

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(82-91)

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ КОПРОВ
И УСТЬЕВОЙ ЧАСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ НА ПРИМЕРЕ
АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕГО РУДНИКА “УДАЧНЫЙ” (ЯКУТИЯ)

А.С. Курилко¹, Ю.А. Хохолов¹, А.В. Дроздов², Д.Е. Соловьев¹

¹ Институт горного дела Севера имени Н.В. Черского СО РАН,
677980, Якутск, просп. Ленина, 43, Россия; Solovjevde@igds.ysn.ru

² Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия; drosdovav@list.ru

Проведен анализ криогидрогеохимических условий грунтовых оснований башенных копров на промышленной площадке подземного рудника “Удачный” АК “АЛРОСА”. Рассмотрены результаты математического моделирования температурного режима грунтов в районе свайного фундамента башенного копра. Приведены результаты численных расчетов, позволяющих спрогнозировать скорость движения нулевой изотермы в породном массиве, вмещающем устьевую часть вертикального ствола, и определен оптимальный период проведения температурных замеров.

Криолитозона, рудник, тепловой режим, геотермический контроль, свайный фундамент, копер, вертикальный ствол, система замораживания грунтов

CONTROL OF GROUND TEMPERATURES UNDER HEADFRAMES AND COLLARS OF VERTICAL SHAFTS:
A CASE STUDY OF THE UDACHNY DIAMOND MINE (YAKUTIA)

A.S. Kurilko¹, Yu.A. Khokholov¹, A.V. Drozdov², D.E. Solovev¹

¹ Chersky Mining Institute of the North, SB RAS, 43, Lenina ave., Yakutsk, 677980, Russia; Solovjevde@igds.ysn.ru

² Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128, Lermontova str., Irkutsk, 664033, Russia; drosdovav@list.ru

The paper presents data on ground temperatures and salinity of groundwater and soil under headframes and collars of vertical shafts at the ALROSA underground diamond mine of Udachny. The ground temperature pattern for the headframe pile foundation is reconstructed using 3D modeling of heat transfer in soil. Numerical experiments allow predictions for the rate of 0 °C isotherm propagation in soil during operation-suspension cycles of a freezing system, with implications for the optimal schedule of temperature logging.

Permafrost, mine, temperature regime, geothermal monitoring, pile foundation, headframe, vertical shaft, ground freezing system

ВВЕДЕНИЕ

Около 50 лет алмазодобывающая промышленность России осуществляла разработку кимберлитовых трубок в Якутии только открытым способом. В настоящее время АК “АЛРОСА” на основных крупных месторождениях перешла на подземный способ отработки. На рудниках “Интернациональный”, “Мир” и “Удачный” кимберлитовые трубки вскрываются вертикальными стволами, а на руднике “Айхал”, кроме аналогичного сооружения, используются два наклонных ствола. Устойчивость копров над подземными выработками – вопрос общей промышленной безопасности горного предприятия, поскольку аварии при спускоподъемах скипов или клетей из-за опасного на-

клона оси сооружения ведут к длительному прекращению добычи кимберлита, простоя обогатительных фабрик, длительному и дорогостоящему ремонту.

Основания фундаментов копров представлены главным образом высокольдистыми глинистыми отложениями, теряющими свою прочность при протаивании. При проходке стволов в основном происходит технологическое растепление закрепленного пространства. Например, на клетевом стволе рудника “Интернациональный” талая зона достигла радиуса 20 м и полностью поглотила свайное поле. Поэтому проблема устойчивости копров вертикальных стволов глубоких алмазодобывающих

рудников, которые являются тяжело нагруженными конструкциями со сложным тепловым режимом оснований фундаментов, традиционными методами не решается. При восстановлении мерзлого состояния оснований фундаментов копров возникает опасность разрушения крепи стволов силами морозного пучения. Возникает важная проблема управления процессом замораживания пород оснований фундаментов копров, чтобы, с одной стороны, добиться необходимой несущей способности свайного поля, а с другой – не разрушить при этом крепь ствола.

Необходимость контроля термомеханических процессов, протекающих при растеплении и замораживании грунтов в основаниях копров, требует создания термометрических комплексов для измерения параметров температурного поля и математических моделей для прогноза геотермического режима основания при эксплуатации сооружения. Поскольку опыт создания таких комплексов в горном деле отсутствует, актуальными являются теория и практика конструирования и обслуживания системы геотермических наблюдений.

КРИОГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ БАШЕННЫХ КОПРОВ НА ПРОМПЛОЩАДКЕ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА “УДАЧНЫЙ”

Территория Якутской алмазонасной провинции входит в состав северной геокриологической зоны Сибирской платформы (североконтинентальная подзона) [Фотиев и др., 1974], которой свойственно сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), непрерывность криогенной толщи, значительная ее мощность (до 1500 м) и низкие значения температур пород. Среднегодовая температура пород на глубине 20 м на северных участках региона колеблется от -7.5 до -3.0 °С, а на южных – от -4 до -1 °С и выше [Балобаев, Девяткин, 1983]. Основной чертой климата региона, особенно его северной части, является резкая континентальность с температурным диапазоном более 100 °С. По данным метеостанций, низкая среднегодовая температура и отрицательный годовой радиационный баланс (879–1130 МДж/м² [Пивоварова, 1977]) благоприятствуют сохранению, а также локальному преобразованию температурных полей мерзлых массивов, подверженных техногенному воздействию при обработке, например, алмазных месторождений.

Как показали результаты инженерно-геологических изысканий, на всех промплощадках подземных рудников АК “АЛРОСА” минерализация водных растворов и тип засоленности грунтов различные. Анализы отобранных проб указывают на загрязнение подземными водами (рассолами) приустьевых частей стволов при их проходке и эксплуатации, а также прилегающего криогенного

массива. Как известно, рассолы, попадая в мерзлые грунты, понижают температуру фазового перехода льда-цемента, в результате чего последний плавится, уменьшая тем самым несущую способность основания сооружения. Кроме того, минерализованные стоки, обладая высокой коррозионной агрессивностью к бетонам, представляют большую опасность для фундаментов возводимых копров, которые относятся к наиболее значимым элементам инженерных коммуникаций.

На руднике “Удачный” по результатам геофизических исследований и изучения грунтов оснований наземных сооружений была выделена техногенная таликовая зона с минерализованными водами, вскрытая в северной части промплощадки на глубинах 11–30 м. В то же время нормативная глубина сезонного промерзания – протаивания грунтов в зависимости от состава и теплофизических свойств изменяется от 2.7 до 5.5 м. Кроме того, при бурении инженерно-геологических скважин на глубине 1.0–4.0 м были вскрыты грунтовые воды сезонноталого слоя (СТС). По результатам химического анализа вода в скважинах в основном хлоридная кальциевая, а по степени минерализации – от слабосолоноватой (1.5–2.0 г/дм³) до слабого метаморфизованного рассола (60–70 г/дм³).

Анализируя данные по степени концентрации солей в грунтовых водах верхней части разреза на промплощадке рудника за период 2003–2010 гг., можно отметить, что водные растворы изменились от пресных до сильносолончатых, а в настоящее время уже преобладают соленые воды и рассолы. Увеличение минерализации подземных вод и изменение типа засоленности указывают на техногенный характер их происхождения за период строительства вертикальных стволов. Негативное воздействие на природную криогидрогенную систему верхней части разреза в основном связано со сбросом природных рассолов (минерализация до 400 г/дм³) из контрольно-стволовых скважин, временным складированием обводненной породной массы из шахтных стволов при их проходке и отсыпкой площадки засоленными грунтами.

Материалы по технологии строительства вертикальных стволов и фактическому состоянию породного основания строящихся наземных сооружений рудника указывают на значительные изменения обводненности грунтов в интервале годовых колебаний температур. При проходке вертикальных стволов во время сброса поднятой разрыхленной обводненной породной массы из забоев на бетонное основание часть высокоминерализованных растворов растекалась и попадала в непокрытый техногенным экраном (бетоном) сезонноталый слой. В дальнейшем, расплавив лед в мерзлых породах и увеличив водопроницаемость породного основания, высокоминерализованные рассолы мигрировали в нижележащие горизонты.

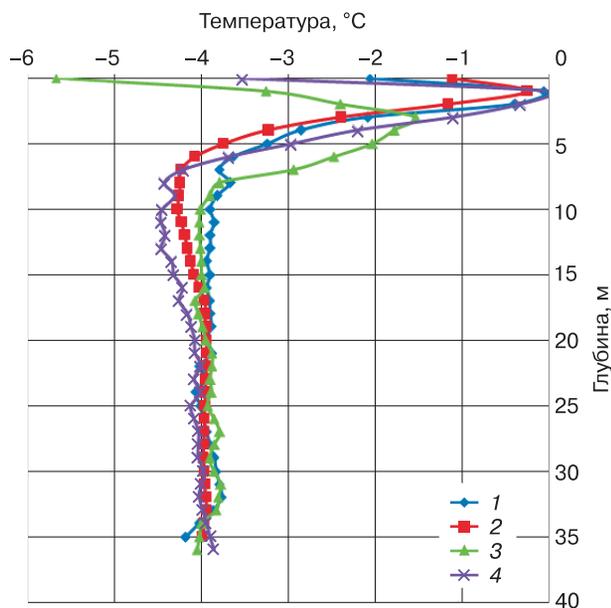


Рис. 1. Распределение температур горных пород по скважинам вблизи клетьевого ствола рудника “Удачный”.

1 – скв. 9 (04.10.2012 г.); 2 – скв. 10 (03.10.2012 г.); 3 – скв. 11 (16.10.2012 г.); 4 – скв. 12 (05.10.2012 г.).

При этом уменьшается исходная минерализация природного раствора до криогидрогеохимических равновесных состояний с окружающим относительно мерзлым, но одновременно неоднородным массивом. Все это подтверждается неоднократными выходами грунтовых вод в скиповом (СС) и вспомогательном вентиляционном (ВВС) стволах.

Наблюдения за гидрогеологической обстановкой в верхней части криогенного массива на промплощадке рудника показали, что водоприток (до $0.5 \text{ м}^3/\text{ч}$) в ствол ВВС в ноябре–декабре 2007 г. фиксировался в интервале глубин 12–30 м. Отобранная проба представляла собой прозрачную жидкость, замерзающую при отрицательных температурах ($-15 \text{ }^\circ\text{C}$), горько-соленую на вкус с характерным запахом рассола.

Минерализация воды, поступившей в вертикальную горную выработку, составляла $58.3 \text{ г}/\text{дм}^3$, что говорит о ее вероятном попадании из техногенного талика. Таким образом, в результате натурных наблюдений по стволам СС и ВВС и сопутствующих комплексных исследований (бурение скважин, геофизическое зондирование и др.) на промплощадке рудника “Удачный” в верхней части криогенного массива, служащей основанием копров для вертикальных стволов, отмечается наличие техногенных таликовых зон с находящимися в них разбавленными природными рассолами. Следовательно, для создания необходимого сце-

пления конструктивных элементов свайного основания постоянных копров требуется снизить температуру искусственной заморозки в грунтах вблизи свай по сравнению с ранее планируемыми показателями ($-3...-5 \text{ }^\circ\text{C}$), которые соответствуют естественным геотермическим условиям в разрезе (рис. 1). Величину снижения температуры грунтов по сравнению с проектными показателями заморозки основания необходимо определить по результатам численного моделирования, что будет показано ниже.

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТАХ ПОД ОСНОВАНИЕМ БАШЕННЫХ КОПРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВолов

Для сохранения мерзлого состояния грунтов и, как следствие, их несущей способности на период эксплуатации копров на алмазодобывающих рудниках в каждом стволе предусмотрены замораживающие установки. В этом случае возникает неординарная задача, связанная с управлением процессом замораживания пород в их основаниях, чтобы, с одной стороны, добиться необходимой несущей способности свайных полей, а с другой, не допустить разрушения бетонной и тубинговой крепи стволов в результате негативных воздействий напряжений, возникающих при промерзании грунтов.

Особенности разработки алмазных месторождений Якутии требуют учета взаимодействия засоленных подземных вод и пород. При этом возникает необходимость оценки температурного и концентрационного, по воде и солям, состояния мерзлых засоленных пород как в естественных условиях, так и при техногенном воздействии. Имеются разные методики прогноза температурного режима засоленных мерзлых пород, удовлетворительно отражающие природу происходящих в них процессов [Слепцов и др., 1996; Пермяков, Аммосов, 2003]. Основная проблема при их использовании – это корректный выбор входных параметров, прежде всего температуры начала замерзания и прогнозируемого фазового состава воды в засоленных мерзлых породах.

Для управления температурным режимом пород оснований башенных копров в лаборатории горной теплофизики Института горного дела Севера (ИГДС) СО РАН разработана трехмерная математическая модель процессов теплообмена в массиве горных пород, вмещающем вертикальный ствол и свайный фундамент копра 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 прогноза тепловых условий выделим расчетную область, которая представлена на рис. 2.

Область, занятую массивом горных пород, обозначим через Ω . Численная реализация многомерных задач Стефана обычно осуществляется методом сглаживания [Самарский, Моисеенко, 1965]. Это равносильно предположению, что фазовый переход влаги происходит не при одном конкретном значении температуры T_0 , а в некотором интервале температур, величина которого определяется параметром сглаживания. При численном эксперименте обычно задают различные значения этого параметра, меняется ширина 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 фазового перехода. С ростом степени засоленности количество незамерзшей воды увеличивается. В таких средах свободная вода замерзает при температуре $T_0 = T_{bf}$, 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. При этом идентифицированные расчетные формулы учитывают реальный процесс промерзания–протаивания порового раствора мерзлого грунта в спектре температур, поэтому предложенный способ называется естественным методом сглаживания [Пермяков, Аммосов, 2003]. Преимущество данного подхода в том, что отсутствует необходимость выбора параметра сглаживания. Данный подход позволяет строить разностные схемы со сглаженными коэффициентами, т. е. совершается переход к обычной задаче теплопроводности. Численная реализация нелинейной задачи осуществляется с помощью итерационных методов сквозного счета, что намного упрощает процесс решения многомерных задач теплообмена в мерзлых грунтах при использовании экономичных аддитивных локально-одномерных разностных схем.

Для решения задачи теплопроводности используем естественный метод сглаживания с помощью функции незамерзшей воды [Самарский, Моисеенко, 1965]:

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

где C – объемная теплоемкость породы, Дж/(м³·К); T – температура горных пород, °С; L – теплота

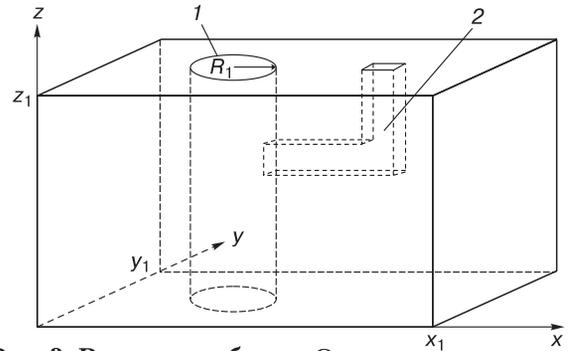


Рис. 2. Расчетная область Ω :

x_1, y_1, z_1 – координаты границ расчетной области; R_1 – радиус ствола; 1 – вертикальный ствол; 2 – вентиляционный канал.

фазовых переходов воды, Дж/кг; W_1 – количество незамерзшей воды, д. 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 задано отсутствие потоков тепла (граничные условия II рода):

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

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

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

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

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

где x_1, y_1, z_1 – предельные координаты области, м.

На дневной поверхности задаем следующее краевое условие с учетом температуры атмосферного воздуха:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_3), \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad 0 \leq y \leq y_1, \quad z = z_1,$$

где α – коэффициент теплообмена поверхности земли с атмосферным воздухом, Вт/(м²·К); T_3 – температура наружного воздуха, °С.

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

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_1(T - T_4), \quad (x, y, z) \in \Gamma_1;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_2(T - T_5), \quad (x, y, z) \in \Gamma_2,$$

где $\partial / \partial n \Big|_{\Gamma_1}$ – внешняя нормаль к границе ствола Γ_1 ; $\partial / \partial n \Big|_{\Gamma_2}$ – внешняя нормаль к границе вентиля-

ляционного канала Γ_2 ; T_4, T_5 – температуры воздуха в стволе и вентиляционном канале, °С; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи через стенки ствола и вентиляционного канала, Вт/(м²·К).

В начальный момент времени задаются распределения температур горных пород и воздуха внутри ствола и вентиляционного канала.

Коэффициент конвективного теплообмена поверхности грунта с атмосферным воздухом рассчитывается по формуле [Куртнер, Чудновский, 1969]

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

где v – скорость ветра, м/с.

Коэффициент теплоотдачи α_1 определяется из известной формулы теории теплопередачи при турбулентном течении воздуха [Щербань и др., 1977]:

$$Nu = 0.0195 \varepsilon Re^{0.8},$$

где Nu – критерий Нуссельта, $Nu = \alpha_1 R_1 / \lambda_0$; ε – коэффициент шероховатости стенок выработки; Re – критерий Рейнольдса, $Re = \rho_0 v_0 R_1 / \mu$; 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; R_1 – радиус ствола, м.

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 [Anderson, Morgenstern, 1973]:

$$W_1(T) = \begin{cases} W_2, & T \leq T_1; \\ (W - W_2) \left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \right)^n + W_2, & T_1 < T < T_2; \\ W, & T \geq T_2, \end{cases}$$

где W – суммарная влажность, д. ед.; W_2 – влажность за счет прочносвязанной воды, д. ед.; T_2 – температура начала замерзания воды в породе, °С; T_1 – температура полного замерзания воды в породе, °С; n – эмпирический параметр.

Температуры фазовых переходов рассолов зависят от концентрации солей и определяются по формуле [Ивата, 1974; Попов, Курилко, 2006]

$$T_2 = \frac{273.15}{L} \left(273.15R \ln \left(\frac{1 - \kappa C'}{1 - C'} \right) + \Psi_1 - \Psi_2 \right),$$

где R – газовая постоянная, равная $8.314 \cdot 10^3$ Дж/(К·кмоль); κ – коэффициент захвата солей поверхностью льда, д. 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 следующим формулам:

$$C(T) = \begin{cases} (C_1 + 2260(W - W_2) + 4212W_2)\rho, & T \leq T_1; \\ \left(C_1 + 2260(W - W_1) + 4212W_1 + L \frac{\partial W_1}{\partial T} \right) \rho, & T_1 < T < T_2; \\ (C_1 + 4212W)\rho, & T \geq T_2; \end{cases}$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T \leq T_1; \\ \lambda_1 + \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(T - T_1)}{T_2 - T_1}, & T_1 < T < T_2; \\ \lambda_2, & T \geq T_2, \end{cases}$$

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 применяются численные методы сквозного счета [Самарский, Моисеенко, 1965; Самарский, 1983; Самарский, Вабищевич, 2003].

Для решения трехмерной задачи теплообмена использован метод суммарной аппроксимации [Яненко, 1967; Самарский, Вабищевич, 2003], который сводит исходную задачу к последовательности одномерных задач. 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.

ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА КОПРОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Основной проблемой при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в криолитозоне является поддержание требуемого температурного режима грунтов, обеспечивающее тем самым несущую способность свайных фундаментов и, как следствие, устойчивость и долговечность любых строительных конструкций. Острота этого момента ощущается практически на всех промышленных площадках АК «АЛРОСА», где строительство горно-технических объектов невозможно без применения специальных мероприятий, обеспечивающих их устойчивость. Особенно это характерно для сооружений поверхностных комплексов рудников и в большей степени стволов, оснащен-

ных подъемными установками, свайные фундаменты и устьевые части которых подвергаются техногенному растеплению в процессе ведения проходческого и строительных работ, а также в период эксплуатации. Причинами растепления и оттаивания многолетнемерзлых грунтов являются: подача вентиляционного воздуха в рудник с круглогодичной положительной температурой; тепловое влияние обогреваемых зданий; высокая засоленность грунтов; воздействие атмосферного тепла в летний период.

Температурное поле в породном массиве, вмещающем ствол, определяется взаимодействием тепловых потоков, идущих от него, и влиянием дневной поверхности. В подземные горные выработки через вентиляционный канал и ствол круглогодично подается чистый теплый воздух. Положительный температурный режим рудника в зимний период обеспечивается калориферными установками. Все это вызывает растепление окружающих горных пород, негативно сказывающееся на их устойчивости. Ввиду длительного срока воздействия, как показала практика, применение только пассивной теплоизоляции однозначно не приведет к желаемым результатам. Для предотвращения негативных воздействий теплового потока, идущего от ствола, предусматривается расположение вокруг ствола замораживающих установок, которые при этом обеспечивают повышение несущей способности массива горных пород.

Поверхностные комплексы рудников включают громоздкие копры, свайные поля которых расположены вокруг вертикальных стволов и испытывают огромную нагрузку от их давления. Под надшахтное здание стволов устанавливаются буронабивные сваи диаметром 650 мм, длиной 16 м. В связи с этим устойчивость копров гарантирована только при стабильной отрицательной температуре грунтов, обеспечивающей круглогодичное нахождение их в мерзлом состоянии, несмотря на негативное воздействие растепляющих факторов. Поддержание горных пород в основании фундаментов копров и устьевой части стволов в мерзлом состоянии осуществляется с помощью системы принудительного замораживания, состоящей из станции, галереи рассолопроводов, колонок. Общее количество замораживающих колонок в галерее заморозки зависит от диаметра ствола и изменяется от 12 до 56 м при длине 15–40 м. Эксплуатация замораживающей станции предусмотрена в течение всего срока существования рудника, включение и выключение ее производится на основании температуры по показаниям датчиков, установленных в термометрических скважинах.

Разработанная математическая модель применялась при определении режима работы замораживающей системы, обеспечивающей мерзлое состояние грунтов в основании фундамента копров и

устьевой части стволов на алмазодобывающих рудниках АК «АЛРОСА» [Хохолов и др., 2016].

С началом работы замораживающей системы происходит постепенное охлаждение, а затем и промерзание породного массива, окружающего вертикальный ствол и свайный фундамент копра. Однако полное промораживание его недопустимо, так как имеющийся опыт свидетельствует, что в целях предотвращения деформирования и разрушения бетонной крепи ствола сдвиговыми напряжениями, возникающими в процессе замерзания пород в закрепном пространстве, необходимо наличие в нем демпфирующей талой кольцеобразной зоны вокруг ствола. По оценкам ряда исследователей [Слепцов и др., 1996; Крамсков, 2004], необходимая минимальная мощность такой зоны колеблется от 0.5 до 1.0 м. Поэтому работу замораживающей станции следует организовать таким образом, чтобы не допустить перемораживания пород демпфирующей зоны и в то же время поддерживать мерзлое состояние пород свайного фундамента копра, обеспечивая его проектную несущую способность.

При выполнении расчетов были рассмотрены различные режимы работы замораживающей системы, а именно: два значения температуры охлаждения хладагента -15 , -20 °С и три значения температуры в стволе: $+5$, $+10$ и $+15$ °С. В результате вычислительных экспериментов выбраны наиболее рациональные режимы работы замораживающей системы, при которых обеспечивается наличие демпфирующего талого кольца вокруг ствола размером не менее 0.5 м.

Например, для условий ВВС рудника «Удачный» при температуре воздуха в нем $+10$ °С и температуре хладоносителя в колонках -15 °С наиболее рациональным следует считать режим, при котором замораживающая система работает в течение 5 месяцев с последующим месячным перерывом и т. д.

На рис. 3, а приведены температурные изолинии, полученные по результатам расчетов температурных полей вокруг ВВС, по горизонтальной плоскости на глубине 27 м, а на рис. 3, б – температурные изолинии по вертикальной плоскости.

Как видно на рис. 3, а, на глубине 27 м вокруг ствола при указанном режиме работы замораживающей станции через 4 года может возникнуть кольцеобразная мерзлая зона с температурой пород -6 ... -8 °С. Расчетами установлено, что существенное тепловое влияние на окружающий породный массив стволов оказывает вентиляционный канал. Однако, как показали расчеты несущих характеристик свай, замораживающие скважины, располагаемые рядом со сваями в соответствии с проектом, позволяют поддерживать грунты в стабильном мерзлом состоянии и обеспечить их необходимую несущую способность.

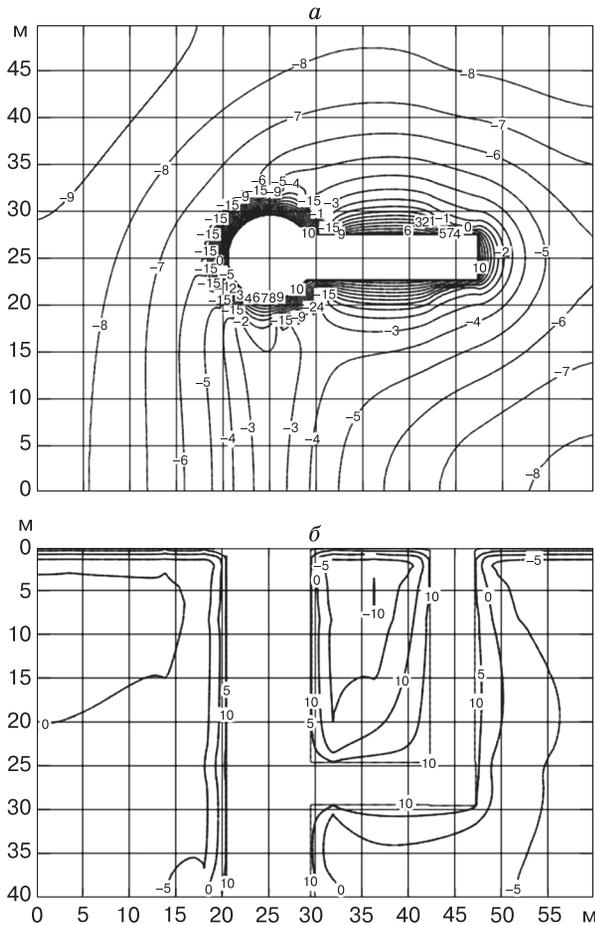


Рис. 3. Температурное поле (°С) вокруг вспомогательного вентиляционного ствола на конец четвертого года эксплуатации замораживающей системы.

a – сечение на глубине 27 м; *b* – сечение через ось ствола параллельно оси вентиляционного канала.

На рис. 4 приведена динамика развития ореолов протаивания пород вокруг ствола ВВС на разных глубинах. Из-за близкого расположения замораживающих скважин заметны колебания размеров ореолов протаивания при включении–выключении замораживающей системы.

Система автоматизированного термоконтроля, состоящая из вертикальных и горизонтальных скважин, необходима для обеспечения стабильной требуемой температуры грунтов в местах расположения свайного фундамента и устьевой части крепи вертикального ствола.

Вертикальные термометрические скважины должны располагаться в соответствии с расчетом возможности обеспечения контроля каждого куста свайного поля, т. е. по две скважины на куст. Глубина термометрических скважин должна соответствовать длине свай. Температурные датчики располагаются в следующем порядке: первый датчик устанавливается на нулевой отметке грунта, остальные – через 1 м по всей длине скважины. Для предотвращения деформирования и разрушения крепи стволов сдвиговыми напряжениями, возникающими в процессе замерзания пород в закрепном пространстве, необходимо наличие в нем демпфирующей талой кольцеобразной зоны. Следовательно, требуется оборудовать дополнительные термометрические скважины для мониторинга температурного режима породного массива между крепью ствола и замораживающими колонками и демпфирующей зоны, а также для обеспечения оптимального режима работы замораживающей системы. Расположение горизонтальных скважин необходимо выполнять на основе результатов численных модельных экспериментов с учетом криогидрогеохимических условий прилегающего породного массива и особенностей системы заморозки ствола.

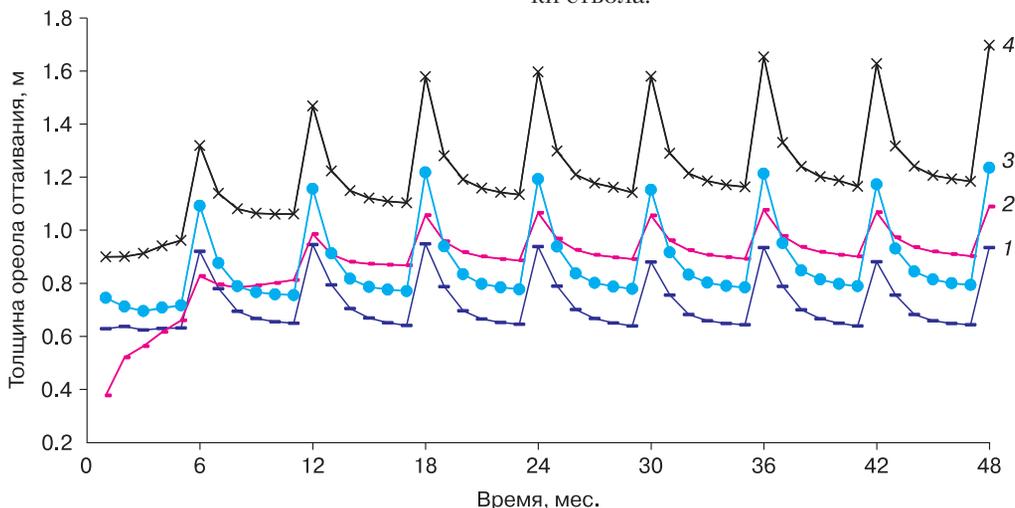


Рис. 4. Динамика ореолов протаивания пород вокруг вспомогательного вентиляционного ствола.

Замораживающая система работает 5 месяцев с перерывом 1 месяц; температура в стволе +10 °С; температура замораживания –15 °С. Глубина: 1 – 14 м; 2 – 27 м; 3 – 30 м; 4 – 37 м.

Для примера рассмотрим характер изменения геометрических параметров ореола протаивания вокруг ствола ВВС рудника “Удачный” и определения отметки ярусов расположения горизонтальных термометрических скважин в момент отключения замораживающей станции. Расчеты проводились при следующих исходных параметрах: температура воздуха в стволе +15 °С, температура хладоносителя в замораживающих колонках –20 °С. Режим эксплуатации станции: 5 месяцев работает, 1 месяц отключена. Как видно на рис. 5, ореол протаивания (нулевая изотерма) смещается в глубь породного массива практически параллельно поверхности закрепленного ствола, за исключением нижней части, где происходит его расширение, связанное с тем, что данная область находится под замораживающими колонками и их влияние на теплопритоки от ствола ослабевает.

Исходя из результатов численного моделирования, для организации автоматизированного контроля температуры грунтов горизонтальными скважинами устьевой части ствола ВВС предлагаются следующие мероприятия. Для измерения температуры устьевой части ствола необходимо оборудовать три яруса горизонтальных термометрических скважин на отметках 8, 18 и 35 м от земной поверхности (выше и ниже уровня вентиляционного канала). В качестве обсадки скважин рекомендуется использовать металлические трубы, обладающие высокими прочностными свойствами, что важно при их установке в скважины, а также в последующей эксплуатации. Длина термометрических скважин должна быть 2.5 м. В каждую термометрическую скважину необходимо установить термогирлянды с 8 температурными датчиками. Датчики надо располагать в следующем порядке: первый размещается на контакте крепь–воздух; второй – на контакте крепь–порода на глубине 0.5 м, третий – на глубине 0.75 м, четвертый – 1.0 м, пятый – 1.25 м, шестой – 1.5 м, седьмой – 2.0 м, восьмой – 2.5 м.

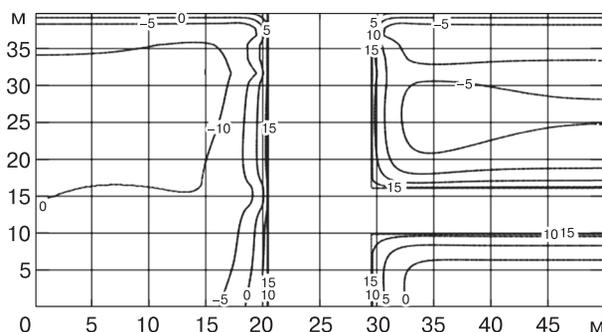


Рис. 5. Температурное поле (°С) вокруг вспомогательного вентиляционного ствола через 30 суток после отключения замораживающей системы.

Автоматизированная система термоконтроля на рудниках позволяет снимать данные температурных датчиков и производить пересчет показаний с различной частотой по времени. Как известно, процессы теплообмена в породном массиве довольно инерционны и скорости изменения температуры относительно невелики, поэтому для определения оптимального периода проведения температурных замеров были выполнены численные расчеты, позволяющие спрогнозировать скорость движения нулевой изотермы в моменты времени, когда замораживающая система работает или отключена.

На рис. 6 представлены результаты модельных расчетов по стволу ВВС рудника “Удачный”, которые проводились при следующих исходных параметрах: температура подаваемого в ствол воздуха +10 °С, температура хладоносителя в замораживающих колонках –20 °С. Режим эксплуатации замораживающей станции: 2 месяца работает, 2 месяца отключена. Как видно на рис. 6, изменение размеров ореола протаивания за 1 месяц носит плавный характер, без резких понижений и подъемов температуры грунтов. При работе замораживающей станции за месячный период размер ореола протаивания уменьшился с 1.34 до 0.88 м, т. е. в среднем за неделю его уменьшение составило 0.11 м. Чуть менее интенсивно идет движение нулевой изотермы при отключении замораживающей станции, а также происходит некоторая стабилизация нулевой изотермы в последующие несколько дней, затем начинается ее плавный рост.

Таким образом, исходя из результатов численного моделирования изменения скорости движения нулевой изотермы, можно сделать вывод, что для оперативного мониторинга температурного поля в устьевой части стволов достаточно производить замеры с периодичностью 1 раз в неделю. Контроль температурного состояния грунтов в основаниях фундаментов копров (хотя здесь, в отличие от тепловых притоков в устьевых частях стволов, отсутствуют мощные источники тепла) также достаточно проводить 1 раз в неделю для отражения полной картины температурного поля на всем контролируемом участке.

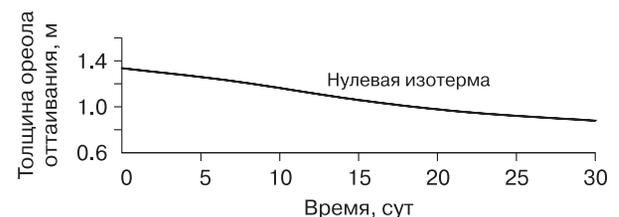


Рис. 6. Изменение размеров ореола протаивания пород вокруг вспомогательного вентиляционного ствола рудника “Удачный” при работе замораживающей станции.

ВЫВОДЫ

Анализ проведенных инженерно-геологических изысканий на промплощадках рудников АК “АЛРОСА” показал, что грунты основания башенных копров вертикальных стволов обладают различной степенью засоленности: от слабо- до сильнозасоленных. Химический анализ водных вытяжек грунтов рудника “Удачный” имеет хлоридно-кальциевый тип засоления. Поэтому можно утверждать, что загрязнение верхнего криогенного интервала произошло вследствие разлива шахтных вод и инфильтрации их в грунты основания сооружений на промплощадке.

Разработанная трехмерная математическая модель теплообмена грунтов под основанием башенных копров с учетом их засоленности, параметров замораживающей системы (температуры хладоносителя, длины замораживающих скважин, их количества и места расположения), температуры атмосферного воздуха, температуры воздуха в стволе и др., позволяет моделировать процесс промерзания–протаивания порового раствора мерзлого грунта в спектре возможных температур при изменении теплофизических свойств и общей засоленности по глубине.

По результатам многовариантных расчетов выбраны наиболее рациональные режимы работы замораживающей системы, при которых обеспечиваются требуемые отрицательные температуры засоленных грунтов в основании фундамента копров и поддержание деформирующего талого кольца вокруг ствола размером не менее 0.5 м.

Изложены результаты численных расчетов, позволяющих спрогнозировать скорость движения нулевой изотермы в породном массиве, вмещающем устьевую часть каждого ствола, и определен оптимальный период проведения температурных замеров. Разработаны рекомендации по эксплуатации систем термоконтроля в основаниях фундаментов и устьевых частей стволов рудников на период их эксплуатации.

Литература

- Балобаев В.Т., Девяткин В.Н.** Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии // Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1983, с. 22–34.
- Balobaev, V.T., Devyatkin, V.N., 1983. Periglacial and geothermal conditions in Western Yakutia, in: Thermal Studies of Permafrost in Siberia. Nauka, Novosibirsk, pp. 22–34. (in Russian)
- 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.
- Iwata, S., 1974. The amount of unfrozen water in partly frozen soil as a function of initial water content, in: Proc. 10th Intern. Congress of Soil Scientists. Book 1: Soil Physics and Technology, Nauka, Moscow, pp. 56–61.
- Крамсков Н.П.** Устойчивость копров вертикальных стволов – основа промышленной безопасности алмазодобывающих рудников // Наука и образование, 2004, № 1, с. 27–34.
- Kramskov, N.P., 2004. Stability of headframes above vertical shafts as a base for work safety at diamond mines. Nauka i Obrazovaniye, No. 1, 27–34.
- Кургенер Д.А.** Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте / Д.А. Кургенер, А.Ф. Чудновский. Л., Гидрометеиздат, 1969, 299 с.
- Kurtener, D.A., Chudnovsky, A.F., 1969. Design and Management of the Thermal Regime in Open and Insulated Ground. Gidrometeizdat, Leningrad, 299 pp. (in Russian)
- Пермяков П.П.** Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне / П.П. Пермяков, А.П. Амосов. Новосибирск, Наука, 2003, 224 с.
- Permyakov, P.P., Amosov, A.P., 2003. Forward Modeling of Man-caused Pollution in Permafrost. Nauka, Novosibirsk, 224 pp. (in Russian)
- Пивоварова З.И.** Радиационные характеристики климата СССР / З.И. Пивоварова. Л., Гидрометеиздат, 1977, 335 с.
- Pivovarova, Z.I., 1977. Radiation Heat and Climate of the USSR Territory. Gidrometeizdat, Leningrad, 335 pp. (in Russian)
- Попов В.И., Курилко А.С.** Решение задач теплопереноса при промерзании–оттаивании горных пород с учетом уравнения фазового состояния поровой влаги // ГИАБ. Тематическое прил. “Физика горных пород”, 2006, с. 236–244.
- Popov, V.I., Kurilko, A.S., 2006. Solving heat and mass transfer problems for cases of freezing and thawing of rocks, with regard to the phase state equation of pore water, in: Rock Physics, GIAB Suppl., pp. 236–244. (in Russian)
- Самарский А.А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. М., Наука, 1983, 616 с.
- Samarsky, A.A., 1983. Theory of Finite-Difference Schemes. Nauka, Moscow, 616 pp. (in Russian)
- Самарский А.А.** Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.
- Samarsky, A.A., Vabishchevich, P.N., 2003. Heat Transfer Modeling. URSS Editorial, Moscow, 784 pp. (in Russian)
- Самарский А.А., Моисеенко Б.Д.** Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычислит. мат. и мат. физики, 1965, т. 5, № 5, с. 816–827.
- Samarsky, A.A., Moiseenko, B.D., 1965. A low-cost Godunov’s scheme for a multidimensional Stefan problem. Zhurn. Vychislit. Mat. i Mat. Fiziki 5 (5), 816–827.
- Слепцов В.И.** Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах / В.И. Слепцов, С.Д. Мордовской, В.Ю. Изаксон. Новосибирск, Наука, 1996, 104 с.
- Sleptsov, V.I., Mordovskoi, S.D., Izakson, V.Yu., 1996. Modeling of Heat Transfer in Permafrost. Nauka, Novosibirsk, 104 pp. (in Russian)
- Фотиев С.М.** Геокриологические условия Средней Сибири / С.М. Фотиев, Н.С. Данилова, Н.С. Шевелева. М., Наука, 1974, 146 с.
- Fotiev, S.M., Danilova, N.S., Sheveleva, N.S., 1974. Geocryology of Central Siberia. Nauka, Moscow, 146 pp. (in Russian)
- Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Соловьев Д.Е.** Расчет температурного поля засоленных горных пород в устьевой части вертикального ствола при работе замораживающей системы // ФТПРПИ, 2016, № 3, с. 176–184.

- Khokholov, Yu.A., Kurilko, A.S., Soloviev, D.E., 2016. Modeling the temperature field of saline soils at the vertical shaft collar during the operation of a freezing system. FTPrPI, No. 3, 176–184.
- Щербань А.Н.** Руководство по регулированию теплового режима шахт / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко. М., Недра, 1977, 359 с.
- Shcherban, A.N., Kremnev, O.A., Zhuravlenko, V.Ya., 1977. Temperature Control in Mines. A Manual. Nedra, Moscow, 359 pp. (in Russian)
- Яненко Н.Н.** Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н.Н. Яненко. Новосибирск, Наука, 1967, 196 с.
- Yanenko, N.N., 1967. The Fractional Step Method for Multidimensional Problems of Mathematical Physics. Nauka, Novosibirsk, 196 pp. (in Russian)
- Anderson, D., Morgenstern, N.** Physic, chemistry and mechanic of frozen ground // Permafrost. Second Intern. Conference. Yakutsk, USSR, 1973, p. 257–288.

*Поступила в редакцию
25 января 2016 г.*