

УДК 519.62

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Местников А.Е.

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск,
e-mail: mestnikovae@mail.ru

В статье приводятся результаты по разработке алгоритмов выбора оптимальных параметров теплоизоляции горных выработок в условиях многолетней мерзлоты (криолитозоны). При этом допускается оттаивание мерзлых пород на максимальную глубину за определенный срок эксплуатации. При решении задач учитывается сильная знакопеременность теплового режима в устьевой части воздухоподающих горных выработок. Предлагаемые алгоритмы явились теоретической основой для разработки метода оценки эксплуатационной эффективности теплоизоляционных материалов в горных выработках криолитозоны. Для управления тепловым режимом вмещающих многолетнемерзлых горных пород используются эффективные теплоизоляционные материалы (легкие бетоны с пористыми заполнителями и полимерные теплоизоляционные материалы). Выбор материала и толщины теплоизоляции определяется из условия недопущения или сохранения глубины протаивания многолетнемерзлых пород в заданный период эксплуатации. Разработанные математические модели с достаточной точностью позволяют решать актуальные задачи горной теплофизики, в том числе для оценки эксплуатационной эффективности теплоизоляционных материалов в составе конструкций крепежных элементов с целью сохранения устойчивости горных выработок криолитозоны. На основе результатов математического моделирования предложен инженерный метод определения оптимальных параметров теплоизоляции горных выработок в условиях криолитозоны.

Ключевые слова: математическое моделирование, мерзлые породы, теплоизоляция, знакопеременность теплового режима, заданная глубина оттаивания, фазовый переход, задачи Стефана, алгоритмы решения

EVALUATION OF THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF THERMAL INSULATION MATERIALS IN CRYOLITHOZONE MINE WORKINGS

Mestnikov A.E.

North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, e-mail: mestnikovae@mail.ru

The article presents the results of the development of algorithms for selecting the optimal parameters of thermal insulation of mine workings in the conditions of permafrost (cryolithozone). At the same time, it is allowed to thaw frozen rocks to the maximum depth for a certain period of operation. When solving the problems, a strong sign-change of the thermal regime in the mouth of the air-supplying mine workings is taken into account. The proposed algorithms were the theoretical basis for the development of a method for evaluating the operational efficiency of thermal insulation materials in the cryolithozone mine workings. Effective thermal insulation materials (light concrete with porous aggregates and polymer thermal insulation materials) are used to control the thermal regime of permafrost rocks. The choice of material and thickness of thermal insulation is determined from the condition of preventing or maintaining the depth of thawing of permafrost during a given period of operation. The developed mathematical models with sufficient accuracy allow us to solve current problems of mining thermophysics, including for evaluating the operational efficiency of thermal insulation materials as part of the structures of fasteners in order to preserve the stability of the cryolithozone mine workings. Based on the results of mathematical modeling, an engineering method for determining the optimal parameters of thermal insulation of mine workings in the conditions of the cryolithozone is proposed.

Keywords: mathematical modeling, frozen rocks, thermal insulation, thermal regime alternation, specified thaw depth, phase transition, Stefan problems, solution algorithms

Промышленное освоение территории и недр в районах многолетней мерзлоты (криолитозоны) неизбежно приводит к нарушению естественного процесса тепло-массообмена грунтов с атмосферой. В строительстве горных выработок в криолитозоне для уменьшения или предотвращения протаивания мерзлых горных пород с целью повышения их устойчивости обычно используются теплозащитные крепи и системы [1, 2].

Исследованиям систем и методики регулирования теплового режима горных выработок в криолитозоне посвящены научные

разработки Института горного дела Севера СО РАН [3, 4]. Однако предложенные методики не дают полной возможности полноценного решения всех разновидностей задач теплофизики для горных выработок в условиях криолитозоны [5]. Например, при расчете вентиляционных систем шахт и рудников не всегда в полной мере учитываются особенности теплообмена воздуха с вмещающим массивом горных пород, фазовых переходов в них в процессе изменения теплового режима подачи воздушных масс.

Математическое моделирование тепловых процессов в горных породах и вы-

работках позволяет оценить не только их криогенность, устойчивость, прочность и другие параметры для производства горных работ [6, 7], но и установить эксплуатационную эффективность использования теплоизоляционных материалов в составе теплозащитных крепей.

Целью исследовательской работы является разработка инженерного метода определения оптимальных параметров теплоизоляции горных выработок в условиях криолитозоны на основе результатов математического моделирования.

Материалы и методы исследования

В условиях криолитозоны основным условием обеспечения устойчивости подземных сооружений является сохранение вечномерзлого состояния вмещающих горных пород в течение определенного срока их эксплуатации. В основном для управления тепловым режимом вмещающих многолетнемерзлых горных пород используются эффективные теплоизоляционные материалы (легкие бетоны с пористыми заполнителями и полимерные теплоизоляционные материалы) [8]. Выбор материала и толщины теплоизоляции определяется из условия недопущения или сохранения глубины протаивания многолетнемерзлых пород в заданный период эксплуатации.

Ниже приведены результаты математического моделирования тепловых процессов в подземных выработках криолитозоны с учетом фазовых переходов в многолетнемерзлых горных породах. Разработанные модели с достаточной точностью позволяют решить актуальные задачи эффективности использования теплоизоляционных материалов для снижения глубины протаивания, а также условия, не допускающие оттаивания мерзлого грунта, в определенный срок эксплуатации горных выработок в условиях криолитозоны.

Математические модели также могут использоваться для оценки эксплуатационной эффективности теплоизоляционных материалов в составе конструкций крепежных элементов с целью сохранения устойчивости горных выработок криолитозоны.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Алгоритм для определения оптимальной толщины теплоизоляционного слоя, не допускающего оттаивания

Распределение температуры в горных породах вокруг подземных сооружений в толще многолетней мерзлоты с высокой вероятностью может быть описано линейным уравнением теплопроводности

$$c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{x^v} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^v \cdot \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right), x \in (r_0, R), \tau > 0. \quad (1)$$

Допустим, что в исходный момент времени $t = 0$ многолетнемерзлый массив имеет температуру

$$t(x, 0) = t_0(x), x \in (r_0, R). \quad (2)$$

Допуская, что R – достаточно большая величина, граничное условие при $x = R$ можно задать в следующем виде

$$t(R, \tau) = t_0(R), \tau > 0. \quad (3)$$

Предполагая, что заданный теплоизоляционный слой рассматривается как термическое сопротивление, граничное условие при $x = r_0$ будет иметь вид

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha(t - t_b(\tau)), x = r_0, \tau > 0. \quad (4)$$

Здесь

$$\alpha = \begin{cases} \left[\frac{1}{\alpha} + \sum_i \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} \right], v = 0 \\ \left[\frac{1}{\bar{\alpha} \cdot d_1 \cdot \pi} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из}} \ln \left(1 + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} \right) \right]^{-1}, v = 1, \\ \left[\frac{1}{\bar{\alpha} \cdot d_1^2 \cdot \lambda_{из}} + \frac{\delta_{из}}{2\pi \cdot \lambda_{из} (d_1 + d_{из})} \right]^{-1}, v = 2. \end{cases} \quad (5)$$

Далее следует уточнить значение величины α , удовлетворяющей требованиям

$$\sup_{\tau \in [0, t]} t(r_0, \tau) = t^* \quad (6)$$

где t^* – показатель температуры, при которой мерзлые горные породы переходят в другое фазовое состояние (оттаивание льда в горных породах).

Следует отметить, что искомая функция $t(x, \tau)$ зависит от α , поскольку управление температурным полем горных пород проводится изменением α . Таким образом, уравнение (6) следует изменить на другой вид

$$\sup_{\tau \in [0, t]} t(r_0, \tau, \alpha) = t^* \quad (7)$$

Далее следует уточнить постоянную α – корень трансцендентного уравнения (7), где $t(r_0, \tau, \alpha)$ – значение решения краевой задачи (1)–(4) при $x = r_0, t > 0$.

Решаем поставленную задачу с применением метода «секущих»:

0 1

а) задавая α и α допустим, что $s = 0$;

s s

б) решается краевая задача применительно $t(x, \tau)$ с $\alpha = \alpha$

$$\left\{ \begin{array}{l} c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{x^v} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^v \cdot \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right), x \in (r_0, R), \tau > 0, t(R, \tau) = t_0(R), \tau > 0 \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \left(t - t_b(\tau) \right), x = r_0, \tau > 0, t(x, 0) = t_0(x), x \in [r_0, R], \end{array} \right. \quad (8)$$

в) определяем

$$\mu = \sup_{\tau} t \left(r_0, \tau, \alpha \right);$$

г) увеличиваем s на одну единицу $s = s + 1$;

д) при $s = 1$ переходим к решению пунктов б–г;

е) решаем методом «секущих» заданное приближение значения коэффициента теплопередачи:

$$\alpha = \alpha + (\alpha - \alpha)(t^* - \mu) / (\mu - \mu);$$

ж) проводим проверку условия

$$z = \left| \frac{s}{\alpha - \alpha} \right| = + \left| \frac{s-1}{\mu - \mu} \right| < (>) \varepsilon.$$

При $z > \varepsilon$ возвращаемся к решению пунктов б–ж. Иначе

$$\alpha = \alpha, t(x, \tau) = t(x, \tau), (x, t) \in [r_0, R] \times [0, T].$$

Далее определяем необходимую толщину теплоизоляционного слоя $\delta_{из}$ из выражения (5)

$$\delta_{из} = \begin{cases} \lambda_{из} / \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\bar{\alpha}} \right), v=0, \\ d_1 \left(\exp \left(\frac{2(\bar{\alpha} \cdot d_1 \cdot \pi - \alpha) d_{из}}{\alpha \cdot \bar{\alpha} \cdot d_1} - 1 \right) - 1 \right), v=1, \\ \left[\frac{1}{d_1} - \frac{\bar{\alpha} \cdot \alpha \cdot d_1^2}{2 \cdot d_1 \cdot \lambda_{из} (\alpha - \bar{\alpha} \cdot \pi \cdot d_1^2)} \right]^{-1}, v=2. \end{cases} \quad (9)$$

Для численного решения поставленной задачи (8) используем конечно-разностный метод.

Вводим разновидность произвольной квазиравномерной прямоугольной сетки

$$\bar{\omega}_{hk} = \begin{cases} x_i = x_{i-1} + h_i, i = \overline{1, N}; x_0 = r_0, x_N = R, \forall h_i > 0, i = \overline{0, N}; \\ \tau_j = \tau_{j-1} + k_j, j = \overline{1, j_0}, \tau_0 = 0, \tau_{j_0} = T, \forall k_j > 0, j = \overline{0, j_0}. \end{cases}$$

Краевой задаче (8) на сетке $\bar{\omega}_{hk}$ поставим в соответствие разностную схему

$$\begin{cases} c\gamma \frac{y_i - y_i^v}{k_j} x_i^v \cdot \eta_i = \left[x_{i+1/2}^v \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - x_{i-1/2}^v \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} \right], i = \overline{1, N-1}, j = 1, 2, \dots, y_N = t_0(x_N), \\ c\gamma \frac{y_0 - y_0^v}{k_j} x_0^v \cdot h_0 = \left[\lambda x_{1/2}^v \frac{y_1 - y_0}{h_1} - x_0^v \cdot \alpha (y_0 - t_b(\tau)) \right], y_i^0 = t_0(x_i), i = \overline{0, N}. \end{cases} \quad (10)$$

Из выражения (10) при каждом фиксированном j получаем трехточечное разностное уравнение

$$a_i y_{i-1} - c_i y_i + b_i y_{i+1} = -f_i, i = \overline{1, N-1}, y_0 = \alpha_1 y_1 + \beta_1, y_N = t_0(x),$$

которое решаем методом прогонки.

Здесь

$$a_i = \frac{\lambda x_{i-1/2}^v}{h_i}, b_i = \frac{\lambda x_{i+1/2}^v}{h_i}, c_i = a_i + b_i + \frac{c\gamma x_i^v \cdot \eta_i}{k_j}, f_i = \frac{c\gamma x_i^v \cdot \eta_i}{k_j} y_i^v,$$

$$\alpha_i = b_0 / \left(b_0 + \frac{c\gamma x_0^v \cdot \eta_0}{k_j} + x_0^v \cdot \alpha \right), \beta_i = \alpha_1 \left(x_0^v \cdot \alpha \cdot T_b(\tau) + \frac{c\gamma x_0^v \cdot \eta_0}{k_j} y_0^v \right) / b_0.$$

2. Алгоритм для определения параметров оптимальной теплоизоляции

На конкретном примере, когда слой теплоизоляционного материала рассматривается в качестве термического сопротивления, формулировка задачи выразится в следующем: определить оптимальный показатель коэффициента теплопередачи α , способствующего оттаиванию грунтового основания горной выработки на определенную глубину ξ_1 , не изменяющуюся за заданный срок эксплуатации при выполнении следующих условий:

$$\begin{aligned} \tilde{n}(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \frac{1}{x^{\nu}} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{\nu} \cdot g(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right), (x, \tau) \in \Omega_T = \{(r_0, R) \times (0, T)\}, \\ g(t) \frac{\partial t}{\partial x} &= \alpha (t - t_0(\tau)), x = r_0, t(R, \tau) = t_0(R), \tau > 0, \\ \left[g(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] &= \chi \gamma \frac{d\xi}{d\tau}, x = \xi(0) = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$t = t^*, x = \xi(\tau), \tau > 0, t(x, 0) = t_0(x), x \in \bar{\Omega},$$

$$\begin{aligned} \sup_{[\tau \in T]} \xi(\tau) &= \xi_1, \end{aligned}$$

$$\text{где } c(t) = \begin{cases} c_m \gamma, t > t^* \\ c_M \gamma, t < t^* \end{cases} \quad g(t) = \begin{cases} \lambda_m, t > t^* \\ \lambda_M, t < t^* \end{cases}, \quad (12)$$

$\nu = 0, 1, 2$; ξ_1 – заданная величина максимальной глубины оттаивания.

Описанную задачу можно решать с использованием вышеизложенной методики, учитывая процессы с фазовым переходом.

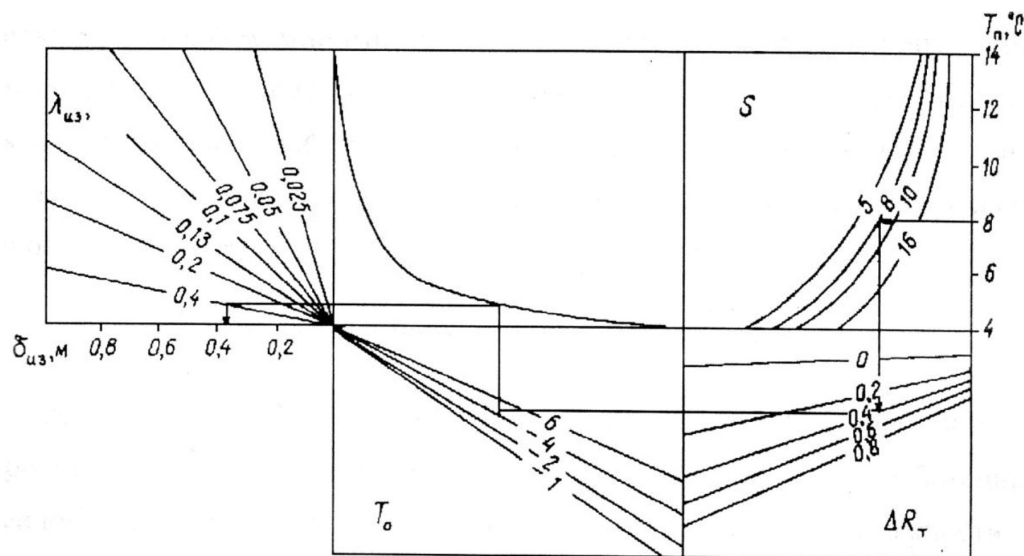
Достоверность выше рассмотренных алгоритмов проверена вычислительным экспериментом и сравнительным анализом полученных теоретических расчетов и фактических данных (таблица) Сангарской шахты Кобяйского района РС (Я) [9].

Фактические показатели температуры многолетнемерзлого массива приняты после 4–5 лет эксплуатации Сангарской шахты. В теоретических расчетах полученные результаты показали удовлетворительную сходимость с показателями натурных замеров температуры (таблица). Результаты математического моделирования тепловых

процессов в подземных выработках криолитозоны с учетом фазовых переходов в многолетнемерзлых горных породах позволили разработать инженерный метод расчета и оценки эксплуатационной эффективности теплоизоляционных материалов в составе конструкций крепежных элементов с целью сохранения устойчивости горных выработок криолитозоны. Метод позволяет оценить эффективность теплозащитных конструкций с использованием показателей термического сопротивления $R_k = \delta_{из} / \lambda_{из}$ в зависимости от сечения выработки S , теплового режима (приведенной температуры T_p), допустимой глубины оттаивания ΔR_d , естественной температуры массива T_e , толщины $\delta_{из}$ и коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя $\lambda_{из}$ (рисунок).

Распределение температуры в многолетнемерзлом массиве, °С (август)

Показатели	Расстояние от поверхности крепи, м								
	0,0	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,5	6,0	8,0
Фактические	5,2	5,2	2,8	1,6	-1,3	-1,2	-3,3	-3,3	-3,3
Теоретические	5,0	4,6	2,7	1,4	-1,5	-1,3	-3,0	-3,2	-3,1



Номограмма по выбору материала для эффективной теплоизоляции горных выработок криолитозоны

В номограмме (рисунок) заданы начальные условия эксплуатации горных выработок в условиях многолетнемерзлых грунтов: площади выработок $S = 5, 8, 10$ и 16 м^2 , приведенной температуры $T_p = 4, 6, 8, 10, 12$ и $14 \text{ }^\circ\text{C}$, допускаемой глубины оттаивания $\Delta R_d = 0, 0,2, 0,4, 0,6$ и $0,8 \text{ м}$, естественной температуры массива $T_e = -1, -2, -4$ и -6 , коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала $\lambda_{из} = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,13; 0,2; 0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, толщины теплоизоляционного слоя $\delta_{из} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и $1,0 \text{ м}$.

Например, толщина эффективного теплоизоляционного слоя из керамзитобетона с $\lambda_{из} = 0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ определяется следующим образом: для выработки площадью сечения 10 м^2 , пройденной в многолетних горных породах с температурой $T_e = -4 \text{ }^\circ\text{C}$, при следующих параметрах теплового режима воздуха: $t_b = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ и циклических изменениях температуры воздуха с амплитудой $A_{ин} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Допускаемая по несущей способности крепи глубина оттаивания составляет $\Delta R_d = 0,4 \text{ м}$. Требуемая при этом толщина легкого бетона составляет $0,4 \text{ м}$. А оптимальное термическое сопротивление теплоизоляции составляет $R_k = \delta_{из} / \lambda_{из} = 1,0 \text{ (м}\cdot\text{К)/Вт}$. На основе чего можно предложить более приемлемые варианты теплоизоляции, например, из напыляемого пенополиуретана с $\lambda_{из} = 0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Толщина теплоизоляции из него составит всего 4 см .

Закключение

Разработанные математические модели с достаточной точностью позволяют решать актуальные задачи горной теплофизики,

в том числе для оценки эксплуатационной эффективности теплоизоляционных материалов в составе конструкций крепежных элементов с целью сохранения устойчивости горных выработок криолитозоны.

Предложен инженерный метод определения оптимальных параметров теплоизоляции горных выработок в условиях криолитозоны.

Список литературы

1. Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2013. 185 с.
2. Галкин А.Ф. Повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне // Записки Горного института: Санкт-Петербургский горный институт. 2014. Т. 207. С. 99–102.
3. Курилко А.С., Ермаков С.А., Хохолов Ю.А., Каймонов М.В., Бураков А.М. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2011. 140 с.
4. Мордовской С.Д., Петров Е.Е., Изаксон В.Ю. Математическое моделирование двухфазной зоны при промерзании-протаивании многолетнемерзлых пород. Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1997. 120 с.
5. Ткач С.М., Курилко А.С., Романова Е.К. Роль теплофизических исследований в обеспечении эффективности и безопасности эксплуатации глубоких карьеров криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 11. Спец. вып. 56: Глубокие карьеры. С. 80–84.
6. Хохолов Ю.А., Курилко А.С. Математическое моделирование процессов теплообмена вентиляционного воздуха с горными породами в протяженных выработках шахт и рудников криолитозоны // Наука и образование. 2015. № 3. С. 50–54.
7. Галкин А.Ф., Курта И.В. Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 2. С. 82–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.
8. Романова У.К., Курилко А.С., Хохолов Ю.А. Регулирование теплового режима прибортового породного массива карьера криолитозоны с помощью гидро- и теплоизоляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S30. С. 379–386.
9. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. М.: Недра, 1968. 255 с.