

УДК 624.139:536.24

Ю.А. Хохолов, А.С. Курилко, В.И. Попов, В.К. Ёлшин

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ПОД ОСНОВАНИЕМ ФУНДАМЕНТОВ КОПРОВ РУДНИКА «УДАЧНЫЙ» С УЧЕТОМ ИХ ЗАСОЛЕННОСТИ

Приведена трехмерная математическая модель теплообмена грунтов под основанием башенных копров. Модель учитывает температуру замораживающей жидкости, длину замораживающих скважин, их количество и место расположения, температуру атмосферного воздуха и температуру воздуха в стволе, слоистость и засоленность вмещающих пород, а также содержание незамерзшей воды.

Ключевые слова: математическая модель, башенные копры, промораживание грунтов, рудник «Удачный».

Семинар № 18

В процессе строительства стволов рудника «Удачный» АК «АЛРОСА» наблюдается засоление грунтовых площадок в районе расположения башенных копров при выдаче горной массы, вынимаемой из подмерзлотных водоносных горизонтов. Как показали исследования, происходит прогрессирующее засоление площадок расположения башенных копров. Анализируя степень минерализации воды за период 2003-2007 гг., сделан вывод, что минерализация воды увеличивалась от 0,903 г/л (пресные) в 2003г. до 6,538 г/л (сильносолоноватые) в 2004 г., а в настоящее время уже преобладают солёные воды (29,232 г/л – 39,545 г/л), в пробах рассола минерализация достигает 52,322 г/л [1]. Засолённость грунтов та же по химическому составу, что и вода в них – хлоридно-кальциевая. Засолённость имеет различную степень – от слабой до сильной. Миграция солей в основании башенных копров может вызвать ухудшение устойчивости грунтов оснований за счет их оттаивания, сни-

жения несущей способности с негативным влиянием на работоспособность конструкций и механизмов копров.

Для обеспечения устойчивости башенных копров необходимо грунты их оснований сохранять в мерзлом состоянии. В скиповом стволе (СС) и фланговом вспомогательном стволе (ВВС) при эксплуатации круглогодично поддерживается положительный температурный режим, что вызывает растепление окружающих горных пород, негативно сказывающееся на их устойчивости. Для отсекания теплового потока идущего от стволов предусматривается расположение вокруг стволов охлаждающих устройств. Задачей охлаждающих устройств является также повышение несущей способности массива горных пород, в котором установлены сваи фундамента копра. Таким образом охлаждающие устройства, устанавливаемые для промораживания грунтов, должны обеспечивать не только отрицательную температуру пород, но и необходимый температурный режим, позво-

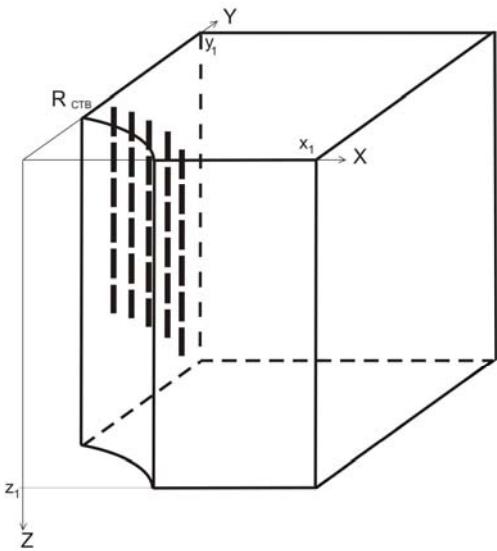


Рис. 1. Трехмерная область для расчета температурного режима грунтов в основании башенных копров

ляющий заморозить и засоленные горные породы, к которым относятся грунты оснований башенных копров рудника «Удачный».

Для управления температурным режимом грунтов оснований башенных копров и обеспечения их устойчивости разработана трехмерная математическая модель теплообмена грунтов оснований башенных копров с учетом температуры замораживающей жидкости, длины замораживающих скважин, их количества и места расположения, температуры атмосферного воздуха, температуры воздуха в стволе, слоистости и степени засоленности вмещающих пород.

Для прогноза тепловых условий выделим расчетную область, которая соответствует четверти исходной области (рис. 1). Постановку задачи осуществим с учетом процессов промерзания-протаивания влаги в горных породах, теплообмена охлаждающих устройств с окружающими горными породами, теплообмена воздуха с

322

внутренней поверхностью ствола и влияния дневной поверхности. Область, занятую массивом горных пород, обозначим через Ω . Численная реализация многомерных задач Стефана обычно осуществляется методом сглаживания [2]. Это равносильно предположению, что фазовый переход происходит не при одной определенной температуре T_ϕ , а в некотором интервале температур, длина которого определяется величиной параметра сглаживания. При численном эксперименте обычно задают различные значения этого параметра, изменяется 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 содержание незамерзшей воды увеличивается. В таких средах свободная вода замерзает при температуре $T_\phi = 0^\circ\text{C}$, а остальная вода (связанная) кристаллизуется по мере понижения температуры среды. При этом 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 [3]. Преимуществом данного подхода является то, что не нужно выбирать параметр сглаживания. Данный подход позволяет строить разностные схемы со сглаженны-

ми 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 тепломассообмена в мерзлых грунтах при использовании экономичных аддитивных локально-одномерных разностных схем.

Для решения задачи теплопроводности используем естественный метод сглаживания с использованием функции незамерзшей воды [2]:

$$\begin{aligned} & \left[C(T) + L_{\phi} \cdot \rho \cdot \frac{\partial W_{HB}}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (1) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (x, y, z) \in \Omega, \end{aligned}$$

где C - объемная теплоемкость породы, Дж/(м³·К); T - температура горных пород, °C; L_{ϕ} - теплота фазовых переходов воды, Дж/кг; W_{HB} - количество незамерзшей воды, доли единицы; 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)

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad x = 0, \quad R_{ctv} \leq y \leq y_1, \quad (2)$$

$$0 \leq z \leq z_1;$$

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

$$0 \leq z \leq z_1;$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad R_{ctv} \leq x \leq x_1, \quad y = 0, \quad (4)$$

$$0 \leq z \leq z_1;$$

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

$$0 \leq z \leq z_1;$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad R_{ctv} \leq x \leq x_1, \quad (6)$$

$$R_{ctv} \leq y \leq y_1, \quad z = z_1,$$

где R_{ctv} – радиус ствола, м; x_1, y_1, z_1 – предельные координаты области, м.

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

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1 \cdot (T - T_1), \quad R_{ctv} \leq x \leq x_1, \quad (7)$$

$$R_{ctv} \leq y \leq y_1, \quad z = 0,$$

где α_1 – коэффициент теплообмена поверхности земли с атмосферным воздухом, Вт/(м²·К); T_1 – температура наружного воздуха, °C.

На внутренней поверхности ствола задается граничное условие III рода:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma_k}} = \alpha \cdot (T - T_2), \quad (8)$$

$$x^2 + y^2 = R_{ctv}^2, \quad x \geq 0, \quad y \geq 0;$$

где через $\partial / \partial n_{\Gamma_k}$ обозначена внешняя нормаль к границе; T_2 – температура воздуха в стволе, °C; α – коэффициент теплоотдачи через стенки ствола, Вт/(м²·К).

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

$$T = \tilde{\varphi}(x, y, z), \quad R_{ctv} \leq x \leq x_1, \quad (9)$$

$$R_{ctv} \leq y \leq y_1, \quad 0 \leq z \leq z_1$$

Коэффициент конвективного теплообмена поверхности грунта с атмосферным воздухом рассчитаем по формуле [4]:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 6.16 + 4.19v, & 0 < v < 5; \\ 7.56v^{0.78}, & 5 < v < 30; \end{cases} \quad (10)$$

где v – скорость ветра, м/с.

Для расчета α необходимы данные о снежном покрове по месяцам, а именно высота снежного покрова и коэффициент теплопроводности снега. Коэффициент теплопроводности снежного покрова зависит от температуры и плотности. На основе большого объема экспериментальных материалов в работе [5] получены следующие осредненные зависимости для нахождения расчетных значений коэффициента теплопроводности снежного покрова:

$$\lambda_+ = \begin{cases} 1.165\rho, & T_{\%} > -10^{\circ}\text{C}; \\ 1.035\rho, & -10^{\circ}\text{C} \geq T_{\%} \geq -20^{\circ}\text{C}; \\ 0.907\rho, & T_{\%} < -20^{\circ}\text{C}; \end{cases} \quad (11)$$

ρ_c - плотность снежного покрова, $\text{г}/\text{см}^3$.

Наличие охлаждающих устройств учитывается заданием температуры охлаждения в соответствующих координатах. На рис. 1 охлаждающие устройства показаны пунктирной линией.

Для аппроксимации кривой незамерзшей воды имеется множество различных формул. Наиболее распространение получила следующая формула [6]:

$$W_{hb}(T) = \begin{cases} 0, & T \leq T_k; \\ W \left(\frac{T - T_h}{T_k - T_h} \right)^n, & T_k < T < T_h; \\ W, & T \geq T_h; \end{cases} \quad (12)$$

где W - суммарная влажность, доли ед.; T_h - температура начала замерзания влаги в грунте, $^{\circ}\text{C}$; T_k - температура полного замерзания влаги в грунте, $^{\circ}\text{C}$; n - эмпирический параметр. Температуры фазовых переходов зависят от концентрации солей и определяются по формуле:

$$T_f = \frac{273,15^2}{L} (R \ln(1 - C) + \Psi_l - \Psi_w), \quad (13)$$

где R - газовая постоянная, равная $8,314 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$; C - молярная концентрация раствора, Ψ_l , Ψ_w - потенциалы взаимодействия поверхности горной породы со льдом и водой соответственно [7].

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

$$C_{\phi}(T) = \begin{cases} (C_{ck} + 2260 \cdot W)\rho, & T \leq T_k; \\ (C_{ck} + 2260 \cdot (W - W_{h3})) + \\ + 4212W_{h3} + L_{\phi} \frac{\partial W_{hb}}{\partial T}\rho, & T_k < T < T_h; \\ (C_{ck} + 4212 \cdot W)\rho, & T \geq T_h. \end{cases} \quad (14)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T \leq T_k; \\ \lambda_1 + \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(T - T_k)}{T_h - T_k}, & T_k < T < T_h; \\ \lambda_2, & T \geq T_h, \end{cases} \quad (15)$$

где C_{ck} - удельная теплоемкость скелета грунта, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; λ_1 - коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; λ_2 - коэффициент теплопроводности талого грунта, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Для решения одномерной задачи промерзания-протаивания в постановке вида (3.1) обычно используются численные методы сквозного счета [2, 8].

Трехмерную область Ω заменим дискретной областью $W_x \times W_y \times W_z$. По всем направлениям введем равномерную сетку с шагом h :

$$W_x = \{x_i = x_{i-1} + h_x, \quad i = \overline{1, N},$$

$$x_1 = 0, \quad x_N = x_1\},$$

$$W_y = \{y_j = y_{j-1} + h_y, \quad j = \overline{1, M},$$

$$y_1 = 0, \quad y_M = y_1\},$$

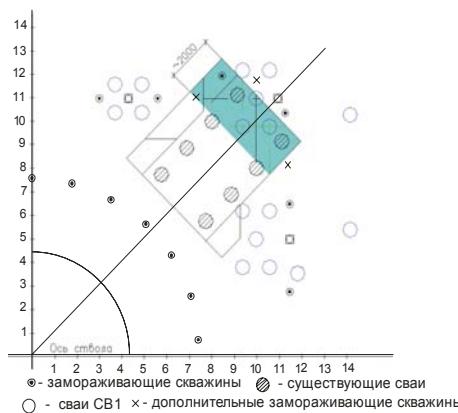


Рис. 2. Схема расположения замораживающих скважин вокруг фундамента копров

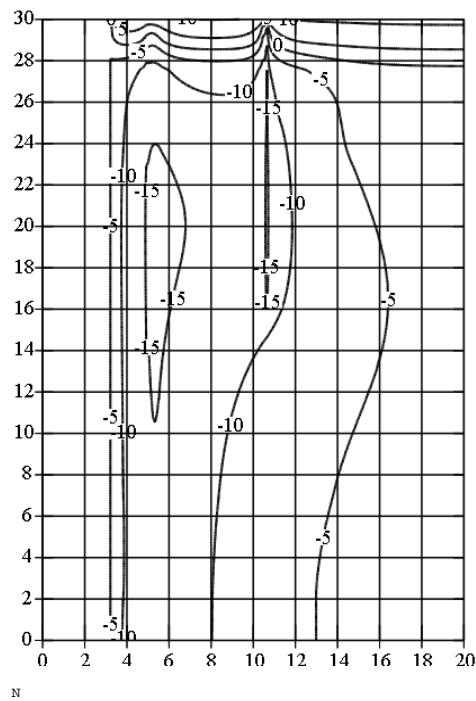


Рис. 3. Температурные изолинии грунтов по вертикальной плоскости через 3 года (проектный вариант)

$$W_z = \{z_k = z_{k-1} + h_z, \quad k = \overline{1, K},$$

$$z_1 = 0, \quad z_K = z_1\}$$

где h_x - шаг сетки по направлению x , м; h_y - шаг сетки по направлению y , м; h_z - шаг сетки по направлению z , м; i - номер узла сетки по направлению x ; j - номер узла сетки по направлению y ; k - номер узла сетки по направлению z ; N - количество узлов сетки по направлению x ; M - количество узлов сетки по направлению y ; K - количество узлов сетки по направлению z .

Для решения трехмерной задачи теплообмена использован метод суммарной аппроксимации [10-12], 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.

Используя значения из предыдущего слоя, находим распределения температур решением систем уравнений по направлению x . Полученные значения температуры будут начальными данными для решения системы уравнений по направлению y , т.е. система уравнений решается при начальных данных, полученных в результате решения предыдущей системы уравнений по направлению x . Аналогично система решается по направлению z . Система разностных уравнений решается методом простой итерации с применением метода прогонки. Полученное решение является искомым решением на новом временном слое.

Методика позволяет рассчитать распределение незамерзшей воды во всей области, что наглядно показывает степень промораживания массива горных пород.

Температура воздуха в стволе принята равной температуре наружного воздуха, если она находится в

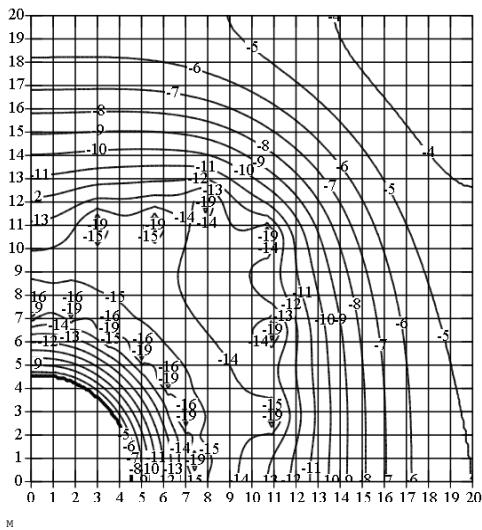


Рис. 4. Температурные изолинии грунтов на глубине 20 м через 3 года (проектный вариант)

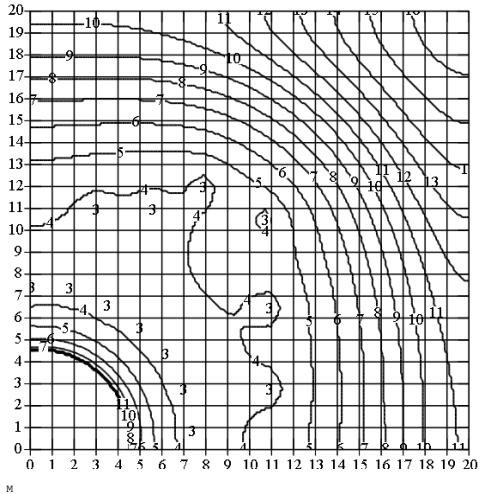


Рис. 5. Изолинии незамерзшей воды на глубине 20 м через 3 года (проектный вариант)

пределах от -5°C до $+5^{\circ}\text{C}$. Когда температура воздуха превышает границы этого интервала, то температура воздуха в стволе принимается равной граничному значению.

По проекту к существующим сваям (на рисунке они отмечены штриховкой)

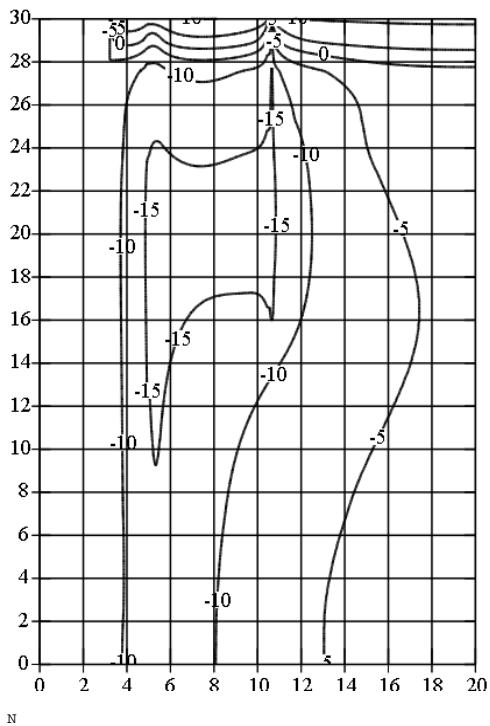


Рис. 6. Температурные изолинии грунтов по вертикальной плоскости через 3 года (вариант с дополнительными ОУ)

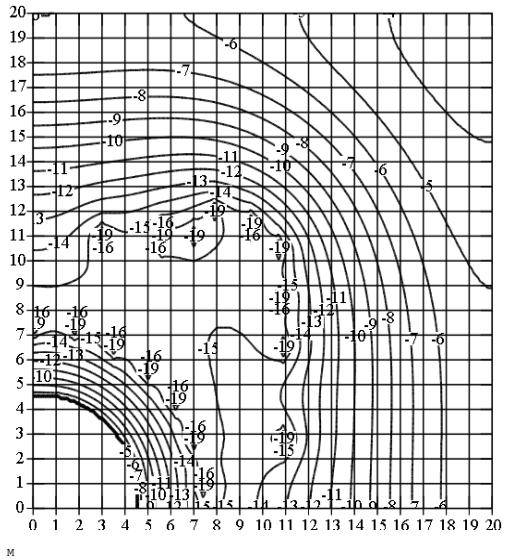


Рис. 7. Температурные изолинии грунтов на глубине 20 м через 3 года (вариант с дополнительными ОУ)

должны быть установлены дополнительные сваи основания башенного копра (рис. 2). Также на рисунке показаны замораживающие устройства, необходимые для поддержания массива пород под основанием фундамента в мерзлом состоянии.

Были проведены расчеты температурного режима грунтов под основанием фундамента для проектного варианта. На рис. 3 приведены температурные изолинии по вертикальной (диагональной) плоскости через 3 года. На рис. 4 приведены температурные изолинии по горизонтальной плоскости на глубине 20 м, а на рис. 5 показано распределение незамерзшей воды на той же глубине. Расчеты показали, что в районе свай вокруг области с центром (9 м, 9 м) количество незамерзшей воды составляет 5%. Расположение охлаждающих устройств вокруг фундамента копра обеспечивает замораживание грунтов до температуры минус 14°C, что значительно ниже температуры замерзания засоленных грунтов и должно обеспечить устойчивость свай фундамента копра, т.е. при нынешнем фактическом состоянии засоленности грунтов замораживание обеспечивает необходимую устойчивость фундамента копров. Однако при повышении содержания соли за счет её миграции количество незамерзшей воды может увеличиться, что приведет к снижению устойчивости. Для предотвращения данного нежелательного явления необходимо добавить количество замораживающих устройств (рис. 2). В этом случае, как показали расчеты, температура пород в районе фундамента копра снижается до минус 15°C (рис. 6 и 7), а количество незамерзшей воды снижается до 4% (рис. 8) и дальнейшее понижение температуры практически не влияет на количество незамерзшей воды. При

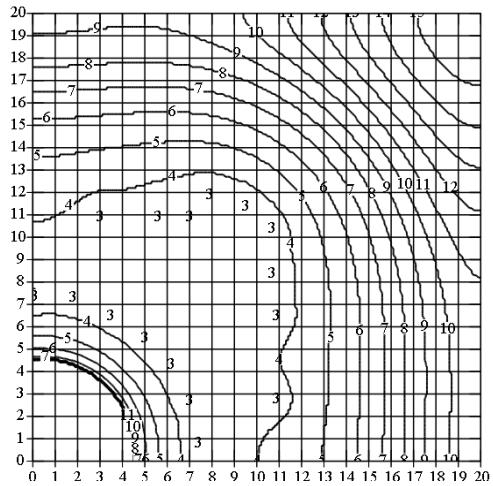


Рис. 8. Изолинии незамерзшей воды на глубине 20 м через 3 года (вариант с дополнительными ОУ)

этом согласно СНиПу 2.02.04-88 расчетные значения сопротивления грунтов нормальному давлению и сдвигу по поверхности смерзания надлежит принимать, как правило, по опытным данным.

Следует отметить, что замораживание грунтов предотвращает миграции солей, поскольку интенсивность массообменных процессов значительно снижается при понижении температуры грунта. На промплощадке имеются участки с повышенным содержанием солей и поэтому необходим мониторинг за состоянием грунтов под основанием башенных копров для разработки мероприятий по предотвращению попадания высокоминерализованных рассолов в грунты вокруг стволов и обеспечению устойчивости фундаментов копров. Полученные значения температуры грунта в районе расположения свай фундамента должны сверяться с результатами моделирования, и при необходимости корректироваться работа охлаждающих устройств для обеспечения заданных температурных условий.

Таким образом, установка дополнительных охлаждающих устройств снижает температуру грунта под основанием фундаментов копра, и соответственно, количество незамерзшей воды.

Однако при этом согласно СНиПу 2.02.04-88 значения сопротивления грунтов нормальному давлению и сдвигу по поверхности смерзания должны определяться опытным путем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудник «Удачный». Надшахтные комплексы стволов ВВС и СС. Инженерно-геологические и геофизические изыскания. Инженерно-геологические работы [Текст] / АК АЛРОСА (ЗАО), Институт «Якутияпроалмаз». -2008.-62 с.
2. Самарский, А.А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана [Текст] / А.А. Самарский, Б.Д. Моисеенко // Журнал вычисл. мат. и мат. физики. - 1965. - Т. 5, №5. - С. 816-827.
3. Пермяков, П.П. Математическое моделирование техногенного загрязнения в криолитозоне [Текст] / П.П.Пермяков, А.П.Аммосов. – Новосибирск: Наука, 2003. -224с.
4. Куртенер Д.А. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте [Текст] / Д.А.Куртенер, А.Ф.Чудновский. - Л.: Гидрометеоиздат, 1969. -299 с.
5. Павлов А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы [Текст] / А.В.Павлов. - Новосибирск: Наука, 1980. - 240 с.
6. Anderson D. Physic, Chemistry and mechanic of frozen Ground [Text]/ D.Anderson, N.Morgenstern // Permafrost. Second Int. Conference. 1973. – Yakutsk, USSR. – 1973. –P.257-288.
7. Ивата С. Количественная зависимость незамерзшей воды в частично замерзшей почве от исходной влажности [Текст] / С. Ивата. // Труды X Международного конгресса почвоведов. т. 1: Физика и технология почв. - М.: Наука, 1974.- С. 56-61.
8. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики [Текст] / А.Н.Тихонов, А.А.Самарский. - М.: Наука, 1977. - 736 с.
9. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача [Текст] / А.А.Самарский, П.Н.Вабищевич– М.: Едиториал УРСС, 2003. -784 с.
10. Самарский А.А. Теория разностных схем [Текст] / А.А.Самарский. - М., Наука, 1983. - 616 с.
11. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики [Текст] / Н.Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Хохолов Ю.А. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Курилко А.С. - доктор технических наук, зав. лабораторией горной теплофизики,
Попов В.И. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Ёлшин В.К. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН,
E-mail: khokholov@igds.yasn.ru

