

УДК 625.123 : 624.139.22

*ИСАКОВ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
mylab@ngs.ru*

ГУДКОВА ИРИНА НИКОЛАЕВНА, канд. экон. наук, доцент,

goodkova@ngs.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения,

630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук. 191

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ПРОХОДКЕ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

В статье приводится описание математической модели и алгоритма решения осесимметричной задачи по определению нестационарного теплового поля вокруг цилиндрической выработки. Отличительной особенностью предложенной модели является введение в постановку задачи теплового пограничного слоя воздуха на контакте с внутренней границей выработки. Алгоритм предложенной модели опробован на примере расчета глубины оттаивания горного массива на реальном объекте, расположенном в криолитозоне на территории Хабаровского края. По результатам расчета получены зависимости глубины оттаивания массива от толщины теплоизолирующего слоя за обделкой тоннеля. Приведены результаты расчета глубины оттаивания горного массива по длине тоннеля после завершения его строительства методом встречной проходки.

Ключевые слова: криолитозона; проходка тоннеля; оттаивание грунта; тепловой пограничный слой; уравнение теплопроводности.

ALEKSANDR L. ISAKOV, DSc, Professor,

mylab@ngs.ru

IRINA N. GUDKOVA, PhD, A/Professor,

goodkova@ngs.ru

Siberian Transport University,

191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia

DYNAMICS OF ROCK TEMPERATURE FIELD IN CRYOLITHIC ZONE TUNNELING

The paper describes the mathematical model and algorithm for solving the axisymmetric problem of determining the unsteady thermal field around a cylindrical mining. The proposed model is described by the introduction in it the thermal boundary layer at the inner boundary of mining interface. The algorithm of the proposed model is tested by the calculation of the real rock thaw penetration located in the permafrost zone in the Khabarovsk region. The depth of thaw penetration is determined depending on the thickness of the heat insulating layer beyond the tunnel lining. The paper also presents the results of the depth calculation for rock thaw penetration after the completion of the tunnel construction using the cross mining method.

Keywords: cryolithic zone; tunneling; thaw penetration; thermal boundary layer; thermal-conductivity equation

При сооружении транспортных тоннелей в районах распространения вечной мерзлоты необходимо учитывать их влияние на температурный режим многолетнемерзлых грунтов и, следовательно, на несущую способность

сооружений. Вопросам прогноза температурного поля при проходке горных выработок в криолитозоне посвящено значительное количество работ, например [1, 2].

Ниже приводится модель и алгоритм решения осесимметричной задачи по определению нестационарного теплового поля вокруг цилиндрической выработки, где теплообмен между стенками тоннеля и циркулирующим в нем воздушным потоком учитывается путем введения в модель теплового пограничного слоя.

Постановка задачи. Рассматриваемая область горного массива, окружающего цилиндрическую выработку (рис. 1), разбивается по радиусу на отдельные трубчатые элементы единичной длины с равной толщиной стенок (рис. 2).

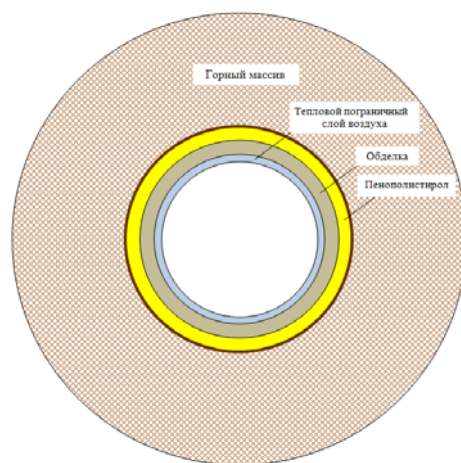


Рис. 1. Схема размещения слоев обделки тоннеля и пород окружающего его горного массива

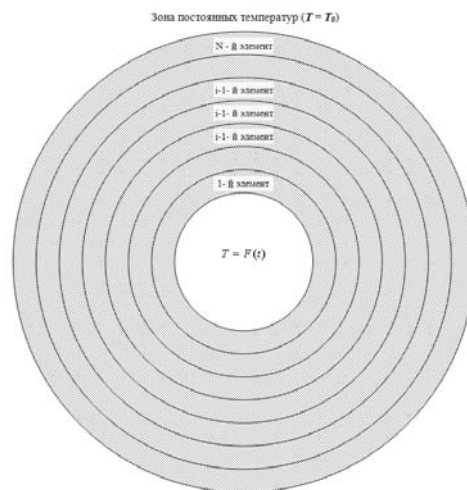


Рис. 2. Схема к дискретной модели задачи

Циркулирующую в тоннеле воздушную массу с заданной функцией изменения температуры $T_b(t) = F(t)$ от внутренней границы обделки отделяет тепловой пограничный слой воздуха толщиной h_b , где скорость перемещения воздуха равна нулю. На момент времени $t = 0$ задается температурное поле для всех N элементов среды. Температура N -го элемента на расстоянии нулевых амплитуд от границы полости постоянна во времени и равна T_0 . Требуется определить распределение температур в каждом элементе среды для произвольного значения времени t .

В данной постановке задачи предполагается, что поток тепла распространяется только в радиальном направлении для всей рассматриваемой области пространства (одномерная постановка) [3].

Размеры i -го элемента: Δh – толщина, $2\pi R_{i-1}$ – длина внутренней границы, $2\pi R_i$ – длина внешней границы, где $R_i = R_0 + i \cdot \Delta h$. Площадь внутренней поверхности такого элемента равна $S_{i,0} = 2\pi R_{i-1} \cdot 1 \text{ м}^2$, а внешней – $S_{i,1} = 2\pi R_i \cdot 1 \text{ м}^2$.

В этом случае количество тепла ΔQ_i , отданного или полученного i -м элементом за время Δt , равно

$$\Delta Q_i = (J_{i-1} \cdot S_{i,0} - J_{i+1} \cdot S_{i,1}) \Delta t, \quad (1)$$

где Δt – шаг по времени; J_{i-1} – поток тепла, проходящий через единицу площади от i -го к $(i-1)$ -му элементу в единицу времени

$$J_{i-1} = \lambda_{i-1} \frac{T_{i-1}(t) - T_i(t)}{\Delta h}, \quad (2)$$

а J_{i+1} – поток тепла, проходящий через единицу площади от $(i+1)$ -го к i -му элементу в единицу времени

$$J_{i+1} = \lambda_i \frac{T_i(t) - T_{i+1}(t)}{\Delta h}. \quad (3)$$

Закон сохранения энергии для i -го элемента записывается в виде

$$\Delta Q_i = m_i \cdot C_i [T_i(t) - T_i(t + \Delta t)] + Q_\Phi \cdot m_i \Big|_{T=T_\Phi}, \quad (4)$$

где $m_i = \pi \cdot \rho_i (R_i^2 - R_{i-1}^2) l$ – масса i -го элемента; T_Φ – температура фазового перехода (замерзания жидкости в грунте).

При подстановке формул (1–3) в (4) температура i -го элемента на шаге по времени $t + \Delta t$ определяется выражением (5)

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + 2a_i \left\{ \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} [T_{i-1}(t) - T_i(t)] R_{i-1} - [T_i(t) - T_{i+1}(t)] R_i \right\} \times \\ \times \frac{\Delta t}{\Delta h (R_i^2 - R_{i-1}^2)} + \frac{Q_\Phi(\Delta t)}{C_i} \Big|_{T=T_\Phi}, \quad (5)$$

где $a_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i C_i}$ – коэффициент температуропроводности i -го элемента; ρ_i –

плотность i -го элемента, кг/м³; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го элемента, Вт/(м·град); C_i – удельная теплоемкость i -го элемента, Дж/(кг·град).

Теплообмен между тепловым пограничным слоем и внутренней поверхностью тоннеля определяется уравнением сохранения энергии по аналогии с (4)

$$T_1(t + \Delta t) = T_1(t) + 2a_1 \left\{ \frac{\lambda_b}{\lambda_1} [T_{s,1}(t) - T_1(t)] R_0 - [T_1(t) - T_2(t)] R_1 \right\} \times \\ \times \frac{\Delta t}{\Delta h(R_1^2 - R_0^2)} + \frac{Q_\Phi(\Delta t)}{C_1} \Big|_{T=T_0}, \quad (6)$$

где $T_1(t)$ – температура на внутренней поверхности тоннеля, град; $T_{b,1}(t)$ – температура в 1-м элементе пограничного слоя воздуха, град; λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·град).

Теплообмен между внутренними элементами пограничного слоя воздуха определяется по аналогии с (5)

$$T_{b,i}(t + \Delta t) = T_{b,i}(t) + 2a_b \left\{ [T_{b,i-1}(t) - T_{b,i}(t)] R_{b,i-1} - [T_{b,i}(t) - T_{b,i+1}(t)] R_{b,i} \right\} \times \\ \times \frac{\Delta t}{\Delta h(R_{b,i-1}^2 - R_{b,i}^2)}, \quad (7)$$

где $a_b = \frac{\lambda_b}{\rho_b C_b}$ – коэффициент температуропроводности воздуха; ρ_b – плотность воздуха, кг/м³; C_b – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·град).

Теплофизические характеристики грунта задаются в зависимости от его влажности и агрегатного состояния содержащейся в нем воды: $\rho = \frac{\rho_s(1+W)}{1+e}$ –

плотность грунта, кг/м³; W – влажность грунта; e – коэффициент пористости грунта; $C_m = \frac{C_s + W \cdot C_b}{1+W}$ – удельная теплоемкость талого грунта;

$C_m = \frac{C_s + (W - W_n)C_l + W_n \cdot C_b}{1+W}$ – удельная теплоемкость мерзлого грунта;

$W_n = k_n \cdot W_p$ – относительное количество незамерзшей в грунте воды;

$a_t = \frac{\lambda_t}{\rho \cdot C_t}$ – коэффициент температуропроводности талого грунта;

$a_m = \frac{\lambda_m}{\rho \cdot C_m}$ – коэффициент температуропроводности мерзлого грунта;

$Q_{\phi} = Q_{\lambda} \frac{W - W_{н}}{1 + W}$ – удельная теплота фазового перехода в грунте, Дж/кг; Q_{λ} – удельная теплота плавления льда, Дж/кг.

Для каждого слоя из N трубчатых элементов среды температура определяется с помощью выражения (5) в двойном цикле – по радиусу с шагом Δh и времени с шагом Δt с использованием уравнений теплообмена с тепловым пограничным слоем воздуха (6) и (7).

Корректность вышеприведенного алгоритма обусловлена тем, что он базируется на основном законе всех физических процессов – законе сохранения энергии.

Данный алгоритм реализован в компьютерной программе Tube-1, разработанной на кафедре «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС. В качестве примера ниже приведен теплотехнический расчет, выполненный для тоннеля Верхнебуреинского района, расположенного на территории Хабаровского края.

Теплофизические характеристики грунта, задаваемые в программе:

- плотность твердых частиц или скелета грунта;
- коэффициент пористости;
- влажность;
- удельная теплоемкость твердых частиц;
- коэффициент теплопроводности грунта в обычном и мерзлом состоянии.

Теплофизические характеристики теплоизолирующих материалов в программе задаются следующими параметрами:

- плотность материала;
- удельная теплоемкость в обычном и мерзлом состоянии;
- коэффициент теплопроводности материала в обычном и мерзлом состоянии.

Форма задания теплофизических характеристик Пеноплекса 45 представлена на рис. 3.

Пенопласт Пеноплекс-45 ▾

– плотность, <кг / м3> Обновить

– влажность

– удельная теплоемкость, <Дж / кг / град>

– удельная теплоемкость в мерзлом состоянии, <Дж / кг / град>

– коэффициент теплопроводности, <Вт / м / град>

– коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии, <Вт / м / град>

– температура замерзания пенопласта, С

– температура оттаивания пенопласта, С

Рис. 3. Форма задания характеристик пенополистирола

Толщина обделки принята равной 0,5 м. Материал – бетон.

В качестве грунта заобделочного пространства взят гранит со следующими характеристиками:

– удельная теплоёмкость гранитов $C_T = 0,7$ кДж/(кг·К);

– коэффициент теплопроводности $\lambda_T = 2,0$ Вт/(м·К).

Температура горного массива принята равной минус 1,5 °С.

Температура воздуха внутри тоннеля в течение всего времени его проходки в программе задается в соответствии со следующей формой (рис. 4).

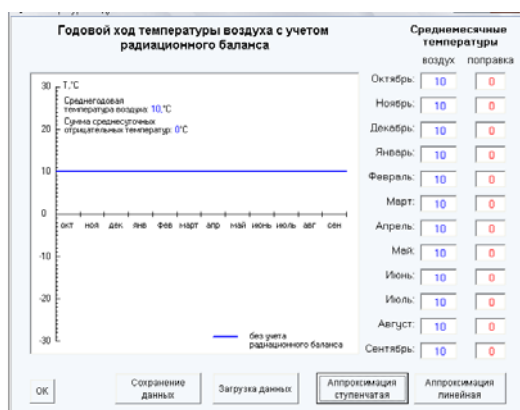


Рис. 4. Форма задания годовой температуры воздуха

Кроме температуры воздуха внутри тоннеля, граничными условиями задачи являются: радиус расчетной зоны, температура окружающего массива грунта, внутренний радиус тоннеля. Форма задания граничных условий в программе Tube-1 показана на рис. 5.

Граничные условия

- радиус расчетной зоны, м

- постоянная температура окружающего массива, С

- внутренний радиус трубы, м

Задание начальных данных Количество циклов:

Рис. 5. Граничные условия расчета

Главный экран интерфейса программной среды Tube-1 с представлением графиков распределения температуры в горном массиве по радиусу, изменения глубины оттаивания горного массива во времени и изменения температуры грунта во времени на различных расстояниях от внутренней границы приведен на рис. 6.

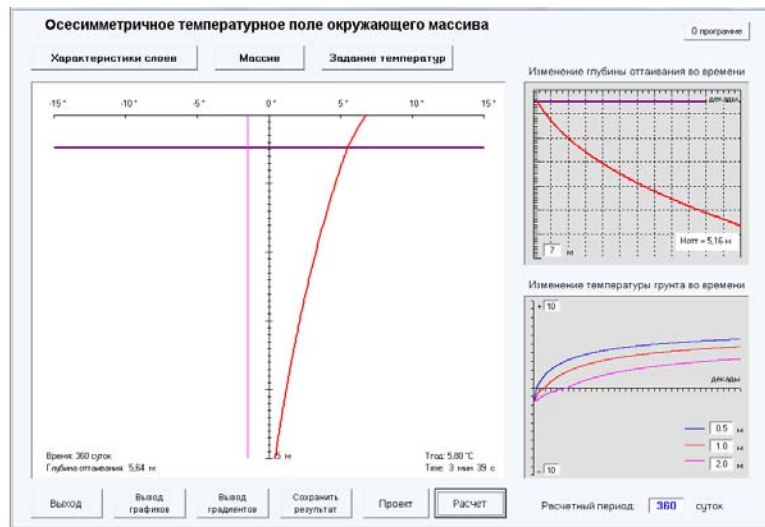


Рис. 6. Главный экран интерфейса программы Tube-1

По результатам расчета были получены графики глубины оттаивания горного массива по радиусу от обделки тоннеля при толщинах теплоизолирующего слоя из пенополистирола, варьирующихся в пределах от 4 до 40 см. По данным, приведенным на графиках, построена зависимость глубины деградации вечной мерзлоты в массиве грунта за обделкой тоннеля от толщины теплоизолирующего слоя по годам строительства тоннеля (рис. 7).

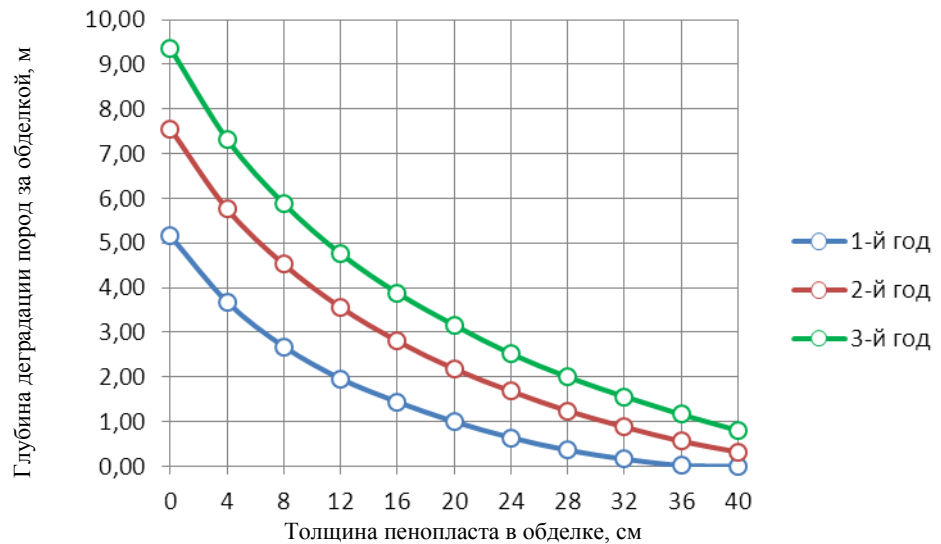


Рис. 7. Глубина деградации вечной мерзлоты за обделкой тоннеля при наличии теплоизолирующего слоя

Изменение температуры на поверхности обделки тоннеля без теплоизолирующего слоя в зависимости от времени при поддержании постоянной температуры воздуха в тоннеле показано на рис. 8.

На рис. 9 приведены результаты расчета оттаивания (деградации) заобделочного массива по длине тоннеля при встречной проходке со скоростью 30 м/мес.

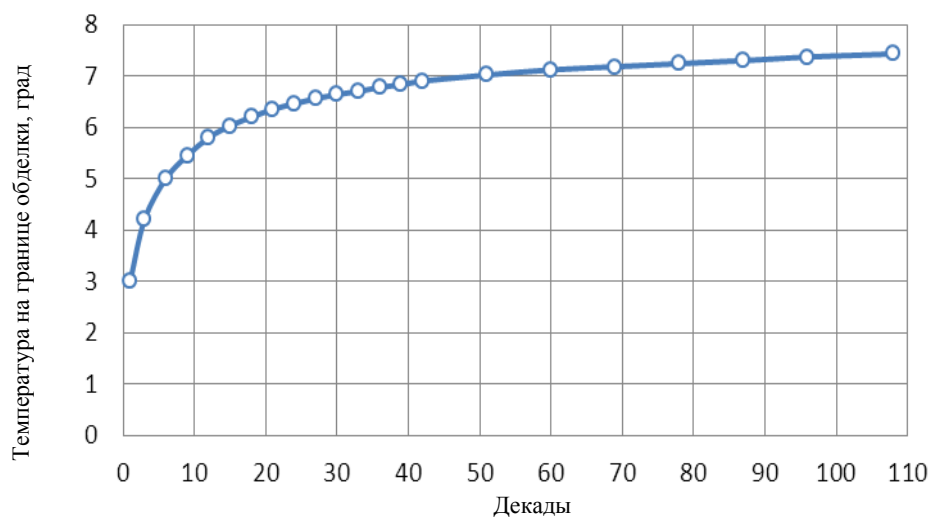


Рис. 8. Температура обделки на границе с пограничным слоем воздуха толщиной 2 см

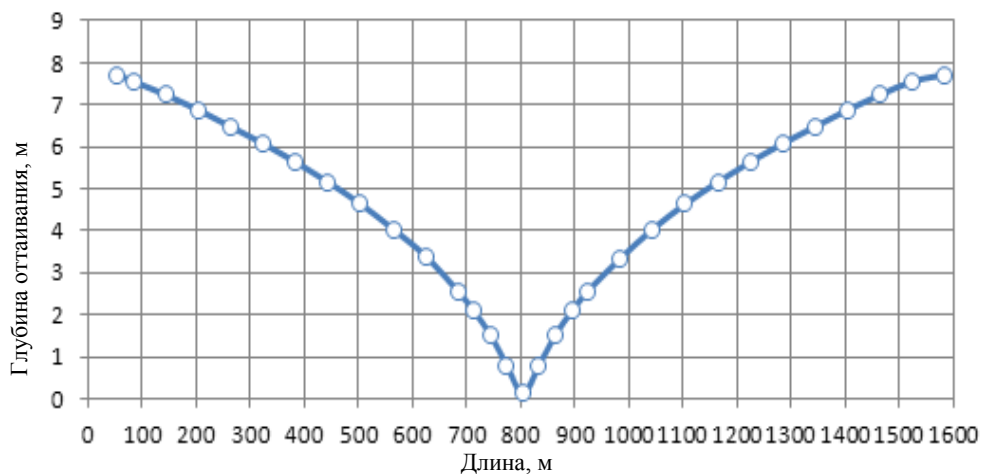


Рис. 9. Изолиния нулевых температур в горном массиве на момент завершения строительства тоннеля при встречной проходке со скоростью 30 м/мес

Выводы

Расчеты процесса оттаивания горных пород окружающего выработку массива показали, что за три года сооружения тоннеля, при поддержании в нем постоянной температуры воздуха +10 °С, максимальная глубина зоны деградации вечной мерзлоты составит около 9 м. Существенное уменьшение размеров этой зоны возможно при создании за обделкой тоннеля теплоизолирующего слоя из пенополистирола. Так, при толщине теплоизолирующего слоя 40 см максимальная глубина зоны оттаивания горных пород не будет превышать 1 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хохолов, Ю.А. Температурный режим многолетнемерзлого горного массива при ведении проходческих работ / Ю.А. Хохолов, Д.Е. Соловьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 4. – С. 177–182.
2. Соловьев, Д.Е. Тепловой режим в горной выработке при ведении проходческих работ в условиях криолитозоны / Д.Е. Соловьев // Молодой ученый. – 2011. – № 12. – Т. 1. – С. 53–55.
3. Исаков, А.Л. Теплофизическая дискретная модель промерзания грунта земляного полотна / А.Л. Исаков, Ким Хюн Чол // Транспорт Урала. Вып. 2(33). – Екатеринбург, 2012. – С. 121–124.

REFERENCES

1. Khokholov Y.A., Solov'ev D.E. Temperaturnyi rezhim mnogoletnemerzlogo gornogo massiva pri vedenii prokhodcheskikh rabot [Temperature conditions in permafrost during narrow works]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009, No. 4, Pp. 270–275. (rus)
2. Solov'ev D.E. Teplovoi rezhim v gornoi vyrobotke pri vedenii prokhodcheskikh rabot v usloviyakh kriolitozony [Thermal conditions of mining during narrow works in cryolithic zone]. *Molodoi uchenyi*. 2011, V. 1. No 12. Pp. 53–55. (rus)
3. Isakov A.L., Kim Khyun Chol. Teplofizicheskaya diskretnaya model' promerzaniya grunta zemlyanogo polotna [Thermal discrete model of subgrade freezing]. *Transport of the Urals*, 2013. No. 2. Pp. 121–124. (rus)