

## ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.253.3

### ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ЗАМОРАЖИВАЮЩИХ КОЛОНОК ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

**М. А. Семин, Л. Ю. Левин, О. С. Паршаков**

*Горный институт УрО РАН,  
E-mail: seminma@outlook.com, ул. Сибирская, 78а, 614111, г. Пермь, Россия*

Проанализирован процесс искусственного замораживания влагонасыщенного породного массива при строительстве шахтных стволов. Рассмотрен упрощенный случай единственной замораживающей колонки. Исследованы стадии активного и пассивного замораживания. Поддержание постоянной толщины ледопородного ограждения на стадии пассивного замораживания осуществлено с помощью имитационной модели регулятора температуры хладонносителя. Проведено многопараметрическое численное моделирование замораживания породного массива, определены зависимости температуры хладонносителя от времени на стадии пассивного замораживания. Выявлено, что для поддержания постоянной толщины ледопородного ограждения на стадии пассивного замораживания температура хладонносителя должна монотонно возрастать с течением времени по степенному закону с показателем степени около  $-0.2$ . Выбор значения температуры хладонносителя в фазе активного замораживания практически не влияет на суммарную энергоэффективность системы замораживания.

*Ледопородное ограждение, шахтный ствол, искусственное замораживание пород, пассивное замораживание, энергоэффективность, численное моделирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200522

Искусственное замораживание породного массива — широко распространенный в нашей стране и мире способ проходки шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях [1, 2]. Суть способа заключается в формировании вокруг шахтного ствола ледопородного ограждения (ЛПО), которое воспринимает на себя горное и гидростатическое давление от окружающего влагонасыщенного массива горных пород, защищает ствол от затопления при его проходке. Дополнительной функцией ЛПО является укрепление незакрепленных стенок шахтного ствола в период до возведения временной крепи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-11-01204).

Искусственное замораживание породного массива включает в себя три стадии [1]:

- образование ЛПО до начала проходки ствола (активное замораживание);
- поддержание ЛПО в проектных параметрах в период проходки (пассивное замораживание);
- оттаивание замороженных пород после возведения постоянной крепи.

Стадия активного замораживания продолжается до тех пор, пока не сформировано ЛПО требуемой (проектной) толщины и сплошности [3]. Далее происходит переход ко второй стадии (пассивному замораживанию), цель которой — поддержание постоянного значения толщины ЛПО, равного проектному (иногда с некоторым запасом). На этой стадии проводится уменьшение холодопроизводительности замораживающего комплекса до уровня, способного скомпенсировать внешние (земные) теплопритоки к ЛПО, минимизируя возможный рост толщины ЛПО [4]. Уменьшение холодопроизводительности достигается за счет повышения температуры или понижения расхода хладоносителя, циркулирующего в замораживающих колонках. Новые значения температуры и расхода хладоносителя постоянны в течение всей стадии пассивного замораживания (рис. 1).

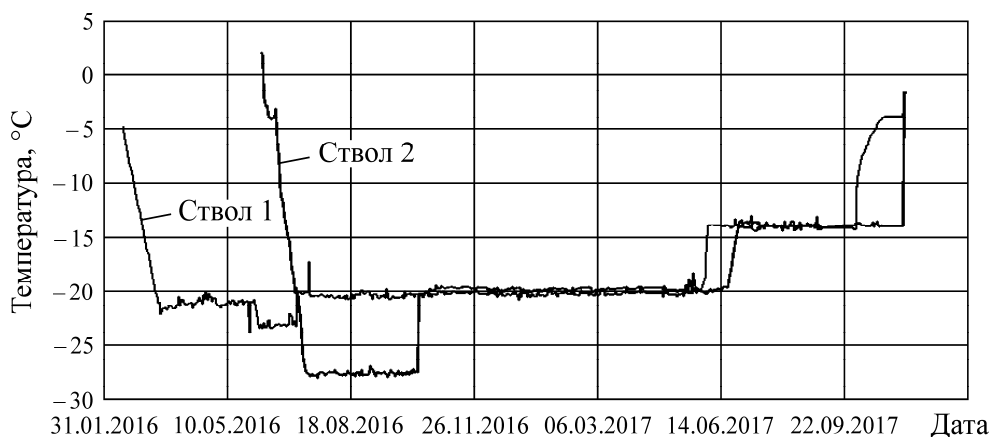


Рис. 1. Фактическая динамика температуры хладоносителя, поступающего в замораживающие колонки, на стадиях активного и пассивного замораживания при строительстве стволов калийного рудника Петриковского ГОКа

Температура хладоносителя, поступающего в замораживающие колонки, поддерживается приблизительно постоянной в течение длительных промежутков времени за счет возможности управления холодильной мощностью системы замораживания.

Постоянные температура и расход хладоносителя чаще всего не способны обеспечить неизменными положения внутренней и внешней границ ЛПО. Данный вывод следует из того факта, что земные теплопритоки к границе ЛПО являются сложной нелинейной функцией времени [5]. В результате происходит существенное перемораживание породного массива до толщин ЛПО, в разы превышающих проектные, либо частичное размораживание породного массива и уменьшение толщин ЛПО ниже проектных. Последнее недопустимо, поскольку может произойти разрушение сплошности и герметичности ЛПО с последующим затоплением строящегося ствола.

Перемораживание породного массива приводит к дополнительным финансовым затратам на работу замораживающей станции. Однако в ряде практических ситуаций при проходке шахтных стволов на стадии пассивного замораживания бывает целесообразно перемораживать породный массив. Такое применяется при механизированном способе проходки ствола. Данный

способ используется при проходке стволов круглого сечения в необводненных породах крепостью до четырех единиц по шкале Протодяконова [6]. При этом скорость проходки ствола в мерзлых породах существенно выше, чем в охлажденных влагонасыщенных породах, что связано с меньшими трудоемкостями процедур выемки и погрузки отбитой мерзлой породы.

Перемораживание породного массива также оказывается эффективно при гидроизоляции строящихся шахтных стволов с использованием кейлькранцев. Данная технология широко применяется на калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей [7]. Кейлькранцы обеспечивают надежную гидроизоляцию в том случае, если деревянный замок (уплотнение) выполнен в плотной водонепроницаемой породе [8]. Одно из условий их герметичности — отсутствие влаги в зоне пикотажного уплотнения. Это условие достигается, когда поверхность стенок строящегося ствола представляет собой замороженную породу. Во всех остальных случаях перемораживание породного массива на стадии пассивного замораживания нецелесообразно, и возникает задача поддержания проектной толщины ЛПО на стадии пассивного замораживания.

В литературе, посвященной способу искусственного замораживания пород и грунтов при строительстве подземных сооружений, представлено мало сведений о том, как обеспечить сохранение проектной толщины ЛПО на стадии пассивного замораживания. В [1] говорится, что на стадии пассивного замораживания теплоотдача от массива к замораживающим колонкам должна составлять около 50 % от случая активного замораживания. Этого должно быть достаточно для поддержания ЛПО в проектных параметрах. Если контроль за состоянием ЛПО показывает, что граница фазового перехода “вода – лед” продолжает продвигаться вглубь незамерзшего массива, предусматриваются дополнительные мероприятия по снижению коэффициента теплопередачи.

Выбор того или иного способа должен базироваться на экономических сопоставлениях и в зависимости от наличия холодильного оборудования [3]. В качестве одного из возможных вариантов предлагается принять холодопроизводительность замораживающей станции равной теплопритоку к ЛПО к концу периода активного замораживания. В этом случае холодопроизводительность будет избыточной и приведет к перемораживанию породного массива.

Анализ литературы показал, что вопрос управления холодильной мощностью на стадии пассивного замораживания с целью поддержания проектных параметров ЛПО и недопущения перемораживания породного массива является не до конца изученным [1, 3, 4]. Необходимо дополнительно исследовать временные зависимости параметров хладоносителя (температура, расход, холодильная мощность) на стадии пассивного замораживания, обеспечивающие поддержание постоянной толщины ЛПО. Также необходимо проанализировать зависимости параметров хладоносителя на стадии пассивного замораживания от его параметров на стадии активного замораживания, от теплофизических свойств замораживаемой среды и др.

Цель настоящей работы — определение режима работы замораживающей станции на стадии пассивного замораживания, обеспечивающего поддержание постоянной толщины ЛПО для отдельно взятого слоя породного массива с однородными теплофизическими свойствами. Исследование проведено путем анализа результатов, полученных при расчете для упрощенной математической модели замораживаемого породного массива. Поддержание постоянной толщины ЛПО осуществляется с помощью имитационной модели регулятора температуры хладоносителя в замораживающей колонке. Термин регулятор здесь используется с точки зрения классической теории автоматического управления и подразумевает под собой устройство, которое следит за состоянием ЛПО и вырабатывает управляющие воздействия для системы замораживания по уменьшению или увеличению температуры хладоносителя [9].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается расчетная область породного массива в виде полого цилиндра (рис. 2). Внутренняя стенка цилиндра соответствует контакту с замораживающей скважиной, внешняя — непотревоженному породному массиву. Внутри породного массива имеется контур радиусом  $R$ , разделяющий зону льда I и зону охлаждения II.

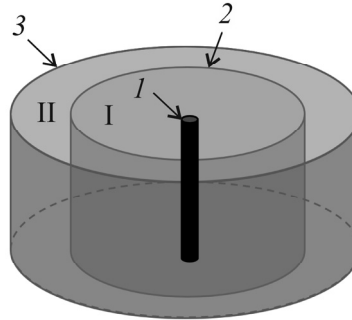


Рис. 2. Геометрия расчетной области: 1 — замораживающая колонка; 2 — граница фазового перехода поровой воды; 3 — внешняя стенка цилиндра (непотревоженный массив); I и II — зоны льда и охлаждения соответственно

Принимается гипотеза об осевой и угловой симметрии рассматриваемой геометрии, начальных и граничных условий, однородности и изотропности физических свойств исследуемого обводненного породного массива. Это позволяет свести трехмерную задачу к одномерной и исследовать зависимость температуры массива от единственной пространственной координаты — радиальной координаты  $r$ . Одномерная задача Стефана в этом случае задается системой уравнений, записанной в энтальпийном виде [10]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_s^\phi \lambda_l^{1-\phi}, \quad (2)$$

$$H = \begin{cases} \rho c_l T + \rho w L, & T \geq T_{liq}, \\ \rho w L (T - T_{sol}) / (T_{liq} - T_{sol}), & T_{liq} > T \geq T_{sol}, \\ \rho c_s T, & T < T_{sol}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi = \begin{cases} 0, & T \geq T_{liq}, \\ 1 - (T - T_{sol}) / (T_{liq} - T_{sol}), & T_{liq} > T \geq T_{sol}, \\ 1, & T < T_{sol}, \end{cases} \quad (4)$$

$$r = R_w : \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha [T_{fr}(t) - T], \quad (5)$$

$$r = R_v : T = T_0, \quad (6)$$

$$t = 0 : T = T_0, \quad (7)$$

где  $H$  — удельная энтальпия обводненного породного массива, Дж/м<sup>3</sup>;  $\lambda_s, \lambda_l$  — теплопроводность породного массива в зоне льда и зоне охлаждения, Вт/(м·°C);  $c_s, c_l$  — удельная теплоемкость в зоне льда и зоне охлаждения, Дж/(кг·°C);  $\rho$  — плотность породного массива, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{liq}$  — температура ликвидуса (начала кристаллизации поровой воды), °C;  $T_{sol}$  — температура солидуса (полной кристаллизации поровой воды), °C;  $L$  — удельная теплота кристаллизации поровой воды, Дж/кг;  $w$  — массовое содержание поровых вод во влажном массиве, кг/кг;  $\phi$  — объемная доля льда в поровом пространстве массива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $R_w$  — радиус замораживающей скважины, м;  $R_v$  — внешняя граница расчетной области, м;  $T_{fr}(t)$  — температура хладоносителя в замораживающей скважине, °C;  $T_0$  — температура непо потревоженного породного массива на удалении от скважины, °C;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на границе замораживающей скважины, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Поровая вода считается неподвижной. Ее фазовое превращение происходит в диапазоне температур  $[T_{sol}; T_{liq}]$ . При температуре  $T_{liq}$  объемная доля льда в поровом пространстве массива равна нулю, при  $T_{sol}$  — единице. Породный массив считается полностью влагонасыщенным.

Коэффициент теплоотдачи в (5) рассчитывается по формуле из [4] для ламинарного режима течения хладоносителя, применимой при  $Re < 2100$ :

$$\alpha = 12.9 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{Ud}{a} \right)^{0.23} \left( \frac{l}{d} \right)^{-0.5}, \quad (8)$$

$\lambda$  — теплопроводность хладоносителя, Вт/(м·°C);  $d$  — разница между внешним и внутренним диаметрами коаксиальной трубы, м;  $l$  — длина трубы, м;  $U$  — средняя по сечению трубы скорость хладоносителя, м/с;  $a$  — коэффициент температуропроводности хладоносителя, м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент 12.9 в (8) несколько отличается от аналогичного коэффициента в [4] ввиду различных размерностей физических величин. В настоящей работе используются размерности физических величин в системе СИ.

Рассматривался рассол хлористого кальция (25 %) при скорости течения 0.1 м/с ( $Re \approx 400$ ). При расчете коэффициента теплоотдачи не учитывалось термическое сопротивление металлической стенки замораживающей колонки. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  физически характеризует перенос теплоты через тонкий температурный пограничный слой вблизи стенки колонки. При этом температура  $T_{fr}(t)$  в (5) представляет собой среднюю температуру хладоносителя по поперечному сечению внешней проточной области колонки.

В случае одной замораживающей скважины говорить о формировании ЛПО не совсем уместно, поскольку замороженный массив вокруг единственной скважины не может являться защитным ограждением для строящегося шахтного ствола. Тем не менее иногда будем пользоваться термином полутолщина ЛПО, понимая под ней положение (радиальную координату) фронта фазового перехода (далее  $R(t)$ ).

В момент времени, когда фактическое положение фронта фазового перехода (ФФП)  $R(t)$  достигает своего проектного (требуемого) значения  $R_{req}$ , происходит повышение температуры хладоносителя  $T_{fr}(t)$ , фигурирующей в граничном условии (5). Динамика температуры хладоносителя  $T_{fr}(t)$  в этой фазе замораживания рассчитывается из следующего дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dT(t)}{dt} = a |T_{fr}^{\min}| [R(t) - R_{req}], \quad (9)$$

где  $R_{req}$  — требуемое положение ФФП, м;  $R(t)$  — текущее положение ФФП, м;  $a$  — коэффициент интенсивности регулирования;  $T_{fr}^{\min}$  — минимальная температура замораживания (температура хладоносителя на стадии активного замораживания), °С.

По сути, дифференциальное уравнение (8) реализует пропорциональное регулирование температуры  $T_{fr}(t)$  по рассогласованию положений ФФП (полутолщин ЛПО). В работе используется относительно простое пропорциональное регулирование без интегрального и дифференциально звеньев, так как для целей настоящей работы этого оказывается достаточно. Из (9) видно, что интенсивность регулирования зависит не только от ошибки  $R(t) - R_{req}$ , но также и от абсолютной минимальной температуры хладоносителя  $T_{fr}^{\min}$ .

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Система уравнений (1)–(8) дискретизована с помощью метода конечных разностей. Для дискретизации использована явная схема с разностями вперед по времени и центральными разностями по пространству [11], имеющая первый порядок точности по времени и второй порядок точности по пространству. Решение строилось на регулярной неоднородной сетке со сгущением вблизи замораживающей скважины. Численный алгоритм реализован в среде Visual Studio на языке программирования C#.

Основные численные параметры, использованные при расчете задачи замораживания породного массива:

Радиус колонки, м	0.073
Радиус расчетной области, м	25
Плотность породного массива, кг/м <sup>3</sup>	2450
Теплоемкость массива в зоне льда, Дж/(кг·°С)	775
Теплоемкость массива в зоне охлаждения, Дж/(кг·°С)	868
Теплопроводность массива в зоне льда, Вт/(м·°С)	4
Теплопроводность массива в зоне охлаждения, Вт/(м·°С)	3.30
Содержание поровой воды, кг/кг	0.04
Температура, °С	
непотревоженного массива	7.30
начала кристаллизации поровой воды	–0.16
конца кристаллизации поровой воды	–1.16
прочного ЛПО	–2.00
Коэффициент теплоотдачи на границе замораживающей колонки, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	45
Время моделирования, сут	300
Проектное значение полутолщины ЛПО (радиуса фронта фазового перехода), м	1

Теплофизические свойства породного массива соответствуют слою песка для условий промплощадки калийного рудника Петриковского ГОКа [12]. Температура хладоносителя — варьируемый параметр задачи. Предполагалось, что на стадии активного замораживания температура хладоносителя постоянна и равна своему начальному значению. Исследовались начальные значения температуры хладоносителя от –20 до –40 °С с шагом 5 °С.

На рис. 3 показаны временные зависимости радиуса фронта фазового перехода поровой воды и мощности теплового потока на границе замораживающей колонки для различных начальных температур хладоносителя. После того как радиус ФФП достигает 1 м, происходит переключение на стадию поддержания его фиксированного значения. Вследствие определенной инерционности процессов теплопроводности в породном массиве, отклик радиуса ФФП на изменившееся значение температуры хладоносителя происходит не сразу. Вследствие этого какое-то время радиус ФФП продолжает расти. В дальнейшем отмечается уменьшение радиуса ФФП и его быстро затухающие колебания около значения 1 м. Такая временная динамика обусловлена особенностями пропорционального регулирования (9) в физических системах, которым присуща инерционность при реагировании на управляющие воздействия. Данный колебательный процесс может быть уменьшен как по амплитуде, так и по длительности путем добавления интегральных и дифференциальных звеньев [13], однако это не представляет интерес для настоящего исследования.

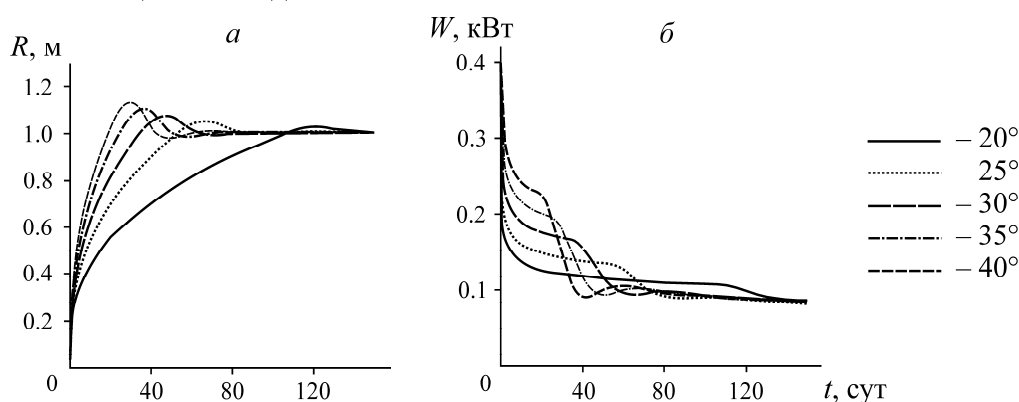


Рис. 3. Временная динамика радиуса фронта фазового перехода (а) и интегральной мощности теплового потока на границе замораживающей колонки (б) при различных начальных температурах хладоносителя

Мощность теплового потока на всей поверхности замораживающей колонки рассчитывалась по формуле

$$W(t) = \alpha Ph [T_{fr}(t) - T(t)], \quad (10)$$

где  $h = 1$  м — единичная высота рассматриваемого слоя пород;  $P$  — периметр замораживающей колонки, м.

Изменение мощности связано с уменьшением теплового градиента на границе с замораживающей колонкой со временем, а также с ростом температуры хладоносителя при переходе на стадию пассивного замораживания. Динамика роста температуры хладоносителя на двух стадиях замораживания в обычных и логарифмических координатах представлена на рис. 4. На рис. 4б показаны значения температуры хладоносителя, взятые по модулю. Наиболее резкий рост температуры хладоносителя наблюдается в момент перехода со стадии активного замораживания на стадию пассивного замораживания. По мере того как колебательный процесс в системе затухает, температура хладоносителя с течением времени продолжает монотонно возрастать по степенному закону с показателем степени  $-0.2$ . Данное значение определено в результате поиска степенных аппроксимирующих функций вида  $a + bt^c$  для каждой из пяти кривых на рис. 4б интервале времен 150–300 сут. Поиск осуществлялся с помощью метода наименьших квадратов в пакете компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

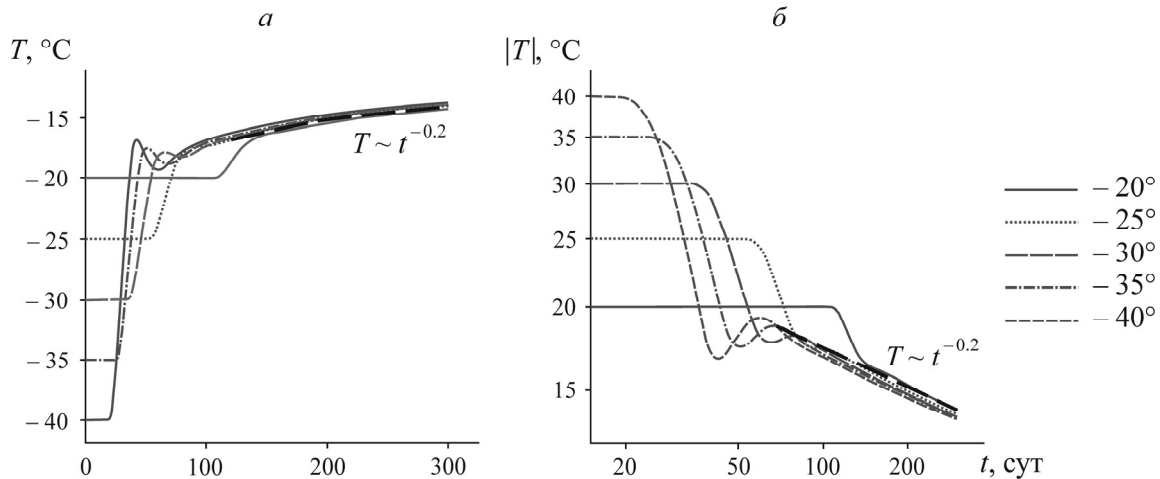


Рис. 4. Временная динамика температуры хладоносителя в нормальных (а) и логарифмических (б) координатах при разных начальных температурах хладоносителя

В ходе анализа результатов численного моделирования получено, что показатель степени при времени не зависит от начального значения температуры хладоносителя и для всех пяти кривых одинаков. Сами аппроксимационные зависимости для кривых практически совпадают (рассогласование на всем рассматриваемом временном промежутке не превышает 1 °С). Функциональная зависимость температуры хладоносителя от времени на стадии пассивного замораживания, обеспечивающая поддержание постоянной полутолщины ЛПО, равной проектному значению, далее будем называть оптимальной температурой хладоносителя.

#### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОДНОГО МАССИВА НА ДИНАМИКУ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХЛАДОНОСИТЕЛЯ

Изучено влияние теплофизических свойств породного массива на характер изменения оптимальной температуры хладоносителя в фазе пассивного замораживания при временах более 150 сут. Исследование проводилось в терминах безразмерных чисел Фурье и Стефана:

$$Fo = \frac{\lambda_l \Delta t \cdot 3600 \cdot 24}{\rho_l c_l R_w^2}, \quad Ste = \frac{c_l (|T_{fr}^{min}| + T_0)}{Lw}.$$

Здесь  $\Delta t$  — общее время моделирования, сут. Оба безразмерных числа записываются с использованием теплофизических свойств породы в зоне охлаждения. Для исходных параметров задачи числа Фурье и Стефана равны соответственно 0.088 и 0.0018.

В работе рассмотрены вариации чисел Фурье  $\pm 50\%$  от начального значения, которые проводились путем изменения теплопроводности и плотности породного массива в зоне охлаждения. Теплофизические свойства массива в зоне льда менялись пропорционально теплофизическим свойствам в зоне охлаждения. Аппроксимирующие степенные функции оптимальной температуры хладоносителя в фазе пассивного замораживания от времени для трех различных чисел Фурье и числа Стефана, равного 0.0018, имеют вид:

$$\begin{aligned} Fo = 0.044: & \quad T(t) = -2 - (37.3 + 0.066T_{fr})t^{-0.18}, \\ Fo = 0.088: & \quad T(t) = -2 - (39.5 + 0.066T_{fr})t^{-0.20}, \\ Fo = 0.132: & \quad T(t) = -2 - (43.4 + 0.070T_{fr})t^{-0.22}. \end{aligned} \tag{11}$$



Отсчет времени здесь начинается в момент начала активного замораживания. Ввиду того, что функции (11) применимы только для стадии поддержания толщины ЛПО, параметр  $t$  в них не обращается в нуль и функции принимают конечное значение.

Рассмотрены вариации массового содержания воды в порах  $\pm 50$  и  $+150\%$  от начального значения, равного  $0.04$  кг/кг. Вариация соответствующих чисел Стефана лежит в диапазоне  $[0.0007; 0.0036]$ . Аппроксимирующие степенные функции оптимальной температуры хладоносителя от времени для четырех разных чисел Стефана и числа Фурье, равного  $0.088$ , имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{Ste} = 0.0036: T(t) &= -2 - (39.7 + 0.071T_{fr})t^{-0.2}, \\ \text{Ste} = 0.0018: T(t) &= -2 - (39.5 + 0.066T_{fr})t^{-0.2}, \\ \text{Ste} = 0.0012: T(t) &= -2 - (38.7 + 0.060T_{fr})t^{-0.2}, \\ \text{Ste} = 0.0007: T(t) &= -2 - (40.8 + 0.085T_{fr})t^{-0.2}. \end{aligned} \quad (12)$$

В качестве аддитивной константы во всех функциях выбрано число  $-2$ , представляющее собой температуру, при которой ЛПО считается прочным. Именно по этой изотерме проводится расчет ФФП при численном моделировании. Из вида зависимостей (11) и (12) следует, что в пределе они стремятся к асимптотическому значению  $-2$ . Данный факт является вполне логичным, поскольку в пределе бесконечного времени породный массив промораживается полностью, а значения градиента температуры и тепловых потоков в нем стремятся к нулю. В такой ситуации выполнение условия  $R(t) = R_{req}$  возможно только когда температурное поле во всем породном массиве равно примерно  $-2$ . При этом для зоны замороженного массива температура составляет  $-2 - \varepsilon$ , а для зоны охлажденного массива  $-2 + \varepsilon$  ( $\varepsilon$  — некоторая очень малая положительная величина).

Графики полученных функций (11) и (12) приведены на рис. 5. Вариация числа Фурье оказывает более сильное влияние на оптимальную температуру хладоносителя в фазе пассивного замораживания. Это видно по амплитуде отклонений кривых и немного отличающемуся показателю степенной зависимости в формулах (11).

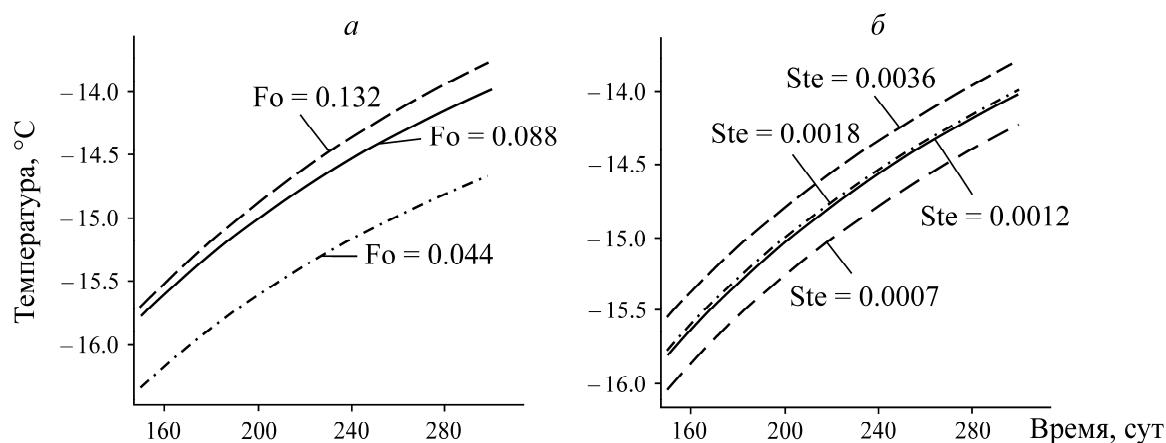


Рис. 5. Аппроксимирующая степенная функция оптимальной температуры хладоносителя от времени для случая начальной температуры хладоносителя  $-30$  °C:  $a$  — вариация  $Fo$ ;  $b$  — вариация  $Ste$

Итак, требуемая температура хладоносителя монотонно возрастает с течением времени по степенному закону с показателем степени около  $-0.2$ . Данный факт проверялся и для других значений проектного значения полутолщины ЛПО, температуры прочного ЛПО.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХЛАДОНОСИТЕЛЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЗАМОРАЖИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

Интересен вопрос, насколько различается суммарная теплота, отобранная у породного массива в ходе активного и пассивного замораживания при различных температурах хладоносителя на стадии активного замораживания. Предполагается, что низкие температуры хладоносителя на стадии активного замораживания позволяют раньше переходить к фазе поддержания толщины ЛПО и, следовательно, раньше начинать проходку ствола. В этом смысле более низкие температуры хладоносителя должны быть предпочтительны. Однако важно провести не только качественную, но и количественную оценку экономии тепловой мощности при использовании более низкой температуры хладоносителя. Эта информация окажется полезной при выборе наиболее энергоэффективного режима работы замораживающей станции при разработке исходных данных для проектов по искусственному замораживанию породного массива при строительстве подземных сооружений. В существующей литературе представлен ряд исследований по оптимизации работы систем замораживания [14, 15], но недостаточно уделено внимания стадии пассивного замораживания.

В настоящем исследовании обсуждался только вопрос экономии тепловой мощности на замораживание массива, в то время как факторы капитальных затрат на установку системы замораживания и амортизации не рассматривались. Для расчета теплоты, отобранной из породного массива, выполнено численное интегрирование кривых мощности  $W(t)$  (рис. 3б), рассчитанных по формуле (10) для различных температур хладоносителя на стадии активного замораживания и различных чисел Фурье.

Анализ проводился в терминах относительной теплоты  $\delta Q$ , равной отношению суммарной теплоты, отобранной из слоя породного массива за все время его замораживания, к полезной теплоте, затраченной на формирование ЛПО [16]. Величина  $\delta Q$  характеризует то, насколько велики теплотопотери от охлаждения породного массива, окружающего ЛПО. Расчет  $\delta Q$  осуществлялся по формулам

$$Q_{sum} = \sum_{k=1}^N \left( \frac{1}{2} \frac{W_k + W_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \right), \quad \delta Q = \frac{Q_{sum}}{Q_{fv}},$$

где  $k$  — номер временной итерации;  $t$  — время, с;  $Q_{sum}$  — суммарная тепловая энергия, отобранная из слоя породного массива, Дж;  $Q_{fv}$  — полезная теплота, затраченная на формирование ЛПО, Дж.

Сравнение теплоты, отобранной из породного массива, выполнялось при одинаковых длительностях стадии пассивного замораживания. Общие временные интервалы, на которых проводилось интегрирование зависимостей  $W(t)$ , различались для разных начальных температур хладоносителя вследствие разных длительностей стадии активного замораживания. На рис. 6 представлены зависимости относительной теплоты  $\delta Q$  от начальной температуры хладоносителя для разных чисел Фурье и длительности стадии пассивного замораживания 300 сут.

Относительная теплота уменьшается при уменьшении начальной температуры хладоносителя (рис. 6). В наибольшей степени это проявляется для относительно высоких температур хладоносителя  $-20$  и  $-25$  °С. В целом же уменьшение незначительно и составляет 10–15% при изменении начальной температуры хладоносителя от  $-20$  до  $-40$  °С. Такое небольшое из-

менение теплоты, отобранной из массива, связано с тем, что длительность стадии пассивного замораживания намного больше, чем сэкономленное время активного замораживания в результате применения более низкотемпературного хладоносителя. Например, достижение проектной полутолщины ЛПО для случая  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  всего на 30 сут быстрее, чем для случая  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3а).

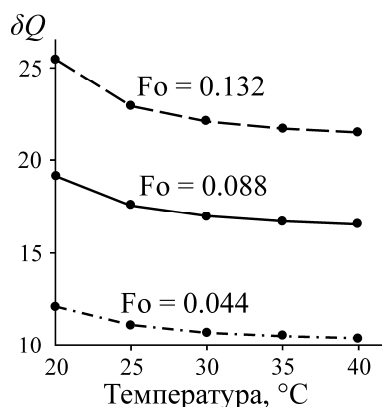


Рис. 6. Зависимость относительной теплоты от температуры хладоносителя на стадии активного замораживания, случай равных длительностей стадии пассивного замораживания

Для относительно низких температур хладоносителя в фазе активного замораживания ( $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже) дальнейшее понижение температуры хладоносителя практически не приводит к положительному экономическому эффекту и не повышает энергоэффективность системы замораживания. Для более высоких температур хладоносителя в фазе активного замораживания (встречается на практике реже) экономический эффект от понижения температуры хладоносителя зависит от длительности стадии пассивного замораживания, заложенной по проекту. Выбор значения температуры хладоносителя в фазе активного замораживания должен определяться в основном исходя из других критериев — температуры замерзания минерализованных поровых вод или температуры, при которой проводились испытания прочности породного массива, образующего ЛПО, и для которой определялись проектные толщины ЛПО.

## ВЫВОДЫ

Предложена упрощенная одномерная модель динамики тепловых процессов, происходящих в породном массиве, искусственно замораживаемом с использованием одной замораживающей колонки. При переходе на стадию пассивного замораживания температура хладоносителя в замораживающей колонке регулировалась таким образом, чтобы обеспечить сохранение положения фронта фазового перехода поровой воды.

Проведено многопараметрическое численное моделирование активного и пассивного замораживания породного массива, в ходе которого определены зависимости температуры хладоносителя от времени. Получено, что на стадии пассивного замораживания для поддержания постоянной толщины ЛПО температура хладоносителя должна монотонно возрастать с течением времени по степенному закону с показателем степени около  $-0.2$ . Данный закон справедлив в широком диапазоне возможных теплофизических параметров замораживаемых пород (в терминах безразмерных комплексов задачи:  $0.044 \leq Fo \leq 0.132$ ,  $0.0007 \leq Ste \leq 0.0036$ ).

Выбор значения температуры хладоносителя в фазе активного замораживания практически не влияет на суммарную энергоэффективность системы замораживания. Факторы капитальных затрат на установку системы замораживания и ее амортизации не рассматривались.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотских Н. С., Докукин О. С. Строительство стволов шахт и рудников. — М.: Недра, 1991. — 516 с.
2. Wang Y., Yang W., and Ren Y. Numerical back analysis and simulation of temperature field for shaft sinking with artificial ground freezing method, J. China University of Min. and Tech.-Chinese Edition, 2005, Vol. 34, No. 5. — P. 626.
3. Jones Jr. J. S. State-of-the-art report-engineering practice in artificial ground freezing, Developments in Geotech. Eng., 1982, Vol. 28. — P. 313–326.
4. Трупаков Н. Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. — М.: Углетехиздат, 1954. — 896 с.
5. Пугин А. В. Исследование динамики тепловых полей при размораживании ледопородных ограждений строящихся стволов // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2018. — С. 272–275.
6. Фомичев А. Д. Технологии механизированного строительства главных вертикальных стволов на примере современных стволопроходческих агрегатов // Изв. ТГУ. Техн. науки. — 2014. — № 1. — С. 172–179.
7. Ольховиков Ю. П., Пестрикова В. С., Тарасов В. В. Особенности поддержания в безопасном состоянии крепи шахтных стволов Верхнекамского месторождения, установленной в карналлитовых породах // ГИАБ. — 2015. — № 5. — С. 30–34.
8. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
9. Lurie V. J. and Enright P. Classical feedback control with nonlinear multi-loop systems: with MATLAB® and Simulink®, CRC Press, 2019.
10. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 172–184.
11. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. Т. 2. — М.: Мир, 1990. — 384 с.
12. Разработка исходных данных для проекта проходки шахтных стволов; в том числе исходные данные по скиповому стволу: отчет о НИР. — Минск: ОАО «Белгорхимпром», 2013. — 192 с.
13. Kiong T. K., Qing-Guo W., Chieh H. C., and Hagglund T. J. Advances in PID control, London, Springer, 1999. — 262 p.
14. Alzoubi M. A., Sasmito A. P., Madiseh A., and Hassani F. P. Intermittent freezing concept for energy saving in artificial ground freezing systems, Energy Procedia, 2017, Vol. 142. — P. 3920–3925.
15. Hu X. D. and Ji B. Y. Optimization of double-ring-pipe freezing scheme for tunnel cross-passage construction, Advanced Materials Res., Trans Tech. Publ. Ltd., 2012, Vol. 446. — P. 2262–2266.
16. Семин М. А., Левин Л. Ю., Пугин А. В. Расчет земных теплопритоков при искусственном замораживании породного массива // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 162–171.

*Поступила в редакцию 16/III 2020*

*После доработки 03/VII 2020*

*Принята к публикации 11/IX 2020*