

УДК 622.253.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЗАМОРАЖИВАЕМОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ, РЕАЛИЗОВАННОЙ В ПРОГРАММЕ FROZENWALL

Богомягов Александр Васильевич¹,
bavaerolog@gmail.com

Пугин Алексей Витальевич¹,
lyosha.p@gmail.com

¹ Горный институт УрО РАН,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а.

Актуальность исследований по разработке и численной реализации математических моделей тепломассопереноса в замораживаемых грунтах и породах в условиях строительства шахтных стволов обусловлена рядом технологических факторов и особенностей организации данного процесса. Корректный расчет искусственного замораживания пород для конкретных практических случаев оказывается невозможен без учета таких факторов, как переменный режим работы замораживающих колонок, наличие двух контуров замораживания, различная длина питающих труб замораживающих колонок, теплообмен с пространством шахтного ствола переменной глубины, образование каверн в объеме замороженных пород вследствие вывалов породы, тепловыделение от твердеющего цементного раствора, фильтрация поровых вод. Представляет интерес описание и анализ особенностей реализации данных факторов на примере модели тепломассопереноса, исполненной в специализированной программе FrozenWall, предназначенной для теплотехнического расчета замораживания пород и разработанной при участии авторов статьи.

Цель работы состоит в описании и анализе внесенных улучшений в модель и алгоритмы программного обеспечения FrozenWall в ходе проведения работ по контролю состояния ледопородного ограждения на строящихся вертикальных стволах калийных рудников.

Объектом исследования являются влажные горные породы, подверженные тепловому влиянию системы искусственного замораживания при строительстве вертикальных шахтных стволов.

Методы включали экспериментальное измерение температуры в контрольно-термических скважинах, обработку полученных данных, математическое моделирование процесса искусственного замораживания пород, параметризацию модели тепломассопереноса в породах по данным натурных наблюдений посредством решения обратной задачи Стефана.

Результаты. В ходе проведенной модернизации в программе FrozenWall были добавлены алгоритмы, учитывающие такие технологические факторы, как нестабильная работа замораживающих колонок, наличие двух контуров замораживания, различная длина питающих труб замораживающих колонок, теплообмен с пространством шахтного ствола в случае его затопления, образование каверн в объеме замороженных пород вследствие вывалов породы, тепловыделение от твердеющего цементного раствора в строящемся стволе, плоскопараллельная фильтрация поровых вод. Посредством программного учета этих факторов становится возможным разрабатывать новые технические мероприятия, нацеленные на повышение энергоэффективности и безопасности углубки шахтных стволов в обводненных горных породах, снижение вероятности возможных аварийных ситуаций.

Ключевые слова:

ледопородное ограждение, искусственное замораживание пород, шахтный ствол, калийный рудник, математическое моделирование, программное обеспечение.

Введение

На данный момент необходимой составляющей процесса строительства почти всех вертикальных стволов калийных рудников в обводненных грунтах и породных массивах является организация замораживания пород [1]. Процедура замораживания необходима для создания защитного ограждения из замороженных горных пород – ледопородного ограждения (ЛПО). Основными задачами ЛПО являются недопущение попадания подземных вод из водоносных слоев пород в строящуюся горную выработку, а также повышение прочности незакрепленных стенок горной выработки до возведения бетонной крепи.

Основными параметрами ЛПО, определяющими его эффективность, являются толщина и сплошность (в смысле отсутствия гидравлических «окон» по всему его периметру). Проходка шахтного ствола начинается

после достижения заданного значения толщины ЛПО, а информация о фактической его толщине в различные моменты времени обычно определяется в ходе проведения систематического термометрического контроля состояния замораживаемых пород [2–8]. Данный контроль основывается как на экспериментальных измерениях температуры в контрольно-термических (КТ) скважинах, так и на использовании этих данных для параметризации численной модели тепломассопереноса и последующего численного моделирования замораживания породного массива [9–16]. В результате выполнения моделирования на параметризованной модели определяется распределение температуры во всем породном массиве, подверженном тепловому воздействию системы искусственного замораживания, а исходя из анализа распределения температур становится возможным определить фактические параметры ЛПО – его толщину и сплошность.

На данный момент разработано множество программных пакетов для моделирования теплопереноса в различных средах и, в частности, в грунтах и породах. Наиболее известными из них являются ANSYS, Comsol, Plaxis, Frost 3D. Данные программные пакеты учитывают основные теплофизические и гидравлические процессы, происходящие при замораживании пород: диффузионный и конвективный перенос теплоты, фазовые переходы поровой влаги, теплообмен с рассолом в замораживающих колонках. В рамках такого моделирования обычно решается прямая задача, когда по известным исходным данным определяется поле температур в интересующем промежутке времени. Исходными данными в модели обычно являются теплофизические параметры пород, полученные из предварительных лабораторных тестов, а также проектные параметры системы замораживания, временные зависимости температуры и расхода рассола в колонках. Однако практический опыт показывает [17], что такой подход в большинстве случаев не позволяет получить достоверное распределение температуры в замораживаемых породах. Это выражается в том, что рассчитанные на модели распределения температур по глубине КТ скважин с течением времени начинают существенно расходиться с экспериментальными измерениями температуры в них. Для того чтобы уменьшить эти расхождения, необходимо проводить настройку (калибровку) параметров модели на предмет наилучшего соответствия модельных и измеренных температур в КТ скважинах. Одним из действенных способов настройки параметров модели является постановка обратной задачи Стефана (ОЗС), ее регуляризация и численное решение [17–19]. Суть этого подхода состоит в сведении ОЗС к задаче минимизации функционала рассогласования модельных и измеренных температур по глубине КТ скважин в различные моменты времени. Описанный подход реализован в программе FrozenWall [20, 21] и является ее отличительной особенностью. В целом же программа FrozenWall позволяет проводить моделирование теплопереноса в горном массиве с учетом дополнительных технологических факторов, проводить настройку теплофизических параметров пород для улучшения соответствия с данными экспериментальных измерений.

В процессе эксплуатации программы FrozenWall при мониторинге ряда строившихся и строящихся вертикальных стволов на калийных рудниках возникли задачи, связанные с необходимостью учета особенностей местной геологии, специфических технических решений и физических процессов. Это привело к необходимости разработки новых модулей и модернизации старых алгоритмов расчета. В связи с этим целью этой работы является описание и анализ внесенных улучшений в модель и алгоритмы программы FrozenWall. С научной точки зрения данная статья представляет интерес в плане рассмотрения различных технологических факторов, влияющих на процесс искусственного замораживания пород, а также особенностей их программного учета, особенностей алгоритмизации теплофизической задачи искусственного замораживания пород в целом.

Описание программы FrozenWall

Программа FrozenWall предназначена для моделирования процессов теплопереноса в породах при их искусственном замораживании применительно к задаче строительства шахтных стволов. Программа содержит в себе функционал, позволяющий считывать и проводить анализ экспериментально измеренных распределений температуры в КТ скважинах в рамках описанного выше подхода. Это, по сути, реализует контроль процесса искусственного замораживания пород. Кроме того, есть возможность автоматизированного построения графических отчетов, включающих информацию о состоянии замораживаемых пород. Программа включает в себя ряд инструментов для проведения прогноза эволюции температурного поля в породном массиве при его замораживании.

В основе расчетного модуля программы лежит модель диффузионного теплопереноса с учетом фазовых превращений поровой влаги. Она формулируется для срединного горизонтального разреза каждого слоя породного массива в отдельности. Система уравнений для модели отдельного слоя пород, записанная в декартовых координатах, имеет следующий вид [22]:

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right], \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_{lq}(1 - \phi_{ice}) + \lambda_{sd}\phi_{ice}, \quad (2)$$

$$H(T) = \begin{cases} \rho_{lq}c_{lq}(T - T_{p1}) + \rho_{lq}wL, & T_{p1} < T, \\ \rho_{lq}wL(1 - \phi_{ice}), & T_{p2} < T < T_{p1}, \\ \rho_{sd}c_{sd}(T - T_{p2}), & T < T_{p2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\left[\lambda \mathbf{n} \cdot \nabla T - \alpha(T_{fb} - T) \right]_{\Omega_{fb}} = 0, \quad (4)$$

$$T|_{\Omega_{out}} = T_0(h), \quad (5)$$

$$T|_{l=0} = T_0(h), \quad (6)$$

где H (Дж/м³) – удельная энтальпия влажного породного массива; t (с) – время; x, y (м) – декартовы координаты; $\lambda_{lq}, \lambda_{sd}$ (Вт/(м·°C)) – теплопроводности влажной породы в зонах охлаждения и льда соответственно; ϕ_{ice} – льдистость (объемная доля льда в порах); ρ_{lq}, ρ_{sd} (кг/м³) – плотности влажной породы соответственно в зонах охлаждения и льда; c_{lq}, c_{sd} (Дж/(кг·°C)) – удельные теплоемкости влажной породы в зонах охлаждения и льда соответственно; T_{p1}, T_{p2} (°C) – температуры ликвидуса и солидуса соответственно; w (кг/кг) – массовая влажность пород [23]; L (Дж/кг) – удельная теплота кристаллизации воды; \mathbf{n} (м) – единичный вектор, направленный вдоль нормали к границе Ω_{fb} ; α (Вт/(м²·°C)) – коэффициент теплообмена на границе породного массива с замораживающей колонкой; T_{fb} (°C) – температура стенок замораживающей колонки; $\Omega_{fb} = \cup \Omega_{fbi}$ – границы со всеми замораживающими колонками $i=1, \dots, N$; Ω_{out} – внешняя граница расчетного домена; T_0 (°C) – начальная температура породного массива, а также температура нетронутого породного массива на уда-

лении от контура замораживания; h (м) – средняя глубина (мощность) слоя горной породы.

Сформулированная выше прямая задача Стефана решается численно с использованием метода конечных разностей. При дискретизации исходных дифференциальных уравнений применяется центральная схема по пространству второго порядка точности и явная схема по времени первого порядка точности.

Далее при необходимости можно переопределить прямую задачу, добавив информацию об измеренных температурах в КТ скважинах – в этом смысле добавится условие в виде

$$T(t, r, \varphi) = T_i^{(c)}(t), \quad i = 1, \dots, N_c, \quad (7)$$

а задача (1)–(7) будет представлять собой обратную задачу Стефана. Здесь T_c – количество КТ скважин.

Мы используем метод регуляризации обратной задачи, когда жесткое условие (7) заменяется функционалом невязки – суммарной среднеквадратической разницы между измеренными и вычисленными температурами. А предложенный нами численный алгоритм, описанный в [17], позволяет минимизировать невязку измеренных и вычисленных температур замораживаемых пород посредством соответствующего подбора теплофизических свойств пород – теплопроводностей в зонах льда и охлаждения, а также влажности.

Рис. 1 демонстрирует основное рабочее окно FrozenWall. Здесь присутствует ряд тематических вкладок, позволяющих запускать команды для подгрузки исходных данных, создания теплофизической модели, проведения расчетов, анализа и обработки полученного численного решения.

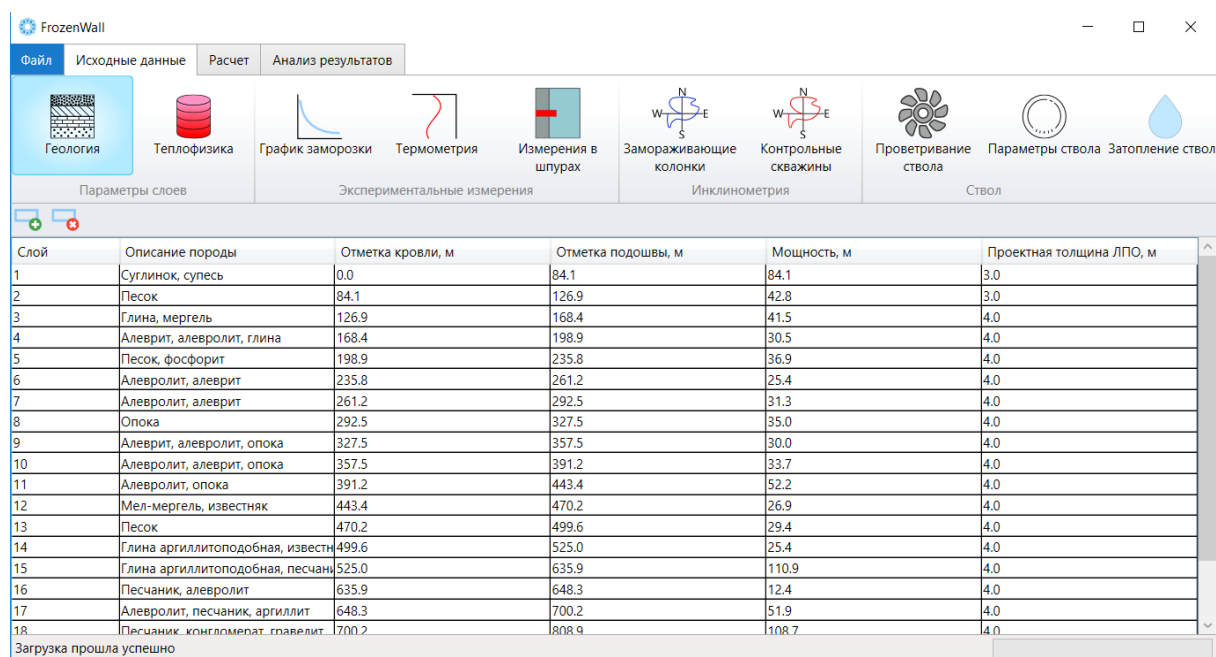


Рис. 1. Программа FrozenWall, главное окно

Fig. 1. Main window of program FrozenWall

Во вкладку «Исходные данные» включены команды для формирования геологической слоистой модели исследуемого участка породного массива, теплофизических параметров и прочих расчетных исходных данных в готовые таблицы, вкладка «Расчет» содержит функционал для проведения численных расчетов теплораспределения в замораживаемом породном массиве и выполнения настройки (калибровки) модельных параметров на основании данных измерений температуры на КТ скважинах. Вкладка «Анализ результатов» служит для графического отображения данных моделирования и построения отчетов о состоянии ЛПО в формате PDF.

Модернизация алгоритмов

В ходе проведения работ по мониторингу строящихся вертикальных шахтных стволов появлялась необходимость в добавлении различных уточняющих факторов в модели в зависимости от особенностей

местной геологии, технических решений и прочих условий, которые имели место при осуществлении нами мониторинга строительства новых стволов калейных рудников. Все это привело к написанию новых или модернизации существующих модулей программы.

Нестабильная работа замораживающих колонок

Первое, что необходимо было изменить, – добавить учет нестабильной работы замораживающих колонок. Первоначально в алгоритме расчета принималось, что расход хладоносителя в каждой из замораживающих колонок одинаков во всем контуре, т. е. общий расход в замораживающем контуре равномерно делился на количество колонок. Кроме того, температуры прямого и обратного потоков хладоносителя также были одинаковы для всего контура. На самом же деле часть колонок может работать со значительными отклонениями параметров от средних зна-

чений по всему контуру замораживания (рис. 2). В связи с этим в программу была добавлена возможность заносить детальный график работы замораживающей станции, а именно задавать параметры для каждой отдельно взятой замораживающей колонки на

определенный временной промежуток. При наличии колонок с нестандартным режимом работы программа автоматически перераспределяет общий расход теплоносителя по оставшимся колонкам с нормальным режимом работы.

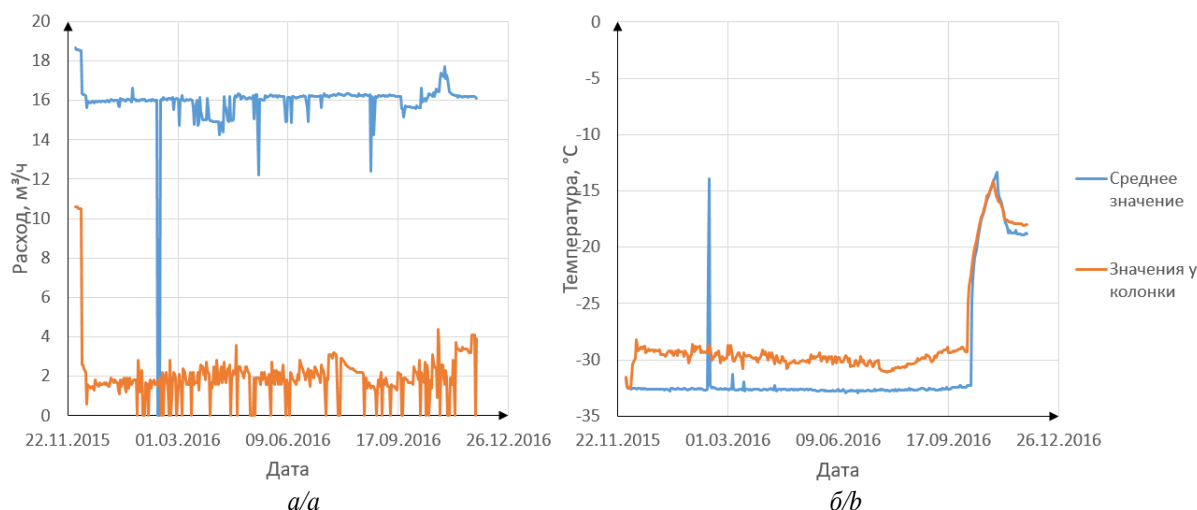


Рис. 2. Временные зависимости параметров хладоносителя (рассола) в замораживающих контурах: температура (а) и объемный расход (б)

Fig. 2. Time diagrams of the temperature (a) and flow rate (b) of the coolant in the freezing circuits

Второй контур замораживания

В ходе контроля состояния ЛПО на одном из калийных рудников возникла сложность с тем, что были пробурены дополнительные замораживающие колонки на скиповом и клетевом стволах (рис. 3). Такие дополнительные контуры из замораживающих колонок, как правило, имеют свои параметры замораживания, отличающиеся от главного контура. Для удобства занесения исходных данных в модели было добавлено разделение всех замораживающих колонок на отдельные контуры замораживания с индивидуальными параметрами работы.

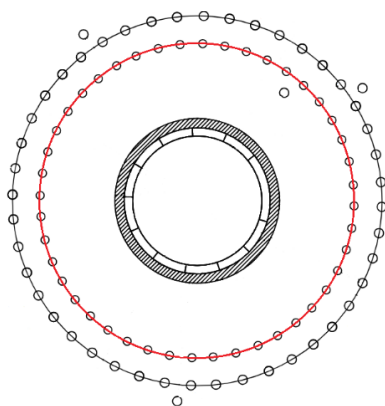


Рис. 3. Схема расположения двух контуров замораживания

Fig. 3. Layout of two freezing circuits

Геометрия конечно-разностной сетки

С опытом работы на первой версии программы FrozenWall было решено оптимизировать конечно-

разностную сетку для уменьшения времени проводимых расчетов и сохранения желаемой точности вычислений. Для этого было решено перейти от декартовой системы отсчета к полярной, вследствие чего преобразовалась и геометрия конечно-разностной сетки (рис. 4). Главным отличием новой геометрии расчетной сетки от старой является рациональное сгущение ячеек в необходимых для этого местах. Теперь вся расчетная область разделяется на кольца со своими геометрическими и теплофизическими параметрами.

Адаптивный алгоритм построения сетки

В дальнейшем вследствие появления второго контура замораживания и неравномерного распределения замораживающих колонок по массиву возникла проблема в чрезмерном увеличении расчетной области с высокой плотностью ячеек, что сказывалось на скорости проводимых расчетов. Это привело к написанию адаптивного алгоритма построения расчетной сетки. Сама расчетная сетка представляет собой сегментированную структуру, каждый сегмент – это кольцо, состоящее из ячеек со своими параметрами. В массиве, на удалении от замораживающих колонок, сетка имеет достаточно крупные ячейки для ускорения проведения вычислений, а вблизи, наоборот, более мелкие, т. к. в этих местах происходят наиболее быстротекущие процессы. При появлении второго контура замораживания зона с высокой концентрацией ячеек сильно возрастает, поэтому алгоритм формирования сетки был изменен таким образом, чтобы при достаточном удалении контуров друг от друга для каждого из них формировалось свое кольцо с высокой концентрацией ячеек, а между ними формировалась зона с низкой концентрацией ячеек для

ускорения проведения расчетов (рис. 5, б). Кроме того, в случае, когда замораживающие колонки распределены в массиве достаточно неравномерно (напри-

мер, контур представляет собой дугу), нет смысла увеличивать плотность ячеек в центральной области сегмента, поэтому сетка будет иметь постоянный шаг.

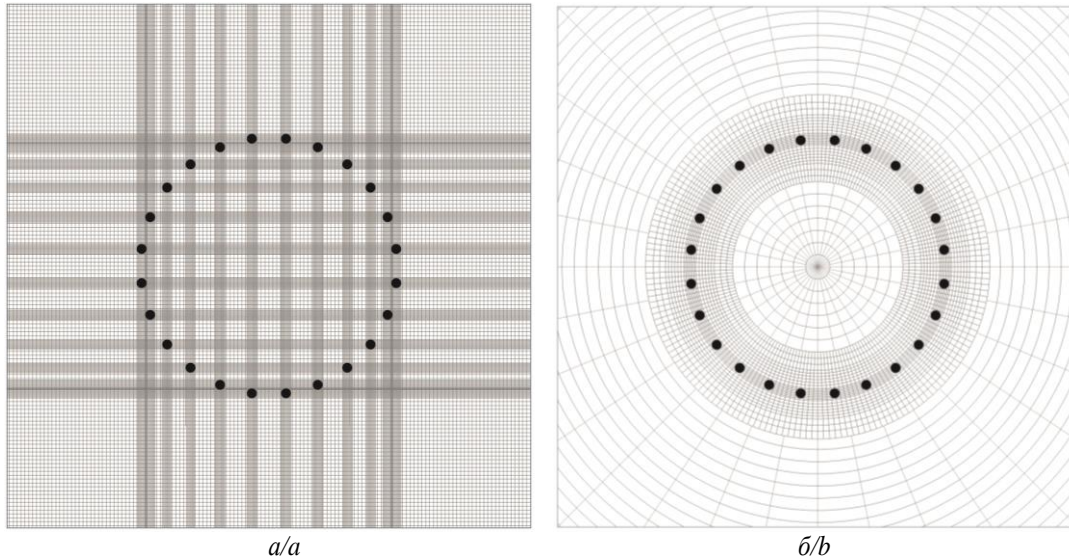


Рис. 4. Типы конечно-разностных сеток: а) декартова; б) полярная
Fig. 4. Types of finite difference grids: a) cartesian; b) polar

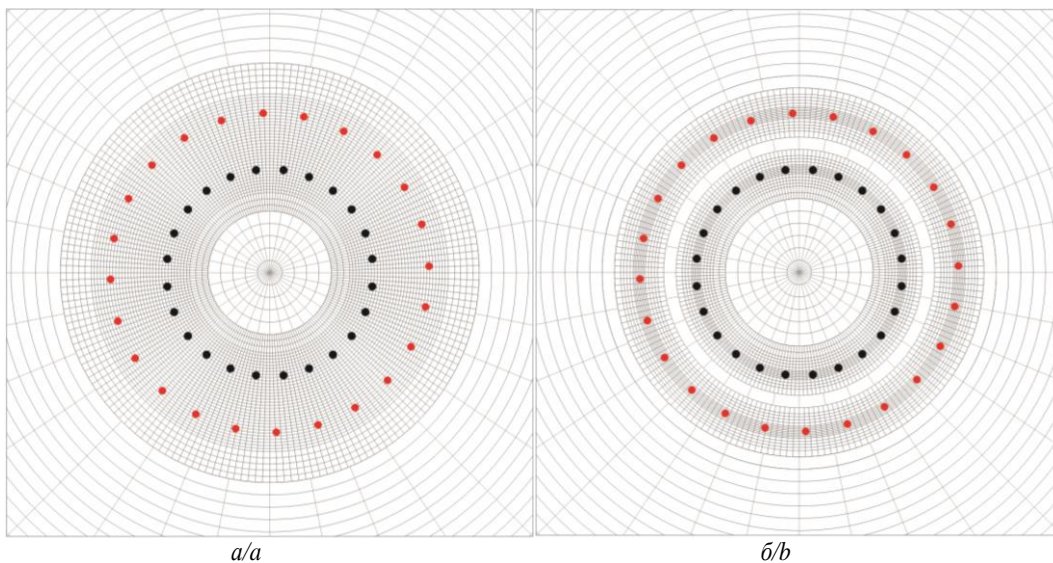


Рис. 5. Пример расчетной сетки в случае старого и нового адаптивного алгоритма: а) старый алгоритм; б) адаптивный алгоритм
Fig. 5. Example of a computational grid in the case of the old and new adaptive algorithms: a) old algorithm; b) adaptive algorithm

Различная длина питающих труб

Еще один важный момент, который был доработан в программе, связан с учетом различной длины питающих труб в замораживающих скважинах. Моделирование течения хладоносителя (тифоксита) в замораживающей колонке в окрестности выхода из нижнего отверстия питающей трубы показало, что его движение практически прекращается глубже 0,5 м от выхода питающей трубы, т. е. на расстоянии более 0,5 м от нижнего конца питающей трубы коэффициент теплоотдачи α в системе «массив – замораживающая

колонка» падает практически до нуля и колонка не забирает теплоту из массива. Промерзание горных пород ниже указанного уровня происходит только за счет вертикального теплообмена с вышележащими породами.

В наших моделях расчет температурного поля производится в срединном горизонтальном сечении слоя. Поэтому, если питающая труба не достигает этого слоя, соответствующая замораживающая колонка будет оказывать очень слабое влияние на поле температур. Уменьшение коэффициента теплоотдачи α на участке от 0 до 0,5 м ниже конца питающей тру-

бы происходит по закону, близкому к линейному. Для корректного учета данного фактора на основе линейной аппроксимации (рис. 6) в модель теплообмена массива с колонкой введен понижающий множитель k – декремент. Он регулирует коэффициент теплообмена α между теплоносителем и горным массивом.

$$k = \begin{cases} 1, & r \in (-\infty, 0], \\ 1 - 2r, & r \in (0; 0,5), \\ 0, & r \in [0,5, \infty) \end{cases}$$

$$\alpha'(r) = k\alpha.$$

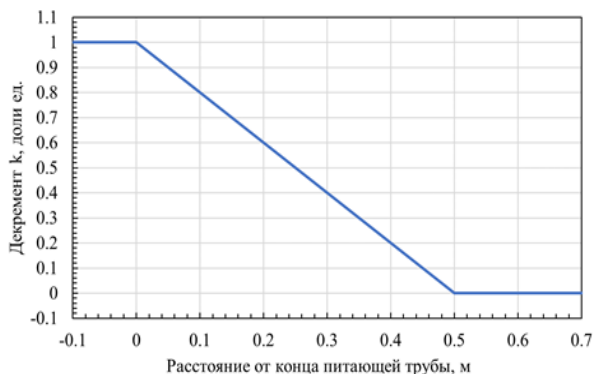


Рис. 6. Значение декремента в зависимости от положения конца питающей трубы в слое

Fig. 6. Decrement value depending on the position of the end of the supply pipe in the layer

Затопление шахтного ствола

Следующее нововведение – это учет полного или частичного затопления шахтного ствола. Потребность к моделированию такой ситуации возникла после неоднократного заполнения одного из стволов рудника водой. В программу был введен детальный график изменения параметров находящейся в стволе воды по аналогии с проветриванием. Для каждой даты задается отметка поверхности воды, ее температура вблизи поверхности и забоя ствола, в случае циркуляции – ее расход. Был реализован учет движения подогретой воды в стволе, в том числе и при ее раздельной подаче на разные отметки. Для каждой даты раздельной подачи воды указывается отметка подачи (низа трубы), температура воды вблизи этой отметки и подаваемый объем (расход). В данной программе режим движения воды принимается ламинарным, учет турбулентности не производится, поскольку отсутствует информация для корректного моделирования данного фактора. Скорость движения воды в стволе между отметкой подачи и поверхностью воды принимается постоянной и определяет коэффициент теплообмена воды с крепью. Температуры воды распределяются по линейной зависимости между отметками подачи и отбора. В случае подачи воды на несколько разных отметок участок затопления делится на сегменты, в каждом из которых движение воды учитывается по аналогичным правилам.

Для режима ламинарной смешанной конвекции размерный коэффициент теплоотдачи определяется по критериальной формуле М.А. Михеева [24]:

$$\alpha = \frac{0,15\lambda}{d} \text{Re}^{0,33} \text{Pr}^{0,33} \text{Ra}^{0,1}, \quad (8)$$

где λ – теплопроводность воды, Вт/(м·°С); d – диаметр ствола, м; Re – число Рейнольдса; Ra – число Рэлея; Pr – число Прандтля, которое для ламинарного потока воды с температурой, близкой к нулю, равно 13,5.

Формула (8) может быть переписана в более простом виде, если в нее подставить значения физических свойств воды:

$$\alpha = 50,4 \cdot A^{0,1} \cdot V^{0,33},$$

где A – температурный градиент для воды в стволе, °С/м; V – средняя скорость воды по сечению ствола, м/с.

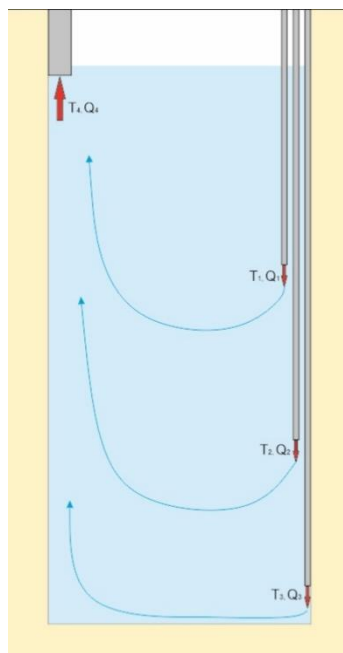


Рис. 7. Затопление шахтного ствола и циркуляция в нем подогретой воды

Fig. 7. Flooding of a mine shaft and circulation of heated water

Образование каверны

Еще одна трудность, которая возникла при прогнозировании эволюции ЛПО на стволе рудника, – это появление каверны в одном из слоев горных пород на глубинах 808,9–817,1 м. Появление каверны связано с проникновением подземных вод в строящийся шахтный ствол через несомкнутое ЛПО и вымыванием горных пород, через которые осуществлялась фильтрация вод в ствол. Указанная проблема была решена следующим образом. В программе добавлена возможность указывать координаты границы каверны, далее специальный алгоритм находит все узлы, входящие в данную область. В полученном сегменте можно задавать отличающиеся от окружающего массива теплофизические свойства и температуру. Это позволило смоделировать появление каверны и ее первоначальное состояние, например, заполнение водой, на рис. 8.

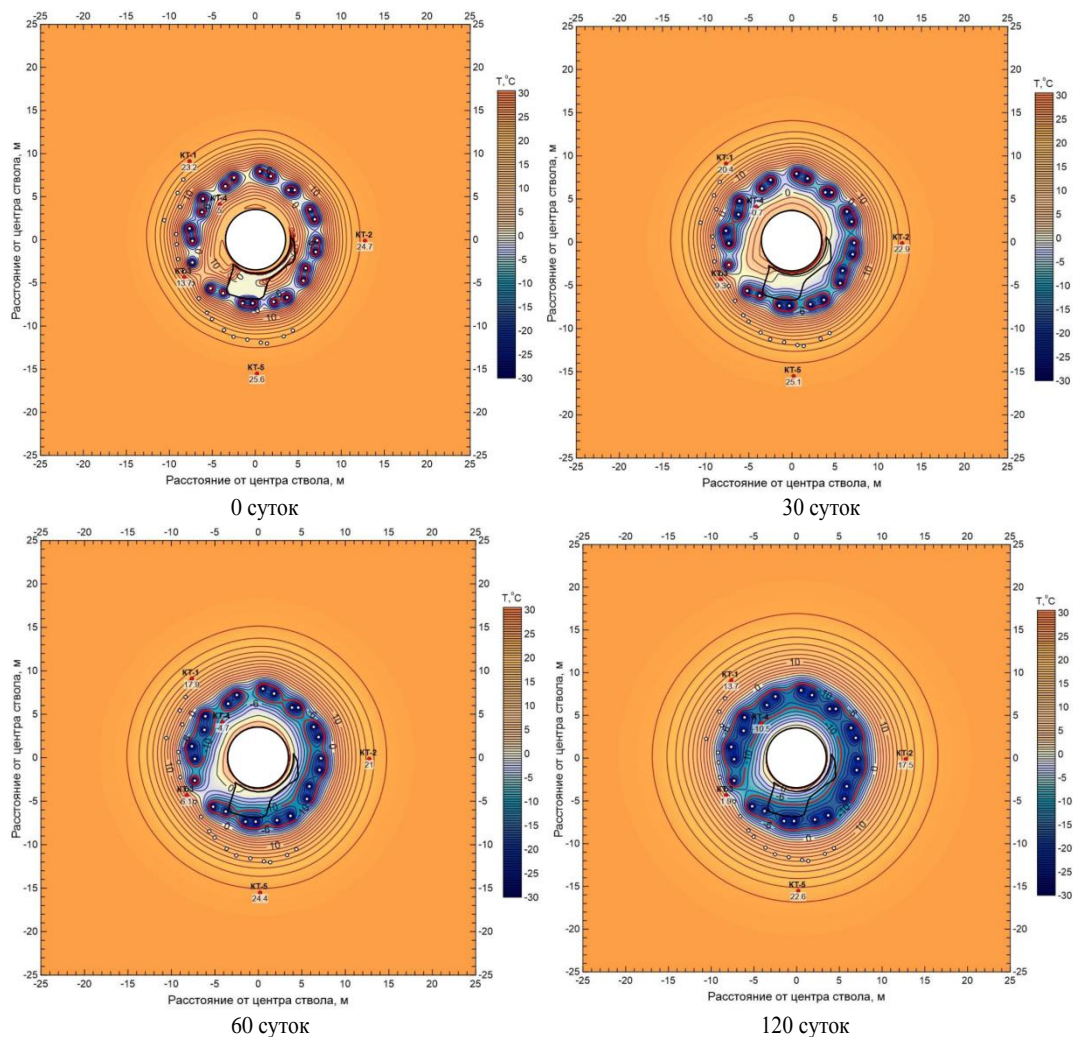


Рис. 8. Случай с каверной, заполненной водой (в начальный момент времени, спустя 30, 60 и 120 суток)
Fig. 8. Case with a cavity filled with water (at the initial moment of time, after 30, 60 and 120 days)

Заполнение ствола цементным раствором

Перед откачиванием воды со ствола рудника были проведены работы по созданию изоляционного слоя из арктического цемента для предотвращения поступления воды в ствол из низлежащего массива. Арктический цемент в составе бетона приводит к интенсивной экзотермической реакции, которая способна поддерживаться длительное время, отдавая тепло вовне, в данном случае – в воду, породу на забое и через крепь в замораживаемый массив. Напрямую учесть экзотермическую реакцию в модели невозможно, поскольку неизвестны точные параметры ее протекания (какое количество теплоты за какое время выделяется в результате химической реакции) и теплофизические свойства бетона. На местах контакта бетона с тубингами на данной отметке находились термометрические датчики. По показаниям одного из них был определен график температур, при помощи которого на контакте бетонной подушки и тубингов было задано граничное условие первого рода – равенство температур. Таким образом, путем задания температур на боковой стенке ствола может производиться учет пролонгированного источника теплоты в модели.

Влияние подземных вод

Последнее на данный момент существенное изменение в программе FrozenWall – это учет влияния движения подземных вод. Модернизация программного кода с внедрением алгоритма, позволяющего в упрощенном виде учитывать теплоперенос в массиве горных пород подземными водами, была вызвана наличием аномальных температурных зон в КТ скважинах на одном из стволов рудника республики Беларусь [25]. Расхождения температур в отдельных скважинах составляли более $\pm 1,0^\circ$. Чтобы учесть течение жидкости, уравнения (1)–(6) были дополнены уравнениями баланса массы и законом Дарси с соответствующими граничными условиями (в предположении, что течение поровой воды установившееся)

$$\nabla \cdot V = 0, \quad (9)$$

$$V = -\frac{K \cdot k_r}{\mu} \nabla p, \quad (10)$$

$$V|_{\Omega_{out}} = V_0,$$

$$V|_{\Omega_{fb}} = 0,$$

где V – вектор приведенной скорости (м/с); V_0 – вектор приведенной скорости в невозмущенных (естественных) условиях (м/с); k_r – относительная проницаемость; K – абсолютная водопроницаемость грунта (м²); μ – динамическая вязкость воды (Па·с); p – гидростатическое давление в поровом пространстве (Па).

Относительная проницаемость k_r принимается равной единице при $\varphi=0$ (отсутствие льда в порах) и равняется нулю при $\varphi=1$ (полностью промерзший массив), в других случаях считаем, что:

$$k_r = (1 - \varphi)^3.$$

В итоге уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} \pm \vec{V} \cdot \nabla H = \nabla \cdot (\lambda \nabla T).$$

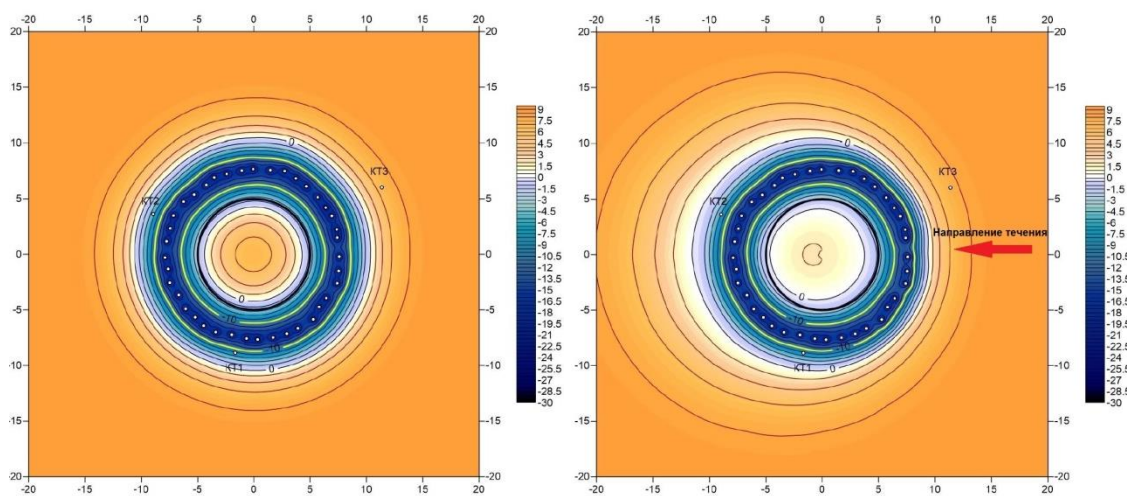


Рис. 9. Пример наличия фильтрационного течения
 Fig. 9. Example of the presence of a filtration flow

Заключение

Описанные в статье технологические факторы, способные повлиять на формирование ледопородного ограждения, алгоритмизированы в новой версии программы FrozenWall. В ряде случаев кратко описаны алгоритмические особенности учета этих факторов, приведены примеры расчетов распределения температур в программе, демонстрирующие роль данных факторов. Посредством программного учета этих факторов становится возможным разрабатывать новые технические мероприятия, нацеленные на повышение энергоэффективности и безопасности углубки шахтных стволов в обводненных горных породах, снижению вероятности возможных аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роменский А.А. Обоснование параметров проходнического цикла и ледопородного ограждения при строительстве вертикальных стволов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1983. – 227 с.
2. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. – М.: Минтрансстрой, 1978. – 117 с.

Расчет поля скоростей фильтрации в программе на сегодня осуществляется как наиболее общим способом, связанным с решением уравнений фильтрации Дарси (10) и закона баланса масс (9), так и разработанным нами упрощенным способом, основанным на подборе аналитических функций для задания поля скорости, исходя из численно рассчитанного поля температур. Последние подбираются исходя из суперпозиции потенциалов обтекания отдельных круговых цилиндров, сформированных замороженными породами, которые в дальнейшем соединяются в единый цилиндр.

На примере вышеуказанного рудника удалось согласовать вычисленные температуры с модельными с погрешностью, не превышающей $\pm 0,2^\circ$, и в дальнейшем поддерживать модель без увеличения рассогласований температур, что говорит о корректности данной оценки.

Программа прошла успешную апробацию [22, 25] при термометрическом мониторинге состояния ЛПО одиннадцати строящихся стволов калийных рудников ОАО «Беларуськалий» (Республика Беларусь), ИООО «Славкалий» (Республика Беларусь), ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» (Россия), ЗАО «Верхнекамская калийная компания» (Россия).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Пермского края в рамках соглашения № С-26/563, а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г. (рег. номер 122030100425-6).

3. ПБ 03-428-02 Правила безопасности при строительстве подземных сооружений, утв. постановлением Госгортехнадзора России 01.11.2001 г. № 49. – 167 с.
4. 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.
5. Thermal behavior in cross-passage construction during artificial ground freezing: case of Harbin Metro Line / Z. Li, J. Chen, M.

- Sugimoto, C. Mao // Journal of Cold Regions Engineering. – 2020. – V. 34. – № 3. – art. no. 05020002.
6. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata / Z. Yao, H. Cai, W. Xue, X. Wang, Z. Wang // AIP Advances. – 2019. – V. 9. – № 2. – P. 025209.
 7. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering. – 2013. – V. 166. – № 3. – P. 280–298.
 8. Modeling artificial ground freezing for construction of two tunnels of a metro station in Napoli (Italy) / A. Mauro, G. Normino, F. Cavuoto, P. Marotta, N. Massarotti // Energies. – 2020. – V. 13. – № 5. – art. no. en13051272. DOI: 10.3390/en13051272.9.
 9. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects / M.A. Alzoubi, M. Xu, F.P. Hassani, S. Poncet, A. Sasmito // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – V. 104. – art.no. 103534.
 10. Амосов П.В., Лукичев С.В., Наговицын О.В. Влияние пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 4 (27). – С. 43–50.
 11. Математическое моделирование искусственного замораживания грунтов / П.Н. Вабищевич, М.В. Васильева, В.Ф. Горнов, Н.В. Павлова // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – № 4. – С. 19–31.
 12. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Математический метод прогнозирования толщины ледопородного ограждения при проходке стволов. – Новосибирск: ФТПРПИ. – 2017. – № 5. – 382 с.
 13. Николаев П.В., Шуплик М.Н. Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 243–251.
 14. Хайден Т.В., Вегнер Б. Современная технология замораживания пород на примере двух объектов, находящихся на стадии строительства, состоящих из пяти вертикальных шахтных стволов // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 65–69.
 15. ESA's SEM challenge / P. Schmall, P. Brinckerhoff, K. Ott, P. Madsen // North American Tunneling Journal. – 2013. – V. 5. – P. 24–26.
 16. Sopko J. Coupled heat transfer and groundwater flow models for ground freezing // ASCE GeoFlorida. – 2017. – P. 719–729.
 17. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 1. – С. 172–184.
 18. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis / G. Russo, A. Corbo, F. Cavuoto, S. Autuori // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2015. – V. 50. – P. 226–238.
 19. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: The examples of Rome and Naples // Geological Society Engineering Geology Special Publication. – 2009. – V. 22. – № 1. – P. 215–240. DOI: 10.1144/EGSP22.18
 20. Применение программного комплекса «FrozenWall» для расчета искусственного замораживания пород / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Богомягков, О.С. Паршаков // Известия Тульского государственного университета. – 2019. – № 4. – С. 269–282.
 21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: № 2018666337. «FrozenWall». № 2018663501; заявл. 28.11.2018; опубл. 17.12.2018. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
 22. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: case study of Petrikov potash mine / L. Levin, I. Golovaty, A. Zaitsev, A. Pugin, M. Semin // Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research. – 2021. – V. 107. – art. no. 103685.
 23. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш. школа, 1973. – 448 с.
 24. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.; Л.: ГЭИ, 1956. – 390 с.
 25. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of temperature anomalies during thermal monitoring of frozen wall formation // Fluids. – 2021. – V. 6. – № 8. – Article no. 297.

Поступила: 11.08.2022 г.

Дата рецензирования: 26.09.2022 г.

Информация об авторах

Богомягков А.В., младший научный сотрудник лаборатории Математического моделирования горнотехнических процессов, Горный институт УрО РАН.

Пугин А.В., кандидат технических наук, научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН.

UDC 622.253.3

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS TRANSFER IN FROZEN SOILS IMPLEMENTED IN THE FROZENWALL PROGRAM

Alexander V. Bogomyagkov¹,
bavaerolog@gmail.com

Aleksey V. Pugin¹,
lyosha.p@gmail.com

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78-a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

The relevance of formulation and numerical implementation of heat and mass transfer model in frozen soils considering mine shaft construction is caused by a number of technological factors and features of artificial ground freezing procedure. Correct calculation of artificial ground freezing for specific practical cases is impossible without taking into account such factors as variable mode of operation of the freeze pipes, presence of two freezing contours, different lengths of the supply pipes of the freeze pipes, heat exchange with the space of the mine shaft of variable depth, formation of cavities in the volume of frozen soils due to soil fallout, heat generation from hardening cement mortar, pore water filtration. These factors are taken into account in the heat and mass transfer model implemented in the specialized program FrozenWall, designed for thermotechnical calculation of artificial ground freezing and developed with the participation of the authors of the paper.

The main aim of this work is to describe the improvements made to the algorithms of the FrozenWall software in the course of monitoring the state of the frozen wall on the vertical shafts of potash mines under construction.

The objects of study are frozen soils around the potash mine shafts under construction.

Methods included experimental temperature measurement in thermal control boreholes, data processing, mathematical modeling of artificial freezing of soils, parameterization of the heat transfer model in soils according to field observations by solving the inverse Stefan problem.

Results. In the course of the modernization in the FrozenWall program, the algorithms were added that take into account such technological factors as unstable operation of freeze pipes, presence of two freezing contours, different lengths of the supply pipes inside the freeze pipes, heat exchange with the shaft space, formation of cavities in the volume of frozen soils due to rock outbursts, heat release from hardening cement mortar in the shaft under construction, filtration of pore water. Taking into account these factors, it becomes possible to develop new technical measures aimed at ensuring the efficiency of the construction of mine shafts in difficult hydrogeological conditions and possible emergency situations.

Key words:

frozen wall, artificial ground freezing, mine shaft, potash mine, mathematical modeling, software.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Perm Kray within the agreement no. C-26/563, and under support of the Ministry of Science and Higher Education of the RF within the agreement on State task no. 075-03-2021-374, 29 December 2020 (no. 122030100425-6).

REFERENCES

- Romenskiy A.A. *Obosnovanie parametrov prokhnodnicheskogo tsikla i ledoporodnogo ograzhdeniya pri stroitelstve vertikalnykh stvolov*. Dis. Kand. nauk [Substantiation of the parameters of the tunneling cycle and ice wall barrier during the construction of vertical shafts. Cand. Diss.]. Moscow, 1983. 227 p.
- VSN 189-78. *Instruktsiya po proektirovaniyu i proizvodstvu rabot po iskusstvennomu zamorazhivaniyu gruntov pri stroitelstve metropolitenov i tonneley* [Instructions for the design and production of works on artificial freezing of soils during the construction of subways and tunnels]. Moscow, Mintransstroy Publ., 1978. 117 p.
- PB 03-428-02 *Pravila bezopasnosti pri stroitelstve podzemnykh sooruzheniy, utv. postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii 01.11.2001* [Safety rules for the construction of underground structures, approved by the resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia 01.11.2001]. no 49. 167 p.
- SP 103.13330.2012 *Zashchita gornyykh vyrabotok ot podzemnykh i poverkhnostnykh vod, utv. prikazom Ministerstva regionalnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii (Minregion Rossii) 30.06.2012* [Protection of mine workings from underground and surface waters, approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) on 30.06.2012]. 68 p.
- Li Z., Chen J., Sugimoto M., Mao C. Thermal behavior in cross-passage construction during artificial ground freezing: case of Harbin metro line. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2020, vol. 34, no. 3, art. no. 05020002.
- Yao Z., Cai H., Xue W., Wang X., Wang Z. Numerical simulation and measurement analysis of the temperature field of artificial freezing shaft sinking in Cretaceous strata. *AIP Advances*, 2019, vol. 9, no. 2, art. no. 025209.
- Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 166, no. 3, pp. 280–298.
- Mauro A., Normino G., Cavuoto F., Marotta P., Massarotti N. Modeling artificial ground freezing for construction of two tunnels of a metro station in Napoli (Italy). *Energies*, 2020, vol. 13, no. 5, art. no. en13051272. DOI: 10.3390/en13051272.
- Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 104, art. no. 103534.
- Amosov P.V., Lukichev S.V., Nagovicyn O.V. Influence of rock massif porosity and coolant's temperature on velocity of solid ice wall creation. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 27, no 4, pp. 43–50. In Rus.
- Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Gornov V.F., Pavlova N.V. Mathematical modeling of the artificial freezing of soils. *Computational Technologies*, 2014, vol. 19, no. 4, pp. 19–31. In Rus.
- 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, no. 5, pp. 938–944.

13. Nikolaev P.V., Shuplik M.N. Mathematical modeling of artificial ground freezing with using solid carbon dioxide. *Mining informational and analytical bulletin*, 2015, no. 11, pp. 243–251. In Rus.
14. Heyden T.V., Vegner B. Modern shaft freezing technology implemented in two big shaft sinking projects with total 5 surface mine shafts are being constructed. *Mining journal*, 2014, no. 9, pp. 65–69. In Rus.
15. Schmall P., Brinckerhoff P., Ott K., Madsen P. ESA's SEM challenge. *North American Tunneling Journal*, 2013, no. 5, pp. 24–26.
16. Sopko J. Coupled heat transfer and groundwater flow models for ground freezing. *ASCE GeoFlorida*, 2017, pp. 719–729.
17. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Adjustment of thermophysical rock mass properties in modeling frozen wall formation in mine shafts under construction. *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, pp. 157–168. DOI: 10.1134/S1062739119015419
18. Russo G., Corbo A., Cavuoto F., Autuori S. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 50, pp. 226–238.
19. Viggiani G.M.B., de Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples. *Geological Society Engineering Geology Special Publication*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. 215–240. DOI: 10.1144/EGSP22.18
20. Levin L.Yu., Semin M.A., Bogomyagkov A.V., Parshakov O.S. The application of «Frozen Wall» software in simulation of artificial ground freezing. *Proceedings of the Tula States University-sciences of Earth*, 2019, no. 4, pp. 269–282. In Rus.
21. Bogomyagkov A.V., Zaitsev A.V., Klyukin Yu.A., Levin L.Yu., Parshakov O.S., Pugin A.V., Semin M.A. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM: № 2018666337. «FrozenWall»*, no. 20186663501, 2018.
22. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: case study of Petrikov potash mine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, vol. 107, art. no. 103685.
23. Tsytoovich N.A. *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 448 p.
24. Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, Leningrad, GEI Publ., 1956. 390 p.
25. Semin M., Golovaty I., Pugin A. Analysis of temperature anomalies during thermal monitoring of frozen wall formation. *Fluids*, 2021, vol. 6, no. 8, art. no. 297.

Received: 11 August 2022.

Reviewed: 26 September 2022.

Information about the authors

Alexander V. Bogomyagkov, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Aleksey V. Pugin, Cand. Sc., researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.