

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4÷625.42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАССИВА ГРУНТА, ПОДВЕРЖЕННОГО ТЕПЛОВОМУ ВЛИЯНИЮ ПОДЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ И ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

А. М. Красюк, И. В. Лугин, А. Ю. Пьянкова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: krasuk@cn.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработана математическая модель, описывающая процесс изменения температуры массива грунта, окружающего подземные станции и тоннели метрополитена, учитывающая сезонные колебания атмосферного воздуха, промерзание – оттаивание грунта и техногенный тепловой поток из сооружений метрополитена. Методом конечных элементов решена задача расчета температурного поля массива грунта, окружающего подземные станции и тоннели метрополитена на различных глубинах заложения, при изменении температур атмосферного воздуха. На основе численных экспериментов выполнена оценка теплового влияния подземных станций и тоннелей метрополитена мелкого заложения на массив окружающего грунта. Предложена методика определения области влияния подземных сооружений метрополитенов на температуру окружающих их массивов грунта. Установлено, что область теплового влияния подземного сооружения возрастает с увеличением глубины его заложения в грунт. Размер этой области определяется количеством техногенного тепла, выделяющегося в подземных сооружениях метрополитена.

Метрополитен, область теплового влияния, температура, станция, тоннель, грунт

Формирование температурного режима подземных станций и тоннелей метрополитена отличается от подобных наземных зданий. Одно из главных отличий заключается в том, что теплообмен с атмосферным воздухом происходит через массив грунта [1 – 3].

Температурное поле грунта меняется за время эксплуатации метрополитена вследствие образования прогретой области грунтового массива вокруг подземного сооружения, обусловленной поступлением тепла из внутренних помещений метрополитена в окружающий массив. В результате этого происходит повышение температуры грунта по сравнению с естественной, которая была на начальном этапе эксплуатации подземного сооружения. Таким образом формируется новое техногенное температурное поле грунта вокруг станций и тоннелей метрополитена, форма и размер которого испытывают колебания с периодом в 1 год [4, 5]. В нормативном документе СП 120.13330.2012 “Метрополитены” говорится, что при проектировании системы тоннельной вентиляции следует учитывать годовой тепловой баланс, обеспечивающий допустимые параметры температуры и относительной влажности воздуха при минимальном росте температуры окружающих грунтов. Поэтому исследование области массива грунта, подверженного воздействию техногенного тепла подземных сооружений метрополитена, является актуальной задачей.

Для исследования процесса образования прогретой области грунта под влиянием теплового потока из внутренних служебных помещений станции и тоннелей метрополитена разработаны математические модели теплообмена станции и тоннелей в грунтовом массиве, учитывающие неоднородность грунта и его теплофизические свойства, влияние температур атмосферного и внутреннего воздуха, теплофизические свойства ограждающих конструкций, глубину заложения станции и тоннелей. Под глубиной заложения будем понимать расстояние от дневной поверхности до верха перекрытий над кассовым залом (для станции) и расстояние от дневной поверхности до верхней границы “грунт–тюбинг тоннелей”. На рис. 1 приведены расчетные схемы станции и тоннелей в поперечном разрезе.

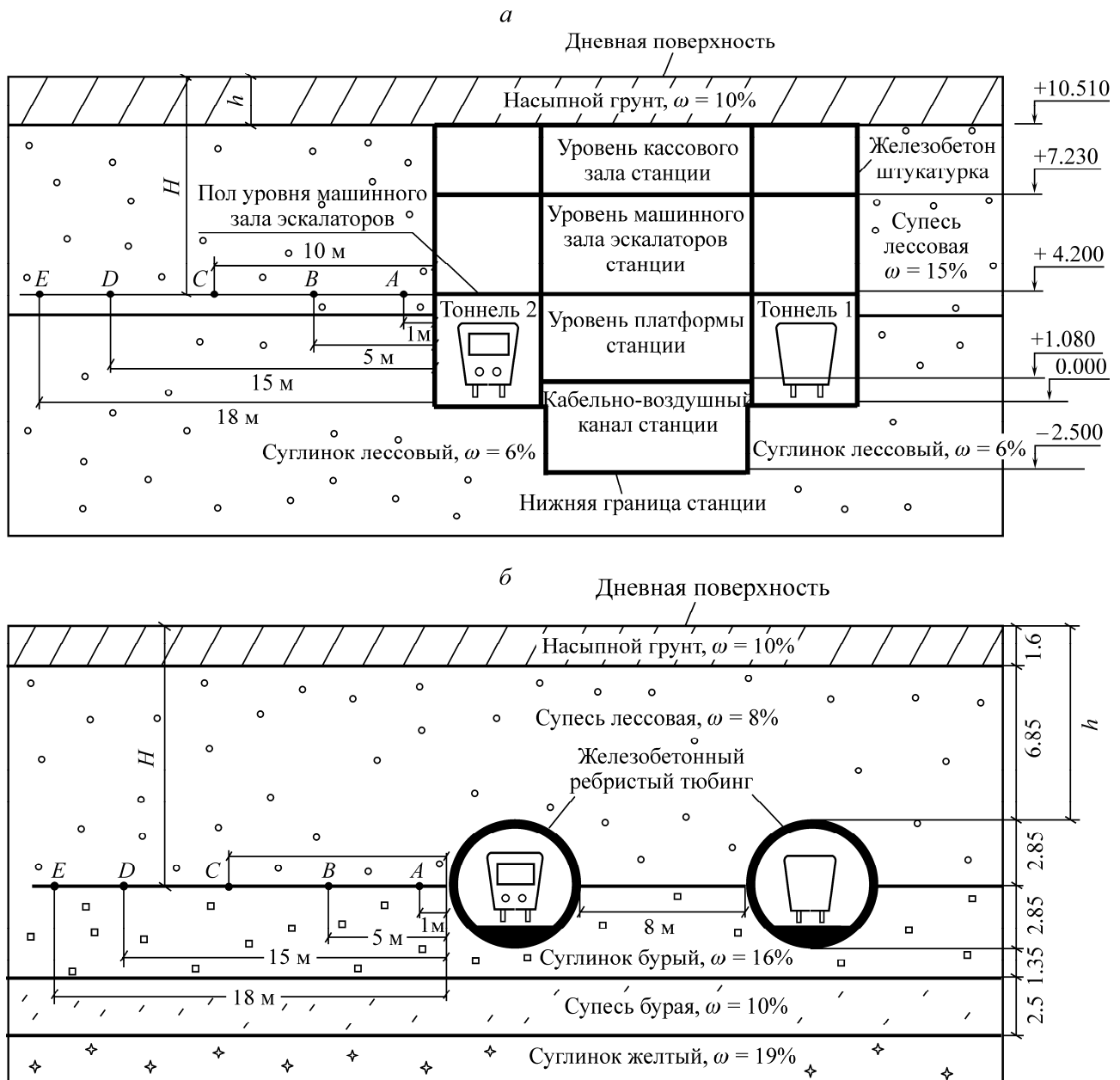


Рис. 1. Расчетная схема к моделированию процессов формирования температурного поля вокруг: а — станции “Октябрьская”; б — тоннелей между станциями “Площадь Гарина-Михайловского” – “Сибирская” Новосибирского метрополитена (h — глубина заложения станции, м; H — расстояние от дневной поверхности до точек А, В, С, D и E в массиве грунта, м)

Основными исходными данными для решения задачи расчета температурного поля массива грунта, окружающего подземные станции и тоннели метрополитена на различных глубинах заложения при изменении температур атмосферного воздуха, являются следующие:

1. Теплофизические свойства слоев массива грунта с учетом влажности ω , %, промерзания (с индексом “м”) и оттаивания (с индексом “т”) в различные периоды года: плотность ρ , кг/м³, теплоемкость c , кДж/(кг·°С), теплопроводность λ , Вт/(м·°С) [6].

Состав и свойства слоев массива окружающего грунта (от дневной поверхности земли вглубь массива грунта) приведены в таблице.

Теплофизические свойства грунтов

Грунт	ρ , кг/м ³	c_m	c_t	λ_m	λ_t
		кДж/(кг·°С)		Вт/(м·°С)	
Насыпной (асфальт, щебень, обломки кирпича со шлаком, строительный мусор и др.) ($\omega = 10\%$)	1870	1.6	1.8	1.66	1.5
Супесь лесовая бурая, просадочная ($\omega = 15\%$)	1875	0.98	1.23	1.52	1.38
Суглинок лесовый полутвердый с прослоями песка ($\omega = 16\%$)	1680	—	2.35	—	1.51
Супесь лесовая ($\omega = 8\%$)	1875	1.11	1.31	1.92	1.45
Суглинок бурый ($\omega = 16\%$)	1620	—	1.53	—	1.14
Супесь бурая ($\omega = 10\%$)	1740	—	1.27	—	1.42
Суглинок желтый ($\omega = 19\%$)	1680	—	1.63	—	1.25

2. Теплофизические свойства слоев ограждающих конструкций:

железобетон — $\rho = 2500$ кг/м³, $c = 0.84$ кДж/(кг·°С), $\lambda = 2.04$ Вт/(м·°С);

штукатурка — $\rho = 2100$ кг/м³; $c = 0.85$ кДж/(кг·°С); $\lambda = 0.78$ Вт/(м·°С).

3. Зависимость изменения температуры грунта на дневной поверхности земли вследствие циклического изменения температуры атмосферного воздуха описывается как [5]

$$t_{\text{пов.гр}} = 15\cos(k_1 z) + 3.37, \tag{1}$$

где $t_{\text{пов.гр}}$ — температура поверхности грунта, °С; z — время, сут; $k_1 = 0.017$ — коэффициент, 1/сут.

Функция (1) получена на основе справочных данных среднемесячных температур [7] наружного воздуха за год с учетом влияния растительного покрова, толщины и продолжительности стояния снежного покрова земли; поправки на среднюю геодезическую отметку данного места; амплитуды годового колебания температуры на дневной поверхности; теплофизических характеристик грунтов [8]. За начало отсчета принимается 1 июля первого года эксплуатации подземного сооружения: $z_0 = 0$ сут.

4. Начальная температура массива грунта при естественном распределении в теплый период года [8].

5. Температуры внутреннего воздуха (t_b , °С) станции “Октябрьская” по месяцам, полученные на основе мониторинга [9, 10].

6. Теплофизические свойства внутреннего воздуха подземного сооружения: $\rho = 1.2$ кг/м³, $c = 1.005$ кДж/(кг·°С); $\lambda = 0.026$ Вт/(м·°С).

Краевые условия:

— на внешних границах выделенной области массива грунта в расчетных моделях станции и тоннелей слева, справа и снизу задается условие второго рода (величина теплового потока на границах для любого момента времени). Тепловой поток $q = 0$, начальная температура грунта равна его естественной температуре;

— на дневной поверхности задается условие первого рода (величина температуры на границах для любого момента времени), температура грунта на дневной поверхности изменяется циклически, согласно зависимости (1), с периодом в 1 год;

— граничные условия на внутренней границе ограждающих конструкций станций и тоннелей определяются условием третьего рода (теплообмен с текучей окружающей средой на границах для любого момента времени). Изменение температур внутреннего воздуха происходит согласно [9, 10], коэффициент теплоотдачи внутренних поверхностей тоннеля $\alpha = 9.14$ Вт/(м·°С), помещений станции $\alpha = 8.7$ Вт/(м·°С).

Исследование температурного поля грунта проведено при различных глубинах заложения станции и тоннеля метрополитена (от 1 до 20 м включительно с шагом в 1 м). Для исследования области теплового влияния станций и тоннелей метрополитена на окружающий массив грунта рассмотрены несколько контрольных точек (*A, B, C, D* и *E*, рис. 1) на различных расстояниях по горизонтали от ограждающих конструкций подземных сооружений.

Задача определения температурного режима грунтового массива сводится к моделированию температуры грунта на заданной глубине в определенный период времени. Задача решается применением дифференциального уравнения теплопередачи (уравнение Фурье) в плоской постановке:

$$\frac{\partial t_{\text{гр}}}{\partial z} = a \nabla^2 t_{\text{гр}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{гр}}$ — температура грунта, °С; z — время, с; a — коэффициент температуропроводности, м²/с.

С использованием метода конечных элементов (МКЭ) и программного пакета Ansys проведено моделирование динамики температуры грунта, в котором нет искусственных сооружений, т. е. естественного поля температур. Затем эти результаты сравнивались с данными теоретических расчетов по методике, разработанной в Военно-инженерной академии им. В. И. Куйбышева [8]. Сравнение показало их удовлетворительную сходимость, поэтому последующие исследования проводились с использованием МКЭ. Естественная температура грунта на глубинах $H = 1 - 20$ м в течение года изменялась в пределах 11.6 – 18.37 °С (рис. 2).

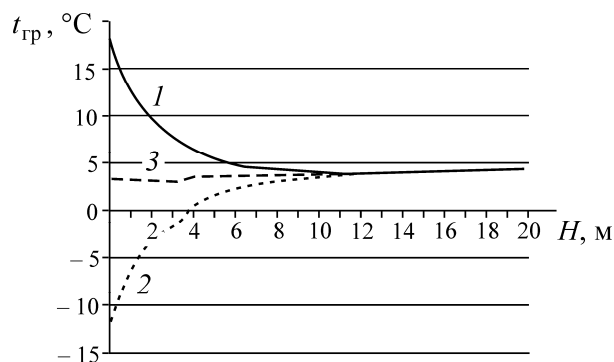


Рис. 2. Естественное распределение температур в массиве грунта в различные периоды года: 1 — теплый; 2 — холодный; 3 — переходный

Приведены результаты исследований температуры массива грунта вокруг тоннелей и станции, расположенных на глубине $h = 5$ м от дневной поверхности. Соответственно расстояние от дневной поверхности до точек A, B, C, D и E в массиве грунта составило для тоннелей 7.85 м, для станции — 11.3 м. Температура массива грунта в точках A, B, C, D и E для станции на данной глубине заложения представлена на рис. 3.

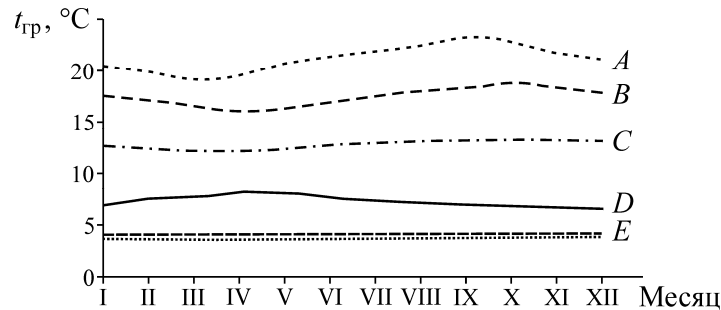


Рис. 3. Температура массива грунта в точках A, B, C, D и E станции метрополитена на глубине заложения $h = 5$ м (..... обозначена естественная температура грунта на $H = 11$ м)

Из рис. 3 видно, что по мере удаления от стенки станции температура грунта, прогретого техногенным тепловым потоком, приближается к естественной температуре массива грунта и на расстоянии 18 м (точка E) практически с ней сравнивается.

На температуру массива грунта влияют изменения температуры как атмосферного, так и тоннельного воздуха. Оба этих параметра изменяются в течение года. Например, в холодный период года с октября по апрель для отопления и теплоснабжения станции “Площадь Гарина-Михайловского” подается $50.46 \cdot 10^{11}$ Дж тепла. На рис. 4 показано изменение температуры грунта в отдельные периоды года (январь, апрель, июль, октябрь) на различных расстояниях от ограждающих конструкций станции метрополитена.

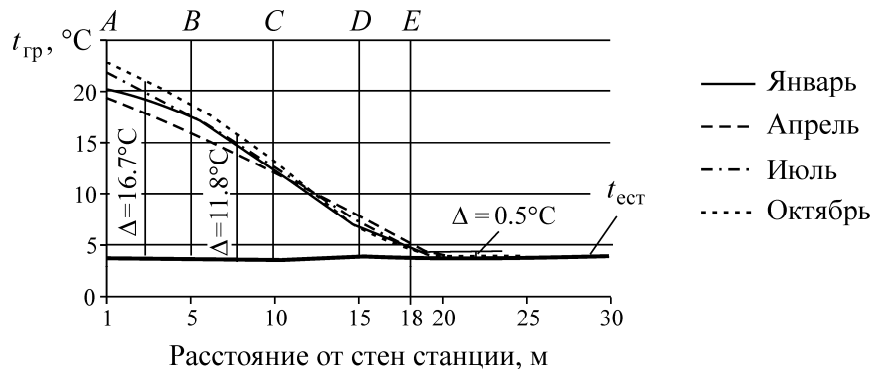


Рис. 4. Изменение температуры грунта в точках A, B, C, D и E в зависимости от времени года и расстояния от стен станции; $t_{ест}$ — естественная температура грунта

Из этих графиков видно, что по мере удаления от стен станции температура грунта понижается, постепенно приближаясь к естественной, т. е. $\Delta = t_{гр} - t_{ест}$ уменьшается. Введем понятие области влияния данного подземного сооружения на окружающий массив грунта для рассматриваемой глубины заложения. Эта область, в которой температура грунта, сформированная под действием теплового влияния станции, более чем на 0.5 °C отличается от естественной температуры грунта, что составляет 6–12% от ее величины в зависимости от глубины. Значение критерия выбрано с учетом точности прибор “Термодат-26М1”, с помощью которого авторы проводят измерение температуры грунта в натуральных экспериментах. Как правило, горизонталь-

ная составляющая области влияния, примерно на уровне середины геометрической высоты станции, располагается на наибольшем расстоянии от стены сооружения. Например, для глубины заложения $h = 5$ м $\Delta \leq 0.5$ на расстоянии 18 м (рис. 4 и 6). Примем это расстояние как размер области влияния.

На рис. 5 показано распределение теплового поля в массиве грунта вокруг станции метрополитена на глубине заложения $h = 5$ в июле, полученное путем моделирования. Жирной линией обведена область влияния станции на окружающий массив грунта. Слева от линии области влияния обозначены естественные температуры массива грунта в указанных точках, а справа — температуры массива грунта, полученные путем моделирования с учетом влияния техногенного теплового потока. Результаты расчетов подтверждаются результатами мониторинга температур грунта [9], а также частично результатами исследований других авторов [10, табл. 2].

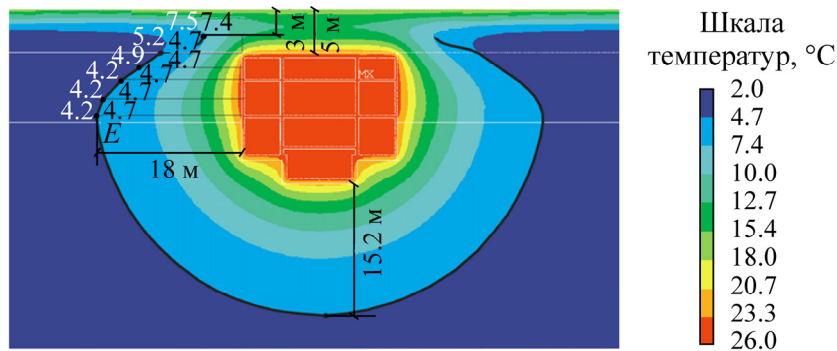


Рис. 5. Распределение теплового поля в массиве грунта вокруг станции метрополитена при глубине заложения $h = 5$ в июле

На основе представленной методики проведены исследования теплового влияния подземных станций и тоннелей на массив окружающего их грунта. В процессе исследования определена область влияния и ее размер для различных глубин заложения станции и тоннелей в диапазоне мелкого заложения. Размеры зоны влияния для станции представлены на рис. 6а, для тоннеля — на рис. 6б.

Согласно рис. 6, область теплового влияния подземного сооружения возрастает с увеличением глубины заложения подземного сооружения в грунт. Для метрополитенов мелкого заложения (глубина заложения не превышает 20 м) максимальная область влияния для станции составляет 28 м, а для тоннеля 15 м. Размер этой области определяется количеством техногенного тепла, выделяющегося в подземных сооружениях метрополитена [9].

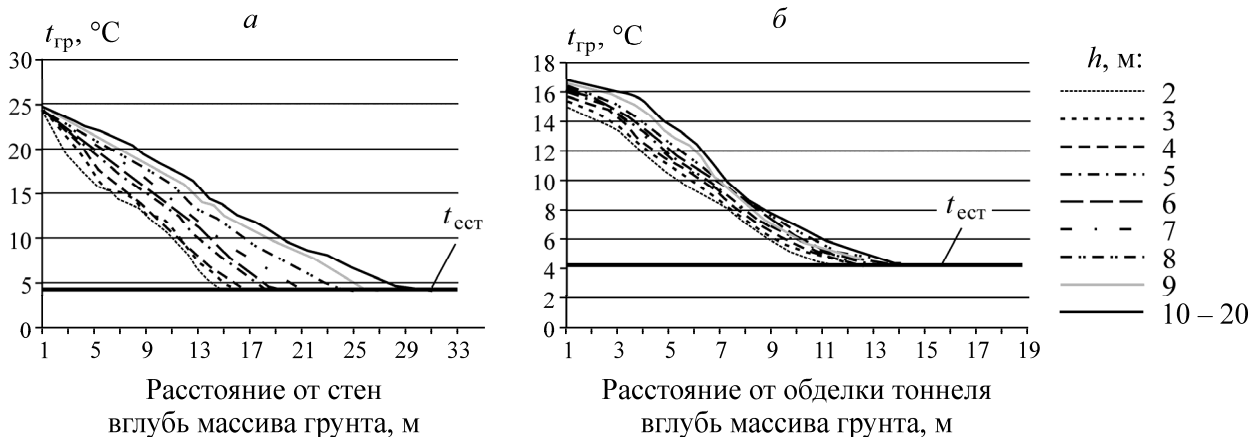


Рис. 6. Зависимость температур грунта на различных глубинах заложения метрополитена: а — вокруг станции на глубине $h + 6.3$ м; б — вокруг тоннеля на глубине $h + 2.85$ м

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель, описывающая процесс изменения температуры массива грунта, окружающего подземные станции и тоннели метрополитена, учитывающая сезонные колебания атмосферного воздуха, промерзание – оттаивание грунта и техногенный тепловой поток из сооружений метрополитена. Методом конечных элементов решена задача расчета температурного поля массива грунта, окружающего подземные станции и тоннели метрополитена на различных глубинах заложения при изменении температур атмосферного воздуха. На основе численных экспериментов установлено:

— область теплового влияния подземного сооружения расширяется с увеличением глубины заложения подземного сооружения в грунт;

— в метрополитенах мелкого заложения (глубина заложения не превышает 20 м) максимальное расстояние от ограждающих конструкций подземных сооружений до границы области влияния для станции составляет 28 м, а для тоннеля 15 м.

Предложена методика определения области влияния подземных сооружений метрополитена на температуру окружающих их массивов грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dai G., Vardy A.** Heat transfer in train/tunnel annulus: 9th International Symposium on aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels “Developments for the 21st Century”, Aosta Valley, Italy: Earth Tech, 1997.
2. **Vermeer P. A., Nico Ruse M. T.** Tunnel heating stability in drained ground, Tunneling, Great Britain: British Tunnelling Society, 2002, No. 6.
3. **L. Goy, D. Fabre, G. Menard.** Modeling of rock temperatures for deep alpine tunnel projects, Rock Mechanics and Rock Engineering, 1996, Vol. 29. No. 1.
4. **Красюк А. М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю.** Исследование температурных полей грунтового массива, окружающего станцию метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2010. — № 4.
5. **Красюк А. М., Лугин И. В.** Исследование процессов теплопередачи в тоннеле метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2008. — № 6.
6. **Куликов Ю. Г., Дубнов Ю. Д.** Методические указания по испытанию вечномерзлых глинистых грунтов в полевых условиях: метод. указания. — М.: Главтранспроект, 1969.
7. **СНиП 23-01-99***. Строительная климатология. — М.: Госстрой России, 1999.
8. **Цодиков В. Я.** Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. — М.: Недра, 1975.
9. **Лугин И. В., Пьянкова А. Ю.** Изменение теплопотерь в грунт из помещений станции “Октябрьская” Новосибирского метрополитена за 24 года эксплуатации: сб. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. “Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции”. — М.: МГСУ, 2009.
10. **Осадчий Г. Б.** Условия эффективного использования тепловых насосов в России. Ч. 2. Факторы, влияющие на эффективность трансформации теплоты тепловым насосом // Холодильщик.RU. — 2012. — Вып. 6.

Поступила в редакцию 11/Х 2014