

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ОДНОПУТНОГО ТОННЕЛЯ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ СТАНЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТА АДИАБАТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА**

*Елена Леонидовна Алферова*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: alferova\_el@mail.ru

*Екатерина Андреевна Моисеева*

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, Россия, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, магистрант, тел. (913)381-20-20, e-mail: katarinamois@gmail.com

Определен тепловой баланс для однопутного тоннеля метрополитена и прилегающей станции в теплый период года на примере Московского метрополитена. Для определения теплопотерь в грунт при различной глубине заложения тоннеля был проведен расчет нестационарного теплового потока с использованием программной реализации расчета теплопередачи методом конечных элементов. Определен сдвиг по фазе между колебаниями температуры атмосферного воздуха и теплового потока в грунт, который необходимо учитывать при определении расчетного теплового баланса и воздухообмена. Теплоизбытки в тоннеле в теплый период таковы, что для их удаления не всегда хватает ресурса вентиляционного оборудования, поэтому часть теплоизбытков предлагается компенсировать при помощи адиабатического увлажнения воздуха. Для повышения эффективности такого способа охлаждения воздуха возможно распределять по длине тоннеля расход воды пропорционально распределению тепла. С этой целью был проведен численный эксперимент с обдуванием пуско-тормозных резисторов вагонов в однопутном тоннеле и найдено распределение тепла по длине тоннеля.

**Ключевые слова:** метрополитен, теплоизбытки, теплопотери, вентиляция, охлаждение воздуха.

## **DETERMINATION OF HEAT BALANCE OF SINGLE-TRACK TUNNEL AND ADJOINING STATION FOR CALCULATION OF ADIABATIC COOLING OF AIR**

*Elena L. Alferova*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: alferova@mosk.ru

*Ekaterina A. Moiseeva*

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia, Graduate, phone: (913)381-20-20, e-mail: katarinamois@gmail.com

Heat balance for single-track tunnel of underground and adjoining station in warm period of year in terms of Moscow Underground is determined. The calculation of unsteady heat flow is carried out, using software realization of heat transfer calculation by finite elements method, for heat losses determination into the soil at various depth of the tunnel. The phase difference between fluc-

tuations of ambient air temperature and heat flow temperature is determined that should be considered for determination of calculated heat balance and air exchange. In warm period excessive heat in the tunnel cannot be fully removed by ventilation equipment, therefore it is proposed reducing of part of the excessive heat by adiabatic air humidification. In order to efficiency improvement of that method of air cooling, water discharge can be distributed along the tunnel proportionally of heat distribution. With that purpose the numeric experiment with air blowing of car starting-breaking resistors in single-truck tunnel has been carried out. Heat distribution along the tunnel has been found.

**Key words:** Underground, excessive heat, heat losses, ventilation, air cooling.

### *Введение*

Основной задачей тоннельной вентиляции является поддержание воздушно-теплового баланса в тоннеле. Воздухообмен в тоннеле в большинстве случаев определяется необходимостью удаления теплоизбытков, которые зависят от внутренних и внешних факторов. К внутренним относятся: частота движения, скорость и масса поездов, пассажиропоток, освещенность тоннеля, оборудование; ко внешним: регион прокладки метрополитена, глубина заложения, теплофизические свойства грунтов и их гидрогеология. Теплотери, в основном, это потери тепла в грунтовой массив, окружающий тоннель. Исследованию теплового режима в тоннелях посвящены работы [1-7]. Из теплоступлений и теплотерь выводится тепловой баланс. По требованиям [8], при расчете вентиляции, необходимо определять нестационарный тепловой поток из тоннелей в грунт в теплый период года, а также из грунта в тоннели в холодный период года. Для метрополитенов мелкого заложения, из-за небольшой толщины слоя грунта до поверхности, возникает опосредованный теплообмен с атмосферным воздухом через грунт, способный достигать существенных значений. Все тепло, что не ушло в грунт, требуется удалять средствами тоннельной вентиляции, то есть подавать необходимое для охлаждения тоннеля количество наружного воздуха.

### *Методы и материалы*

Тепловыделения определяются известными методами по [9-10]. Они складываются из тепловыделений от поездов, людей, освещения, оборудования.

Для расчета теплотерь строительные и конструктивные особенности тоннеля приняты по [9]. Рассмотрен тоннель, диаметром 5100 мм. Расчет нестационарного теплового потока проведен с использованием программной реализации расчета теплопередачи методом конечных элементов. Такой способ расчета уже использовался при исследованиях тепловых потоков для однопутных тоннелей лабораторией рудничной аэродинамики Института горного дела СО РАН и их результаты показали хорошую сходимость с натурными экспериментами [5-7].

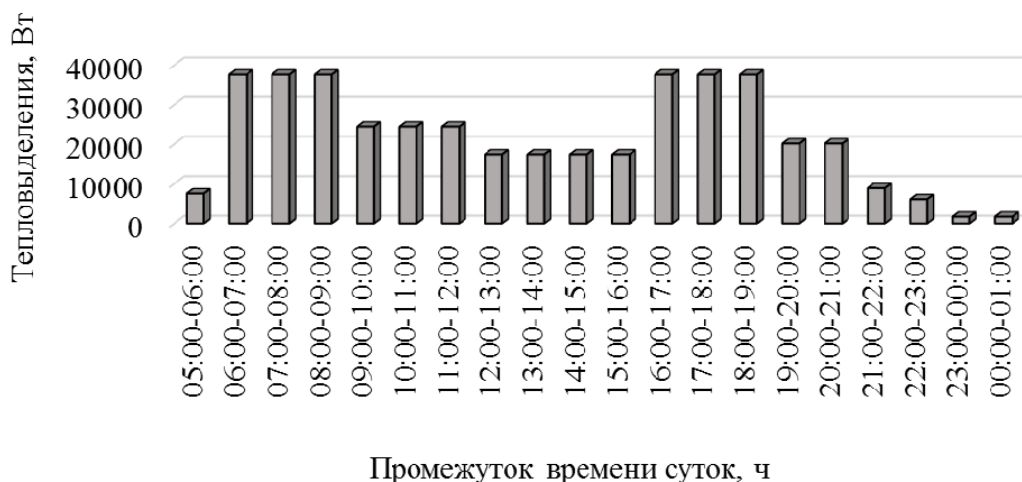


Рис. 1. Суммарные тепловыделения в тоннеле

На рис. 2 изображена геометрическая модель исследуемой области «тоннель-грунт» и указаны граничные и начальные условия. Габариты расчетной области заданы в соответствии с предварительно определенной зоной прогретого грунта [5, 9], что позволило минимизировать размеры расчетной модели и сократить машинное время на вычисления.

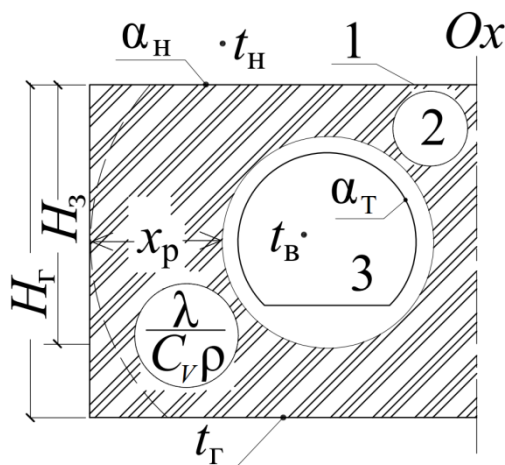


Рис. 2. Геометрическая модель «тоннель-грунт»:

1 – дневная поверхность; 2 – грунт; 3 – тоннель;  $H_3$  – глубина заложения тоннеля, м;  $H_Г$  – расчетная толщина грунта, м;  $x_p$  – размер зоны влияния тоннеля на прогревание толщи грунта, м;  $t_н$ ,  $t_в$ ,  $t_Г$  – температуры, соответственного, наружного и внутреннего воздуха и грунта на глубине  $H_Г$ ;  $\alpha_т$  – коэффициенты теплоотдачи поверхности стенки тоннеля для граничных условий третьего рода, Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $O_x$  – ось симметрии модели

Граничные условия моделирования включают в себя условия первого рода на нижней границе модели – это температура естественного состояния грунта на данной глубине, условие третьего рода – дневная поверхность и внутренняя

поверхность стенок тоннеля, условие второго рода – теплообмен на боковых границах расчетной области равен нулю, т.к. они находятся за границами прогретой зоны.

Глубина заложения тоннеля  $H_3$  здесь – это расстояние от поверхности земли до низа тоннельной обделки [8]. Исследованы три глубины заложения: 6, 10 и 20 м (рассматривается метрополитен мелкого заложения).  $H_\Gamma$  – толщина грунта в рассматриваемой модели, принималась из условия, что расстояние до нижней образующей поверхности тоннеля от нижнего края грунтового массива не менее  $x_p$ , которая определяется по формуле [9]:

$$x_p = 67,8 \cdot (aZ)^{0,5} = 67,8 \cdot (Z\lambda / (\rho C_V))^{0,5},$$

где  $Z$  – годовой период колебания температур,  $Z=8760$  сут.;  $\lambda$  – теплопроводность грунта, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $C_V$  – теплоемкость грунта, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $a = \lambda / (\rho C_V)$  – температуропроводность грунта, м<sup>2</sup>/с. От температуропроводности зависит скорость распространения температурных изменений в грунте, а также скорость их затухания с глубиной. В природе грунтовой массив многослойный, состоит из разных по теплофизическим свойствам грунтов, с постоянно изменяющимися их толщинами. В работе рассматривается не слоистый, а сплошной грунт с температуропроводностью  $6 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, характерной для рассматриваемой местности [11–16].

Изменение температур наружного  $t_n$  и внутреннего  $t_b$  воздуха во времени задается гармоническим законом:

$$t_n = a \cdot \cos(z) + b \text{ и } t_b = c \cdot \cos(z) + d,$$

где коэффициенты  $a = t_{VII} - b$ ,  $b = (t_I + t_{VII})/2$ ,  $d = t_{III} - c$ ,  $c = (t_{XII} + t_{III})/2$ ;  $t_I$  и  $t_{VII}$  – среднемесячные температуры за январь и июль соответственно [16], °С;  $t_{III}$  и  $t_{XII}$  – расчетные температуры внутреннего воздуха в тоннеле в теплый и холодный периоды года соответственно, °С [17];  $z$  – время в сутках, за начало отсчета принято 1 июля.

Расчетные параметры микроклимата внутреннего воздуха приняты по [8, 18]. Естественная температура грунта  $t_{гр}$ , окружающего тоннель на глубинах  $H_3$ , а также температура грунта  $t_{гр}$  на глубине  $H_\Gamma$  находится по формуле [9]:

$$t_{гр} = t_{ср.год.в} + 1,3\Delta t + \frac{H}{30} \frac{h_{геод}}{200} \pm \frac{A_0}{e^{H\sqrt{\frac{\pi}{az}}}},$$

где  $t_{ср.год.в}$  – среднегодовая температура воздуха, °С;  $\Delta t$  – перепад температур между средней температурой воздуха за год и среднегодовой температурой на дневной поверхности земли, °С;  $h_{геод}$  – высота данного места [19], м;  $H$  – глубина, на которой рассчитывается температура, м;  $A_0$  – суточная амплитуда колебаний температуры на дневной поверхности земли, °С;  $a$  – температуропровод-

ность грунта,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $e$  – основание натурального логарифма; знак «+» ставится при расчете  $t_{\text{гр}}$  в ТП, знак «-» при расчете  $t_{\text{гр}}$  в ХП.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в тоннеле метрополитена принят по [20].

### Результаты

На рис. 3. показаны удельные тепловые потоки в грунт для глубин заложения 1, 10 и 20 м для одного погонного километра тоннеля. Пиковые значения теплового потока отличаются на 86 кВт/пог. км, это 38 %. Сдвиг по фазе составляет 140 суток.

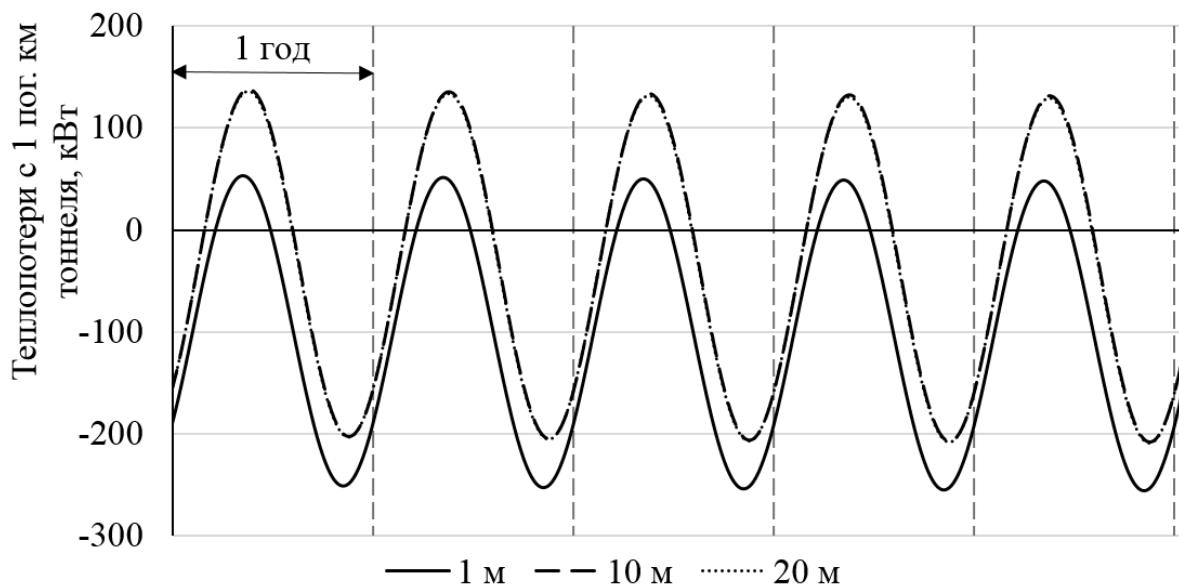


Рис. 3. Тепловые потоки в грунт на глубинах 1 м, 10 м и 20 м

### Обсуждение

Таким образом, удельный тепловой поток в грунт  $q$ , Вт/пог. м, в течение года также, как и температуру, можно описать синусоидой:

$$q=e+f\cdot\cos(z-\Delta),$$

где  $z$  – день года в отсчете от первого июля, сут;  $e$  и  $f$  – коэффициенты;  $\Delta$  – сдвиг по фазе, сут, колебаний температур атмосферного воздуха и теплового потока в грунт, объясняющийся и зависящий от тепловой инерции окружающего тоннель массива грунта. Этот сдвиг необходимо учитывать при определении расчетного периода для нахождения теплового баланса и расчетного воздухообмена.

$$Q=q\cdot l_{\text{пер}},$$

где  $l_{\text{пер}}$  – длина перегона, км. Он так же будет изменяться по синусоидальному закону, где пересечения нулевой отметки будут разделяться на теплопотери и теплопоступления.

### *Заключение*

Определена величина теплового потока в грунт из тоннеля метрополитена на глубине заложения 1, 10 и 20 м. Показано, что глубина заложения больше 10 м не оказывает существенного влияния на величину теплового потока в грунт. Определен сдвиг по фазе между колебаниями температуры атмосферного воздуха и теплового потока в грунт, который необходимо учитывать при определении расчетного теплового баланса и воздухообмена.

*Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Davies G., Boot-Handford N., Dennis W., Ajileye A., Revesz A., Maidment G. Combining cooling of underground railways with heat recovery and reuse // Sustainable Cities and Society. – 2019. – Volume 45. – P. 543-552.
2. Mortada A., Choudhary R., Soga K. Thermal modeling and parametric analysis of underground rail systems // Energy Procedia. – 2015. – Volume 78. – P. 2262–2267.
3. Kimura K., Shibata K., Tanita N., Sato M., Kondo Y. Estimation method of cooling load due to train wind in an underground station // Journal of Environmental Engineering (Japan). – 2015. – Volume 80, Issue 714. P. 657-663.
4. Liu S., He Y., Fu J. Cao, J., Shi P. Optimization of subway indirect evaporative cooler water distribution methods // Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering. – 2014. – Volume 36, Issue 5. – P. 11–15.
5. Красюк А.М., Лугин И. В. Экспериментальное исследование температуры обделок тоннеля и массива окружающего грунта в метрополитене мелкого заложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №33. – С. 124-129.
6. Alferova E. L., Lugina I. V. Generation and maintenance of the required air parameters in subway tunnels during warm seasons // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2018. – Volume 2018, Issue 11. P. 63 – 69.
7. Красюк А.М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю. Определение размеров массива грунта, подверженного тепловому влиянию подземных станций и тоннелей метрополитена // ФТПРПИ. – 2015. – №1. – С. 122-128.
8. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003.– Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012. – 267 с.
9. Цодиков В.Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. – Москва: Недра, 1975. – 237 с.
10. Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. – Новосибирск: Наука, 2006. – 164 с.
11. Карнаухов Н.Н., Кушнир С.Я., Горелов А. С., Долгих Г. М. Механика мерзлых грунтов и принципы строительства нефтегазовых объектов в условиях Севера. – М.: Центр-ЛитНефтеГаз, 2008. – 432 с.
12. Яковлев Р. Н. Универсальный фундамент. Технология ТИСЭ. – М.: ООО «Аделант», 2010. – 59 с.

13. Куликов Ю.Г., Дубнов Ю. Д. Методические указания по испытанию вечномёрзлых глинистых грунтов в полевых условиях: метод. указания. – М., Главтранспроект, 1969. – 58 с.
14. Трофимов В.Т. Королев В.А., Вознесенский Е.А. Грунтоведение. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. – 1024 с.
15. Мазуров, Г.П. Физико-механические свойства мерзлых грунтов. – Л. – М.: Стройиздат, 1964. – 45 с.
16. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И. Механика грунтов.– М.: Издательство АСВ, 2009. – 264 с.
17. СП 131.13330.2012. Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. – Введ. 01-01-2013. Москва: [б.и.], 2012.
18. СНиП 2.04.05-91\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Введ. 01-01-1992. Москва, 1999. – 72 с.
19. Карта высот [Электронный ресурс] // Российский УКВ портал, 2003-2015. – Режим доступа: <http://www.vhfdx.ru/karta-vyisot>, свободный.
20. Пьянкова А. Ю. прогнозирование тепловых режимов подземных сооружений метрополитенов мелкого заложения в условиях Западной Сибири: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2016. – 20 с.

© *Е. Л. Алферова, Е. А. Моисеева, 2019*