

УДК 622.673.2:551.34

**РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЗАСОЛЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
В УСТЬЕВОЙ ЧАСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА
ПРИ РАБОТЕ ЗАМОРАЖИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**

Ю. А. Хохолов, А. С. Курилко, Д. Е. Соловьев

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: khokholov@igds.ysn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

Предложена трехмерная математическая модель расчета температурного режима массива засоленных пород в устьевой части вертикального ствола, учитывающая параметры и режимы работы замораживающей системы, температуру атмосферного воздуха и воздуха в стволе, неоднородность и степень засоленности вмещающих пород. Модель позволяет в динамике рассчитать изменение температуры пород, окружающих ствол, а также определить несущую способность каждой сваи фундамента копра в зависимости от температурных условий горных пород и уровня их засоленности. Рассмотрены различные варианты работы замораживающей системы и выбраны те, которые обеспечивают необходимую несущую способность свай копров и сохранность крепи ствола алмазодобывающего рудника.

Математическое моделирование, криолитозона, теплообмен, вертикальный ствол, засоленные породы, замораживающая система, несущая способность свай

Для обеспечения устойчивости свайного фундамента наземных сооружений в арктических районах, согласно СНиП 2.02.04-88, грунты оснований необходимо сохранять в мерзлом состоянии [1]. Температурное поле в породном массиве, вмещающем стволы рудников, определяется взаимодействием идущих от него тепловых потоков и влиянием дневной поверхности. В стволах круглогодично с помощью калориферных установок поддерживается положительный температурный режим, что вызывает растепление окружающих мерзлых пород, негативно сказывающееся на их устойчивости. Однако применение только пассивной теплоизоляции устьевых частей не привело к желаемым результатам [2–4]. Для предотвращения негативных воздействий от идущего теплового потока предусматривается применение замораживающих установок, располагаемых вокруг ствола, которые должны не только обеспечивать отрицательный температурный режим вмещающих пород, но и обладать требуемой мощностью, позволяющей заморозить засоленные горные породы, вмещающие устьевые части вертикальных стволов.

Засоленность насыпных грунтов промплощадки рудника “Удачный” практически повсеместная и изменяется от слабой до сильной. По результатам анализа водной вытяжки техногенные грунты имеют хлоридно-кальциевый тип засоления.

Принятие различных инженерно-технических решений, мер противодействия оттаиванию и потере несущей способности пород требуют разработки совершенных методик расчета температурных полей и, как следствие, усовершенствования методологии численного математического моделирования с учетом конкретных реалий процесса теплового взаимодействия грунтов

и сооружений. В связи с этим исследование закономерностей теплопереноса в основаниях фундаментов инженерных сооружений на засоленных породах приобретает первостепенное значение для оценки их надежности и долговечности.

Для расчета и управления температурным режимом пород в основаниях башенных копров разработана трехмерная математическая модель процессов теплообмена с учетом температуры замораживающей жидкости, длины замораживающих скважин, их количества и места расположения, годового хода температуры атмосферного воздуха, температуры воздуха в стволе, слоистости и степени засоленности вмещающих пород.

Для определения температуры массива выделим расчетную область, которая показана на рис. 1. Постановку задачи осуществим с учетом процессов промерзания–оттаивания влаги в горных породах, теплообмена охлаждающих устройств с окружающим породным массивом, теплообмена воздуха с внутренней поверхностью ствола и вентиляционного канала, влияния дневной поверхности.

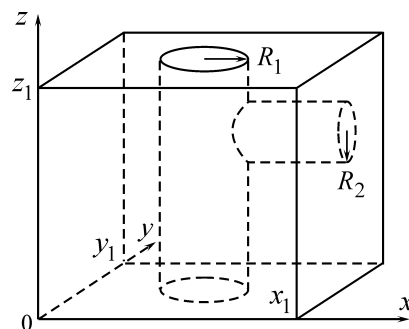


Рис. 1. Трехмерная область для расчета температурного режима пород в основании башенных копров: R_1 , R_2 — радиус ствола и вентиляционного канала соответственно

Область, занятую массивом горных пород, обозначим Ω . Численная реализация многомерных задач Стефана обычно осуществляется методом сглаживания [5]. Это равносильно предположению, что фазовый переход влаги происходит не при одной определенной температуре T_0 , а в некотором интервале температур, длина которого определяется параметром сглаживания. При численном эксперименте задаются различные значения этого параметра, т. е. изменяется длина диапазона температур фазового перехода. Мощность и средняя температура источника тепла фазового перехода остаются постоянными, а меняется вид функции плотности распределения источника тепла. Однако известно, что в дисперсных средах, к которым относится грунт, часть воды остается в жидкой фазе при температуре ниже температуры фазового перехода. С ростом степени засоленности количество незамерзшей воды увеличивается. В таких средах свободная вода замерзает при температуре $T_0 = 0^\circ\text{C}$, а остальная вода (связанная) кристаллизуется по мере понижения температуры среды. В этом случае изменение агрегатного состояния связанной воды происходит в некотором диапазоне температур $[T_1, T_2]$, в результате чего образуется зона промерзания. Предложены расчетные формулы, которые учитывают реальный процесс промерзания–оттаивания порового раствора мерзлого грунта в спектре температур; такой способ называется естественным методом сглаживания [6]. Преимущество данного подхода — отсутствие необходимости выбора параметра сглаживания, что позволяет строить разностные схемы со сглаженными коэффициентами, т. е. совершать переход к обычной задаче теплопроводности. Численная реализация нелинейных задач осуществляется с помощью итерационных методов сквозного счета, это намного упрощает процесс решения многомерных задач тепломассообмена в мерзлых грунтах при использовании экономичных аддитивных локально-одномерных разностных схем.

Для решения задачи теплопроводности используется естественный метод сглаживания с помощью функции незамерзшей воды [5]:

$$\left[C(T) + L\rho \frac{\partial W_1}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (x, y, z) \in \Omega, \quad (1)$$

где C — объемная теплоемкость породы, Дж/(м³·К); T — температура горных пород, °С; L — теплота фазовых переходов воды, Дж/кг; W_1 — количество незамерзшей воды, доли ед.; ρ — плотность горных пород, кг/м³; t — время, с; λ — коэффициент теплопроводности горной породы, Вт/(м·К).

На боковых и нижней границах области Ω задается отсутствие потоков тепла (граничные условия II рода):

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad 0 \leq z \leq z_1, \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = x_1, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad 0 \leq z \leq z_1, \quad (3)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad y = 0, \quad 0 \leq z \leq z_1, \quad (4)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad y = y_1, \quad 0 \leq z \leq z_1, \quad (5)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad z = 0, \quad (6)$$

где x_1, y_1, z_1 — размеры области Ω , м.

На дневной поверхности принимается следующее краевое условие:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_6), \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad z = z_1, \quad (7)$$

где α — коэффициент теплообмена поверхности земли с атмосферным воздухом, Вт/(м²·К); T_6 — температура наружного воздуха, °С.

На внутренней поверхности ствола и вентиляционного канала также используется граничное условие III рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_1(T - T_7), \quad (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R_1^2, \quad x \geq 0, \quad y \geq 0, \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_2(T - T_8), \quad (z - z_2)^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2, \quad z \geq 0, \quad y \geq 0, \quad (9)$$

где $\partial T / \partial n$ — производная на внешней нормали к границе; T_7, T_8 — температуры воздуха в стволе и вентканале, °С; α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи через стенки ствола и вентканала, Вт/(м²·К); x_0, y_0 — координаты центра ствола, м; z_2, y_2 — координаты центра вентканала, м; R_1, R_2 — радиусы ствола и вентканала, м.

В начальный момент времени задается распределение температуры горных пород и температуры воздуха внутри ствола:

$$T = \tilde{\varphi}(x, y, z), \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad 0 \leq z \leq z_1. \quad (10)$$

Коэффициент конвективного теплообмена поверхности грунта с атмосферным воздухом рассчитывается по формуле [7]

$$\alpha = \begin{cases} 6.16 + 4.19v, & 0 < v < 5, \\ 7.56v^{0.78}, & 5 < v < 30, \end{cases} \quad (11)$$

где v — скорость ветра, м/с.

Коэффициент теплоотдачи α_1 определяется из известной формулы теории теплопередачи при турбулентном течении воздуха [8]

$$\text{Nu} = 0.0195\varepsilon \text{Re}^{0.8}, \quad (12)$$

где $\text{Nu} = \alpha_1 R_1 / \lambda_0$ — критерий Нуссельта; ε — коэффициент шероховатости стенок выработки; $\text{Re} = \rho_0 v_0 R_1 / \mu$ — критерий Рейнольдса; λ_0 — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); μ — динамическая вязкость воздуха, Па·с; v_0 — скорость воздушной струи, м/с; ρ_0 — плотность воздуха, кг/м³.

Аналогично рассчитывается коэффициент теплоотдачи α_2 . Наличие замораживающих устройств учитывается заданием требуемой температуры охлаждения в соответствующих координатах.

Для аппроксимации кривой незамерзшей воды в породах имеется множество различных формул, из которых наибольшее распространение получила следующая [9]:

$$W_1(T) = \begin{cases} W_2, & T \leq T_4; \\ (W - W_2) \left(\frac{T - T_4}{T_3 - T_4} \right)^n + W_2, & T_4 < T < T_3; \\ W, & T \geq T_3, \end{cases} \quad (13)$$

где W — суммарная влажность, доли ед.; W_2 — прочносвязанная влажность, доли ед.; T_3, T_4 — температура начала и полного замерзания влаги в породе, °С; n — эмпирический параметр.

Взаимодействие воды с активными поверхностями частиц грунта понижает температуру ее замерзания. При этом, чем более прочно связана вода с грунтом, тем температура ее замерзания ниже. На основании ряда экспериментов выделено несколько температурных зон, внутри которых происходит фазовый переход разных категорий воды в лед. Так, в интервале температур $0 \div -0.2^\circ\text{C}$ начинает замерзать свободная вода, а при снижении температуры до -2°C она полностью замерзает. Кроме того, замерзают наиболее удаленные слои рыхлосвязанной воды. Связанная вода начинает замерзать при температуре ниже 0°C . Основная ее часть замерзает в интервале температур $-2 \div -5^\circ\text{C}$. При $-5 \div -12^\circ\text{C}$ может замерзать часть прочносвязанной воды, поэтому в мерзлых грунтах всегда содержится некоторое количество незамерзшей воды и ее количество тем больше, чем выше температура грунта [10].

Температуры фазовых переходов рассолов зависят от концентрации солей и находятся по формуле [11, 12]

$$T_3 = \frac{273.15}{L} \left(273.15R \ln \left(\frac{1 - kC}{1 - C} \right) + \Psi_1 - \Psi_2 \right), \quad (14)$$

где $R = 8.314 \cdot 10^3$ — газовая постоянная, Дж/(К·кмоль); k — коэффициент захвата солей поверхностью льда, доли ед.; C — концентрация солей в поровом растворе, моль/л; Ψ_1, Ψ_2 — потенциалы взаимодействия поверхности горной породы со льдом и водой соответственно, МПа.

С учетом кривой незамерзшей воды коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности горных пород рассчитываются по формулам:

$$C(T) = \begin{cases} (C_1 + 2260(W - W_2) + 4212W_2)\rho, & T \leq T_4, \\ \left(C_1 + 2260(W - W_1) + 4212W_1 + L \frac{\partial W_1}{\partial T} \right) \rho, & T_4 < T < T_3, \\ (C_1 + 4212W)\rho, & T \geq T_3, \end{cases} \quad (15)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T \leq T_4, \\ \lambda_1 + \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(T - T_4)}{T_3 - T_4}, & T_4 < T < T_3, \\ \lambda_2, & T \geq T_3, \end{cases} \quad (16)$$

где C_1 — удельная теплоемкость породного скелета, Дж/(кг·К); λ_1 — коэффициент теплопроводности мерзлых пород, Вт/(м·К); λ_2 — коэффициент теплопроводности талых пород, Вт/(м·К).

Для решения одномерной задачи промерзания – протаивания в постановке вида (1) обычно используются численные методы сквозного счета [5, 13, 14], а для трехмерной задачи теплообмена — метод суммарной аппроксимации [13, 15], который сводит исходную задачу к последовательности одномерных. При этом разностные схемы удовлетворяют условиям аппроксимации и устойчивости только в конечном счете. На каждом временном слое решается последовательность одномерных задач. Все системы разностных уравнений выводятся с учетом геометрии рассматриваемой области.

Разработанная математическая модель применялась для определения режима работы замораживающей системы, обеспечивающей мерзлое состояние грунтов в основании фундамента копров и в устьевой части стволов на алмазодобывающем руднике “Удачный” АК “АЛРОСА”. В качестве начального распределения температур в грунте взяты результаты натурных наблюдений [16]. По проекту, сохранение грунта под основаниями фундаментов копров в мерзлом состоянии обеспечивается системой, состоящей из 56 замораживающих скважин для вентиляционно-вспомогательного ствола (ВВС), 50 скважин — для скипового ствола (СС) и 24 — для клетьевого ствола (КС) рудника “Удачный”.

Расчетная несущая способность сваи определялась из условия [1, 17]

$$N \leq \frac{\gamma_0 F}{\gamma_1 \gamma_2}, \quad (17)$$

где N — расчетная нагрузка, передаваемая на сваю (продольное усилие, возникающее в ней от расчетных нагрузок, действующих на фундамент при наиболее невыгодном их сочетании), кН; F — несущая способность (предельное сопротивление) грунта основания одиночной сваи, кН; $\gamma_0 = 1$ — коэффициент условий работы, учитывающий изменение однородности грунтовых условий при применении свайных фундаментов; $\gamma_1 = 1.25$ — коэффициент надежности по назначению (ответственности) сооружения; $\gamma_2 = 1.4$ — коэффициент надежности по грунту.

Несущая способность основания вертикально нагруженной висячей сваи рассчитывалась по формуле [1]

$$F = \gamma_3 \gamma_4 \left(R_3 A + \sum_{j=1}^m R_{4,j} A_{1,j} \right), \quad (18)$$

где $\gamma_3 = 1$ — температурный коэффициент, учитывающий изменение температуры грунтов основания в период строительства и эксплуатации сооружения; $\gamma_4 = 1$ — коэффициент условий работы основания; R_3 — расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом сваи, кПа; A — площадь опирания сваи на грунт, м²; $R_{4,j}$ — расчетное сопротивление мерзлого грунта по боковой поверхности смерзания фундамента в пределах j -го слоя грунта, кПа; $A_{1,j}$ — площадь поверхности смерзания j -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, м²; m — число выделенных слоев вечномерзлого грунта.

Согласно СНиП 2.02.04-88, расчетные давления на мерзлые грунты R_3 , а также сопротивления мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхностям смерзания фундаментов R_4 находятся опытным путем [1]. При отсутствии опытных данных допускается принимать значения R_3 и R_4 по специальным таблицам данного СНиПа в зависимости от температуры грунта и степени засоленности.

В качестве исходных данных для расчета несущих способностей свай служат свойства пород по слоям, а также координаты расположения свай и значения их длины для ВВС, КС и СС. В программе предусмотрен алгоритм, по которому через каждый месяц вычисляются несущие способности всех свай с учетом их координат и размеров, а также текущего распределения температуры в расчетной области.

С началом работы замораживающей системы происходит постепенное охлаждение, а затем промерзание породного массива, окружающего вертикальный ствол и свайный фундамент копра. В то же время имеющийся опыт свидетельствует о том, что в целях предотвращения деформирования и разрушения крепи ствола сдвиговыми напряжениями, возникающими в процессе замерзания пород в закрепном пространстве, необходимо наличие в нем демпфирующей талой кольцеобразной зоны вокруг ствола. По оценкам [2–4], необходимая минимальная толщина такой зоны колеблется от 0.5 до 1 м. Поэтому работу замораживающей станции необходимо организовать таким образом, чтобы не допустить перемораживания пород демпфирующей зоны и в то же время поддерживать мерзлое состояние пород свайного фундамента копра, обеспечивая при этом его проектную несущую способность.

При выполнении расчетов рассмотрены различные режимы работы замораживающей системы, а именно приняты два значения температуры охлаждения: -15 и -20 °С, а также три параметра температуры воздуха в стволе: $+5$, $+10$ и $+15$ °С. В результате численных экспериментов определены наиболее рациональные параметры замораживающей системы, при которых обеспечивается наличие демпфирующего талого кольца размером не менее 0.5 м. Например, на скиповом стволе рудника “Удачный” при температуре воздуха в стволе $+5$ °С и температуре хладонносителя в колонках -15 °С как наиболее рациональный выбран режим, когда замораживающая система работает в течение 3 мес и затем на 3 мес отключается.

Вокруг скипового ствола сохранение грунта в мерзлом состоянии обеспечивается замораживающей системой, состоящей из 26 скважин длиной 37 м и 24 скважин длиной 15 м. На рис. 2 приведены изолинии, полученные по результатам расчетов температурных полей вокруг ствола, в горизонтальной плоскости на глубине 14 и 27 м (глубина расположения вентканала), а на рис. 3 — в вертикальной плоскости. Как видно из рис. 2а, на глубине 14 м вокруг ствола при таком режиме работы замораживающей станции через 4 года может быть образована кольцеобразная мерзлая зона с температурой пород $-4 \div -5$ °С с радиусом 15–20 м, а на глубине 27 м — такая же зона с радиусом 5–12 м (рис. 2б). Видно, что существенное тепловое влияние на окружающий породный массив стволов оказывает вентканал.

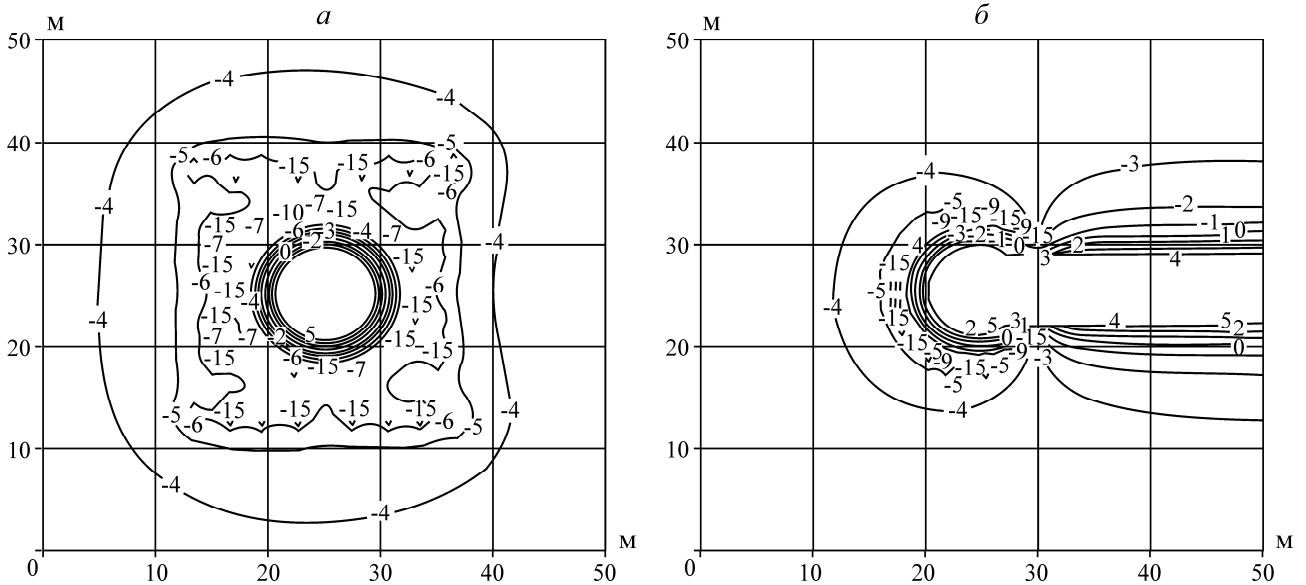


Рис. 2. Температурное поле вокруг скипового ствола на конец 4-го года эксплуатации замораживающей системы. Сечение на глубине, м: *a* — 14; *б* — 27

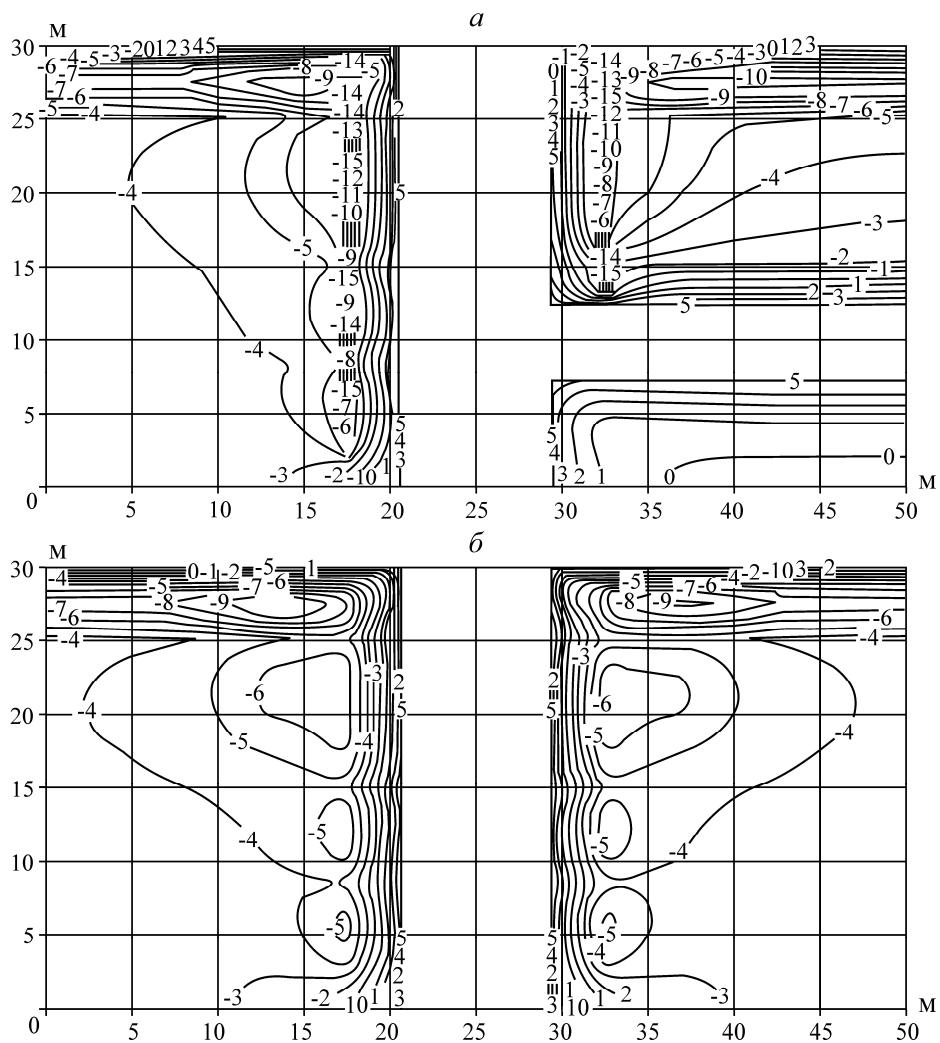


Рис. 3. Температурное поле вокруг скипового ствола на конец 4-го года эксплуатации замораживающей системы. Сечение через ось ствола: *a* — параллельно; *б* — перпендикулярно оси вентканала

На рис. 4а представлены расчетные значения изменения несущих способностей отдельных свай за 4 года эксплуатации. Видно, что они носят сезонный характер, зимой происходит их повышение, а летом снижение; с годами прослеживается общая тенденция к повышению несущих способностей свай.

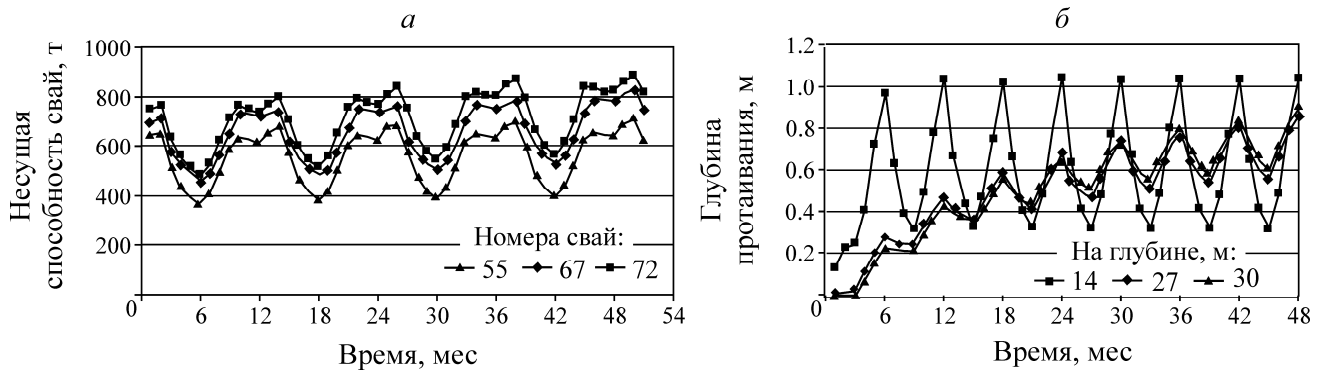


Рис. 4. Динамика несущих способностей отдельных свай (а) и ореолов протаивания вокруг скипового ствола (б) при температуре воздуха в стволе $+5^{\circ}\text{C}$ и температуре замораживания -15°C (замораживающая система работает 3 мес, а затем на 3 мес отключается)

На рис. 4б показана динамика развития ореолов протаивания пород вокруг ствола СС на разных глубинах. Из-за близкого расположения замораживающих скважин заметны колебания размеров ореолов протаивания при включении–выключении замораживающей системы. Во всех вариантах сохраняется талая зона вокруг ствола.

ВЫВОДЫ

Разработана трехмерная математическая модель теплообмена воздуха с окружающими горными породами для расчета температурного режима массива засоленных пород в устьевой части вертикального ствола в зависимости от параметров и режимов работы замораживающей системы, температуры атмосферного воздуха и воздуха в стволе, неоднородности и степени засоленности вмещающих пород. Предложена методика оценки несущей способности свайного основания с учетом температурных условий грунтов и уровня их засоленности.

Выбраны наиболее рациональные режимы работы замораживающей системы, при которых обеспечивается наличие демпфирующего кольцеобразного талого породного массива вокруг стволов размером не менее 0.5 м. Рассчитаны несущие способности всех свай копров вертикальных стволов рудника “Удачный”. Изменения несущих способностей свай носят сезонный характер, зимой происходит их повышение, а летом — снижение. Установлено, что полное промерзание закрепного породного массива ствола связано с ростом нагрузок на крепи. Это вызывает необходимость сохранения в закрепном пространстве буферного кольца талых пород.

Массив искусственно замороженных пород служит защитным барьером, предотвращающим миграцию солей, и при понижении их температуры способствует снижению интенсивности массообменных процессов. Мониторинг температурного режима под основанием башенных копров необходим для разработки превентивных мероприятий по предотвращению попадания высокоминерализованных рассолов в горные массивы вокруг стволов и обеспечению устойчивости фундаментов копров. Значения температур пород в районе расположения свай фундамента копров должны сверяться с результатами моделирования, и при необходимости следует корректировать работу замораживающих устройств для обеспечения требуемых температурных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.02.04-88. Основание и фундаменты на вечномерзлых грунтах. — М.: Госстрой СССР, 1990. — 59 с.
2. Крамсков Н. П. Устойчивость копров вертикальных стволов — основа промышленной безопасности алмазодобывающих рудников // Наука и образование. — 2004. — № 1. — С. 27–34.
3. Козеев А. А., Изаксон В. Ю., Звонарев Н. К. Термо- и геомеханика алмазных месторождений. — Новосибирск: Наука, 1995. — 245 с.
4. Слепцов В. И., Мордовской С. Д., Изаксон В. Ю. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. — Новосибирск: Наука, 1996. — 104 с.
5. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. мат. и мат. физики. — 1965. — Т. 5. — № 5. — С. 816–827.
6. Пермяков П. П., Аммосов А. П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2003. — 224 с.
7. Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 299 с.
8. Щербань А. Н., Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. — М.: Недра, 1977. — 359 с.
9. Anderson D., Morgenstern N. Physic, Chemistry and mechanic of frozen Ground, Permafrost. Second Int. Conference, 1973. — P. 257–288.
10. Маслов А. Д., Осадчая Г. Г., Тумель Н. В., Шполянская Н. А. Основы геокриологии: учеб. пособие. — Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. — 176 с.
11. Попов В. И., Курилко А. С. Решение задач тепломассопереноса при промерзании–оттаивании горных пород с учетом уравнения фазового состояния поровой влаги // ГИАБ. Физика горных пород. — 2006. — С. 236–244.
12. Ивата С. Количественная зависимость незамерзшей воды в частично замерзшей почве от исходной влажности // Тр. X Междунар. конгресса почвоведов. Т. 1: Физика и технология почв. — М.: Наука, 1974. — С. 56–61.
13. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 784 с.
14. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
15. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967. — 196 с.
16. Анализ результатов термомеханического контроля грунтов основания копров вертикальных стволов рудника “Удачный”, подготовка регламента по режиму работы замораживающей станции на период его эксплуатации: отчет ИГДС СО РАН. — Якутск, 2012. — 180 с.
17. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. — М.: М-во регион. развития РФ, 2011. — 86 с.

Поступила в редакцию 11/V 2015