. С. 57-60.
8. Паршаков О.С. Разработка способа контроля формирования и состояния ледопородного ограждения шахтных стволов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сб. науч. тр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2017. Вып. 15. С. 288-292.
9. Тарасов В.В. Обзор аварийных ситуаций, возникших на Верхнекамском калийном месторождении при проходке шахтных стволов / В.В.Тарасов, В.С.Пестрикова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 5. С. 23-29.
10. Трыняк Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. М.: Углетехиздат, 1954. 896 с.
11. Andersland O.B. An introduction to frozen ground engineering / O.B.Andersland, B.Ladanyi; Springer US. 1994. 352 p. ISBN 9781475722925
12. Gol'dman N. Inverse Stefan Problems. Springer Science & Business Media. 2012. 412 p.
13. Gilyazov S.F. Regularization of ill-posed problems by iteration methods / S.F.Gilyazov, N.L.Gol'dman; Kluwer Academic Publishers Group. Dordrecht, 2000. 350 p.
14. Hu J. Numerical Analysis of Temperature Field of Vertical Frozen Soil Wall Reinforcement at Shield Shaft / J.Hu, X.Wang, B.Jiang // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 918. P. 218-223.



15. *Kabanikhin S.I.* A gradient descent method for solving an inverse coefficient heat conduction problem / S.I.Kabanikhin, A.Hasanov, A.V.Penenko // Numerical Analysis and Applications. 2011. Vol. 1. Iss. 1. P. 34-45. DOI: 10.1134/S199542390
16. Modeling heat transfer between a freeze pipe and the surrounding ground during artificial ground freezing activities / M.Vitel, A.Rouabhi, M.Tijani, F.Guerin // Computers and Geotechnics. 2015. N 63. P. 99-111.
17. *Vyalov S.S.* Stability of mine workings in frozen soils / S.S.Vyalov, Yu.K.Zaretsky, S.E.Gorodetsky // Engineering Geology. 1979. Vol. 13. P. 339-351.
18. *Wang J.* Freezing large shaft design of about one kilometer deep / J.Wang, X.Liu, H.Chen // Journal of Glaciology and Geocryology. 2012. Vol. 34(6). P. 1358-1363.
19. *Zhang B.* Plastic Design Theory of Frozen Wall Thickness in an Ultradeep Soil Layer Considering Large Deformation Characteristics / B.Zhang, W.Yang, B.Wang // Mathematical Problems in Engineering. 2018. P. 1-10. DOI: 10.1155/2018/8513413

**Авторы:** **Л.Ю.Левин**, д-р техн. наук, заведующий отделом, *aerolog\_lev@mail.ru* (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия), **М.А.Семин**, канд. техн. наук, научный сотрудник, *mishkasemin@gmail.com* (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия), **О.С.Паршаков**, младший научный сотрудник, *olegparshakov@gmail.com* (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 08.08.2018.

Статья принята к публикации 11.01.2019.