УДК 628.8+622.4+625.042

Л.А. Кияница

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ГРУНТ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТАНЦИЙ ЗАКРЫТОГО ТИПА МЕТРОПОЛИТЕНА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ С ДВУХПУТНЫМ ТОННЕЛЕМ

Представлены методика проведения и результаты исследования процесса теплообмена между помещениями станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем и окружающим станцию грунтовым массивом. Разработана математическая модель процесса теплообмена «грунт-станция закрытого типа», произведена оценка степени ее соответствия натурным исследованиям, проведенных в условиях Новосибирского метрополитена. Исследование процессов теплообмена проведено путем вычислительного моделирования процесса теплопередачи методом конечных элементов из помещений станции в грунт в нестационарной постановке. По результатам исследования определены аналитические зависимости величин удельного теплового потока из путевого отсека, помещения пассажирской платформы, совмещенной тягово-понизительной подстанции и кассового зала от глубины заложения станции, теплофизических характеристик грунтов и наружного климата на площадке строительства в установившемся режиме эксплуатации. Показано, что изменение величины теплового потока в течении года в установившемся режиме эксплуатации носит колебательный, знакопеременный характер. Для станции закрытого типа различной глубины заложения определены: время установления характера изменения теплового потока; теплопотери станции на начальном периоде (за 1-ый год) эксплуатации. Установлено, что теплопотери на начальном периоде эксплуатации значительно больше, чем в установившемся режиме.

Ключевые слова: метрополитен, станция закрытого типа, грунт, удельный тепловой поток, глубина заложения, теплофизические свойства грунтового массива, теплообмен.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-89-102

Введение и постановка задачи

Современные тенденции строительства метрополитенов заключаются в возведении станций закрытого типа и двухпутных тоннелей преимущественно мелкого заложения, с использованием как открытого, так и закрытого способа работ [1, 2, 3]. Примером тому служит строительство участка двухпутного тоннеля на Фрунзенском радиусе в Санкт-Петербурге и Кожуховской линии в Москве. Принципиальным отличием станции закрытого

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 89–102.
© Л.А. Кияница. 2018.

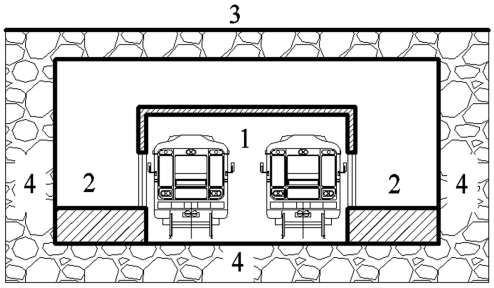

Рис. 1. Станция закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем: 1 — путевой отсек, 2 — пассажирские платформы, 3 — дневная поверхность, 4 — окружающие станцию грунты

типа от станций других типов является наличие перегородки, разделяющей пассажирские помещения метрополитена (в первую очередь пассажирскую платформу) и путевой отсек (см. рис. 1). Посадка-высадка пассажиров осуществляется через проемы в ограждающей конструкции путевого отсека, которые открываются автоматически при остановке поезда на станции. В Москве (Кожуховская линия) предусмотрены станции мелкого заложения, а к примеру, в Новосибирске некоторые станции планируется сделать наземными (проектируемая станция «Гусинобродская»).

Для обеспечения комфортного пребывания пассажиров и персонала в сооружениях метрополитена предусматривается система вентиляции станций и тоннелей. Ее основная цель — поддержание нормативных параметров микроклимата в помещениях метрополитена, требования к которым определены в нормативных документах [4, 5]. При определении производительности системы вентиляции по количеству подаваемого воздуха следует учитывать выделения вредностей в помещениях — тепло, влагу, газы, пыль и т.д. В работе [6] показано, что одним из составляющих теплового баланса метрополитена является теплообмен пассажирских помещений и путевого отсека с окружающим их грунтовым массивом. Направление теплового потока носит переменный характер: в течение года станция то нагревает окружающие ее грунты, то наблюдается обратный процесс — на станцию поступают тепловыделения от грунтового массива. Известно, что на теплообмен станционных помещений тоннелей с грунтовым массивом влияет температура внутреннего воздуха [7].

Работы авторов [8, 9, 10, 11] преимущественно посвящены станциям открытого типа и однопутными тоннелями. Предметом исследования являются: температура окружающего грунтового массива, закономерности ее изменения в течение года; теплопотери станции в начальный период эксплуатации и в установившемся режиме эксплуатации.

Методика расчета теплового потока [12] не позволяет учитывать прогрев грунта, окружающего подземные сооружения метрополитена, годовые изменения температуры наружного (атмосферного) и внутреннего (станционного) воздуха и изменения свойств грунта вследствие промерзания и оттаивания. Поэтому необходимо: найти аналитические закономерности теплового потока между станциями закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем (мелкого заложения и наземной станции) и окружающим их грунтовым массивом в установившемся режиме эксплуатации; определить величину тепловых потерь в начальный период эксплуатации (в первый год) станции закрытого типа; определить время установления циклического характера колебаний величины теплового потока в течение года.

Описание математической модели процесса теплопередачи

Построение математической модели осуществлено в программном пакете ANSYS CFX. Математическое моделирование процесса теплопереноса между

конструкциями станции закрытого типа и окружающей ее грунтом основано на численном решении начально-краевой задачи для уравнения теплопроводности [13]:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T(x,y,z,\tau)}{\partial z}\right) \quad (1)$$

где $\partial T(x, y, z, \tau)$ — искомая функция распределения температуры; λ_x, λ_y, λ_z — коэффициенты теплопроводности в направлении осей x, y, z, Вт/м^2°С; ρ — плотность, кг/м^3; c — удельная теплоемкость среды.

Стационарное уравнение теплопроводности для изотропной среды имеет вид:

$$div(\lambda \cdot gradT) = 0 \quad (2)$$

где T — искомая функция распределения температуры; λ — коэффициенты теплопроводности, Вт/м^2°С;

Геометрические параметры расчетной модели, начальные и граничные условия

К расчету принята конструкция проектируемой станции Новосибирского метрополитена — станция «Гусинобродская»

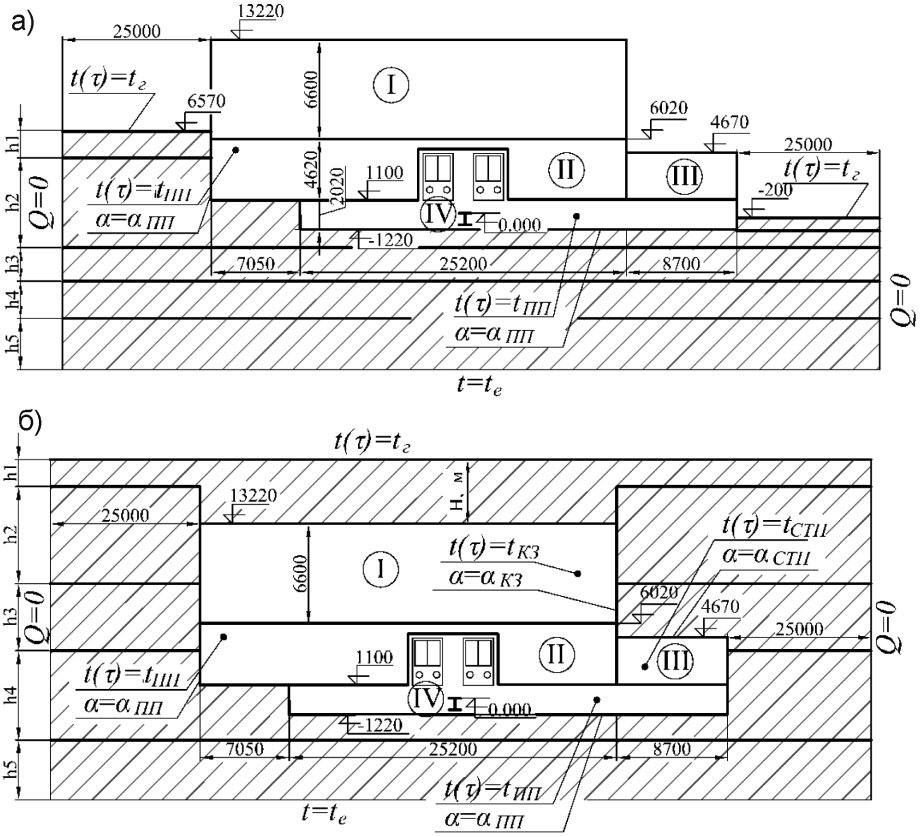

Рис. 2. Расчетная схема и граничные условия математической модели «Станция закрытого типа — грунтовый массив»: наземная станция закрытого типа (а); станция закрытого типа мелкого заложения (б); h1—h5 — слои грунта согласно табл. 1; I — кассовый зал; II — помещение пассажирской платформы; III — помещение СТП; IV — путевой отсек

Таблица 1

Мощность слоев грунта по трассе «Площадь Ленина» — «Красный проспект»

№ п/п	Описание грунтового слоя	Мощность слоя, м	Плотность ρ, кг/м^3	Теплоемкость $c_м$, кДж/(кг · °С)	Теплоемкость $c_т$, кДж/(кг · °С)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_м$, Вт/(м · °С)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_т$, Вт/(м · °С)
h1	Насыпной слой	1,1	1870	1,60	1,80	1,66	1,50
h2	Супесь	12,1	1875	0,98	1,23	1,52	1,38
h3	Суглинок	6,3	1680	—	2,35	—	1,51
h4	Супесь	1,9	1875	—	1,23	—	1,38
h5	Суглинок	—	1680	—	2,35	—	1,51

(см. рис. 2). Структура грунтового массива принята для условий Новосибирского метрополитена — осредненная мощность слоев грунта в окрестностях станции. Теплофизические свойства каждого слоя грунта приняты согласно [9] с учетом процессов промерзания-оттаивания. Мощность, описание слоев грунта и их теплофизические свойства сведены в табл. 1.

Ограждающая конструкция станции состоит из двух слоев:

- штукатурка: плотность ρ = 2100 кг/м^3, теплоемкость c = 0,84 кДж/(кг · °С), коэффициент теплопроводности λ = = 0,78 Вт/(м · °С);
- бетон: плотность ρ = 2500 кг/м^3, теплоемкость c = 0,84 кДж/(кг · °С), коэффициент теплопроводности λ = = 2,04 Вт/(м · °С). Теплофизические свойства материалов конструкции приняты согласно [14].

Заданы следующие граничные условия: граничное условие I рода — естественная температура грунта $t_е$ на нижней границе грунтового массива, определяемая по формулам, указанных в работах [8, 15], и температура поверхности грунта $t_{пов.гр}$, определяемая по формуле (3); граничное условие II рода — тепловой поток Q = 0 на боковых границах грунтового массива; граничное условие III рода — коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к внутренним поверхностям ограждающих конструкций станции и закон изменения температуры внутреннего воздуха в помещениях; граничное условие IV рода задано в контактных зонах слоев грунта с различными теплофизическими свойствами и в зонах контакта «ограждающая конструкция — грунт» как идеальный контакт.

Коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха в помещениях метрополитена к ограждающим конструкциям совмещенной тягово-понизительной подстанции (СТП), кассового зала и помещения пассажирской платформы принят равном $\alpha_{пп,кз,стп}$ = 8,7 Вт/(м^2 · °С) [14]. Коэффициент теплоотдачи от тоннельного воздуха к ограждающим конструкциям путевого отсека определен по формуле 61.V [8] и равен $\alpha_{по}$ = 9,5 Вт/(м^2 · °С).

Годовые колебания температуры на поверхности грунта описываются зависимостью [9]:

$$t_{пов.гр} = 15 \cdot \cos\frac{z}{58,1} + 3,37 \qquad (3)$$

Годовые колебания температуры внутреннего воздуха в кассовом зале и в помещении пассажирской платформы:

$$t_{кс,пп} = 9 \cdot \cos\frac{z}{58,1} + 19 \qquad (4)$$

Годовые колебания температуры внутреннего воздуха в путевом отсеке:

$$t_{ПО} = 13{,}5 \cdot \cos\frac{z}{58{,}1} + 19{,}5 \qquad (5)$$

Годовые колебания температуры внутреннего воздуха в СТП:

$$t_{СТП} = 12{,}5 \cdot \cos\frac{z}{58{,}1} + 22{,}5 \qquad (6)$$

где в формулах (3)—(6) z — сутки, с начала расчета (за начало расчета принято 1 июля).

В качестве начальных условий принята естественная температура грунта. Период моделирования — 15 лет. Шаг расчета равен 1 суткам.

Для построения геометрии твердотельной модели использовался модуль ANSYS Design Modeler. Для пространственной дискретизации модели на конечно-элементную сетку использовался модуль ANSYS Mesh Generator. Задача решена в 2D постановке, сетка толщиной в 1 ячейку. Тип ячейки — треугольная призма. Качество сетки лежит в допустимых пределах: Orthogonal Quality в пределах от 0,2 до 1,0, и Skewness в пределах от 0 до 0,8 [16].

Обработка полученных результатов

Определено время достижения установившегося годового циклического характера колебаний теплового потока из помещений станции мелкого заложения закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем в грунт в зависимости от глубины заложения (см. рис. 3).

Время достижения устойчивого циклического характера колебаний удельного теплового потока составит:

- для ограждающих конструкций помещения пассажирской платформы — от 6 до 9 лет;
- для ограждающих конструкций путевого отсека — от 6 до 7 лет;
- для ограждающих конструкций помещения СТП — от 5 до 6 лет;
- для ограждающих конструкций кассового зала — от 4 до 7 лет.

В качестве критерия установившегося циклического характера колебания принята отношение разности амплитуд последовательных колебаний к самой амплитуде. Принято, что процесс считается установившимся, если эта разность не превышает 1%.

При аппроксимации экспериментально полученных значений величин удельного теплового потока в установившемся режиме эксплуатации получена зависимость для удельного теплового потока $q_h(\tau)$, Вт/м^2, в зависимости от глубины заложения:

$$q_h(\tau) = B(h) + A(h) \cdot \cos\left(0{,}0172 \cdot \tau + \omega(h)\right) \qquad (7)$$

где $A(h)$ — амплитуда колебаний величины удельного теплового потока, Вт/м^2; $B(h)$ — среднегодовое значение удельного теплового потока, Вт/м^2; $\omega(h)$ — началь-

Рис. 3. Время установления колебания удельного теплового потока, Вт/м^2, из помещений станции закрытого типа в грунт

ная фаза колебаний величины удельного теплового потока, рад; 0,0172 — угловой коэффициент, 1/сут.

Коэффициенты $A(h)$, $B(h)$, $\omega(h)$ определяются в зависимости от глубины заложения станции h, м, по формулам:

• для помещения пассажирской платформы:

$$\omega(h) = const = 0{,}860,\ h \in [1;25]$$

$$B(h) = \begin{cases} \dfrac{1}{1{,}210 + 0{,}050 \cdot h}, h \in [1;9) \\ 0{,}560,\ h \in [9;25] \end{cases} \quad (8)$$

$$A(h) = \begin{cases} -0{,}030 \cdot h^2 + 0{,}380 \cdot h + 5{,}720, \\ h \in [1;7) \\ -0{,}0952 \cdot h^3 + 2{,}759 \cdot h^2 - \\ -26{,}086 \cdot h + 86{,}958,\ h \in [7;12) \\ 6{,}98,\ h \in (12;25] \end{cases}$$

Критерием качества аппроксимации коэффициентов является среднее отклонение σ, %, определяемое по формуле:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\left| X_{a,i} - X_i \right|}{X_i}}{n} \cdot 100\% \quad (9)$$

где X_i — значение коэффициента, полученного экспериментально; $X_{a,i}$ — аппроксимированное значение коэффициента; n — общее количество значений.

Среднее отклонение для коэффициента $A(h)$ составило 0,80%, для $B(h)$ — 3,72%, для $\omega(h)$ — 1,55%.

• для путевого отсека:

$$\omega(h) = const = 0{,}660,\ h \in [1;25]$$

$$B(h) = const = 1{,}140,\ h \in [1;25] \quad (10)$$

$$A(h) = \begin{cases} -0{,}229 \cdot h^2 + 1{,}248 \cdot h + 11{,}858, \\ h \in [1;6) \\ -0{,}137 \cdot h^2 + 2{,}869 \cdot h - 1{,}493, \\ h \in [6;9) \\ 13{,}17,\ h \in [9;25] \end{cases}$$

Среднее отклонение для коэффициента $A(h)$ составило 1,11%, для $B(h)$ — 1,26%, для $\omega(h)$ — 2,30%.

• для помещения СТП:

$$\omega(h) = const = 0{,}650,\ h \in [1;25]$$

$$B(h) = \begin{cases} -0{,}025 \cdot h^2 - 0{,}305 \cdot h + 4{,}630, \\ h \in [1;3) \\ 3{,}43,\ h \in [3;25] \end{cases} \quad (11)$$

$$A(h) = const = 11{,}41,\ h \in [1;25]$$

Среднее отклонение для коэффициента $A(h)$ составило 1,48%, для $B(h)$ — 6,13%, для $\omega(h)$ — 0,51%.

• для помещения кассового зала:

$$\omega(h) = \begin{cases} 0{,}462 + \dfrac{2{,}055}{h},\ h \in [1;8) \\ 0{,}68,\ h \in [8;25] \end{cases}$$

$$B(h) = 0{,}553 + \frac{16{,}786}{h},\ h \in [1;25] \quad (12)$$

$$A(h) = \begin{cases} 5{,}453 + 0{,}875 \cdot h,\ h \in [1;5) \\ 8{,}59,\ h \in [5;25] \end{cases}$$

Среднее отклонение для коэффициента $A(h)$ составило 4,66%, для $B(h)$ — 3,50%, для $\omega(h)$ — 4,09%.

Для помещений станции, расположенной на грунте, уравнение удельного теплового потока (7) запишется как:

• для помещения пассажирской платформы:

$$q_h(\tau) = 4{,}81 + 5{,}70 \cdot \cos(0{,}0172 \cdot \tau + 1{,}10) \quad (13)$$

• для путевого отсека:

$$q_h(\tau) = 2{,}25 + 10{,}64 \cdot \cos(0{,}0172 \cdot \tau + 0{,}75) \quad (14)$$

На рис. 4 графически приведено изменение удельного теплового потока за год в установившемся режиме эксплуатации для наземной станции и станций с глубиной заложения 5, 15, 25 м.

Определены теплопотери помещений станции закрытого типа в грунт в началь-

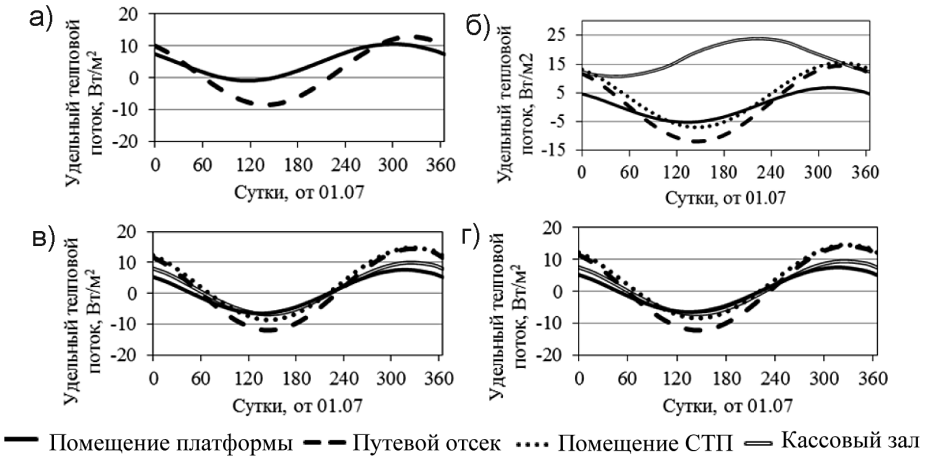

Рис. 4. Изменение удельного теплового потока, Вт/м², от станции в грунт. Положительные значения — теплопотери в грунт, отрицательные значения — теплопоступления из грунта; наземная станция (а); глубина заложения 1 м (б); глубина заложения 15 м (в); глубина заложения 25 м (г)

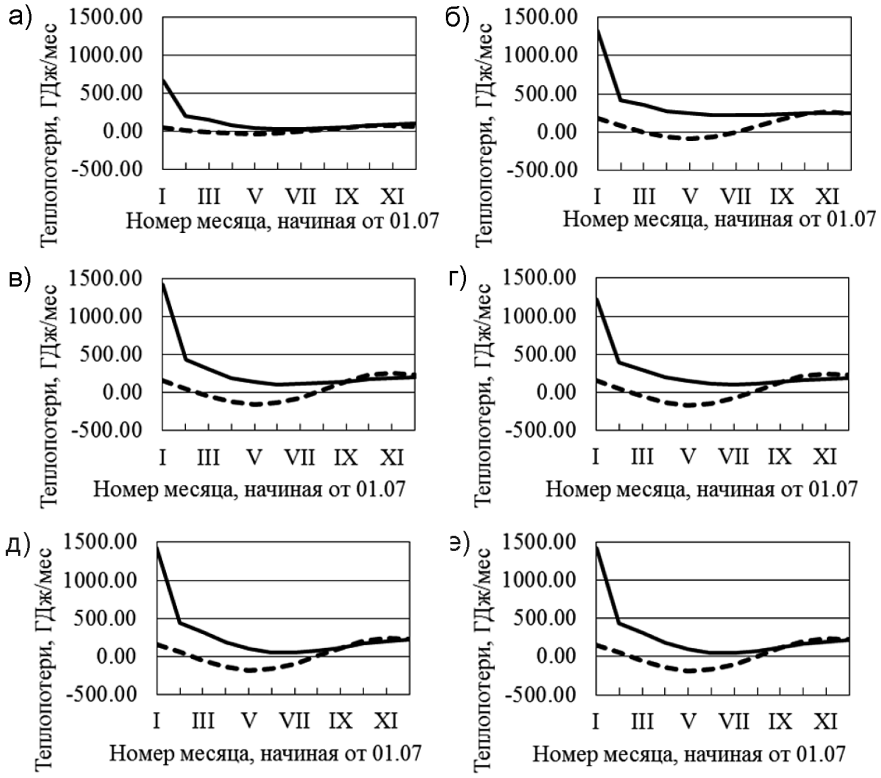

Рис. 5. Тепловые потери по месяцам, ГДж/мес, из помещений станции закрытого типа с двухпутным тоннелем в грунт: наземная станция (а); глубина заложения 1 м (б); глубина заложения 3 м (в); глубина заложения 5 м (г); глубина заложения 10 м (д); глубина заложения 20 м (е). Сплошная линия — теплопотери в начальный (1-ый год) эксплуатации; пунктирная линия — теплопотери на установившемся этапе эксплуатации; Положительные значения по оси ординат — теплопотери со станции, отрицательные — теплопоступления из грунта

Таблица 2

Тепловые потери станции закрытого типа в 1-ый год эксплуатации и в установившемся режиме

Глубина заложения	Теплопотери в 1 год эксплуатации $\sum Q^{12мес}_{нач.пер.экспл}$, ГДж/год	Сумма годовых теплопотерь и теплопоступлений от грунта в установившемся режиме $\sum Q^{12мес}_{уст.пер.экспл}$, ГДж/год	Сумма годовых теплопотерь в грунт в установившемся режиме $\sum Q_{уст.пер.эксл}^{12мес,теплопотери}$, ГДж/год
Наземная	1606,77	289,84 (5,55*)	367,70 (4,37*)
h = 1 м	4222,24	1011,65 (4,17*)	1250,91 (3,38*)
h = 3 м	3535,15	569,66 (6,21*)	1099,57 (3,21*)
h = 5 м	3243,71	461,92 (7,02*)	1052,08 (3,08*)
h = 10 м	3365,34	376,39 (8,94*)	995,28 (3,38*)
h = 20 м	3308,90	320,12 (10,34*)	969,88 (3,41*)

* в скобках указано, во сколько раз теплопотери в 1 год эксплуатации при глубине заложения h больше, чем соответствующие значения в установившемся режиме эксплуатации.

ный период (1-ый год) эксплуатации по методике, описанной в работе [8]. Проведено сравнение тепловых потерь в 1-ый год эксплуатации с теплопотерями в установившимся режиме эксплуатации (см. рис. 5).

Из графиков на рис. 5 видно, что тепловые потери в 1-ый год эксплуатации значительно больше, чем теплопотери в установившемся режиме, что соответствует результатам, полученным в работах [17, 18]. Тепловые потери в 1-ый год эксплуатации и в год с установившемся режимом сведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, годовая сумма теплопотерь в грунт и теплопоступлений от грунта для наземной станции и станций с глубиной заложения 1÷20 м в 1-ый год эксплуатации значительно больше (в 4,17—0,34 раза) теплопотерь в грунт от станции в установившемся режиме эксплуатации.

Верификация математической модели

Сотрудниками Новосибирского метрополитена и институтом Горного дела СО РАН с 2004 г. проводится мониторинг температурного состояния конструкций тоннелей на перегоне «ст. Сибирская» — «ст. Гарина-Михайловского» [19]. В качестве измерительной аппаратуры используется прибор «Термодата-26М1». Установленные на расстоянии 1,2 м от внутренней обделки тоннеля датчики температуры № 1, 3, 4 имеют погрешность от –0,6 до +0,2 °С. Сечение перегона и расположение термопреобразователей показано на рис. 6.

Для проверки правильности построения математической модели и оценки степени адекватности полученных результатов проведено моделирование в программном пакете ANSYS CFX динамики изменения температуры грунтового массива и проведено сравнение полученных численным путем значений температур с показаниями датчиков в замерных пунктах № 1, 3, 4.

Граничные условия показаны на рис. 6. Изменение температуры грунта на дневной поверхности задавалось по формуле (3). Изменение внутренней температуры тоннеля задавалось аппроксимированной зависимостью показаний датчиков внутренней температуры тоннеля. Аппроксимированная зависимость внутренней температуры тоннеля имеет вид:

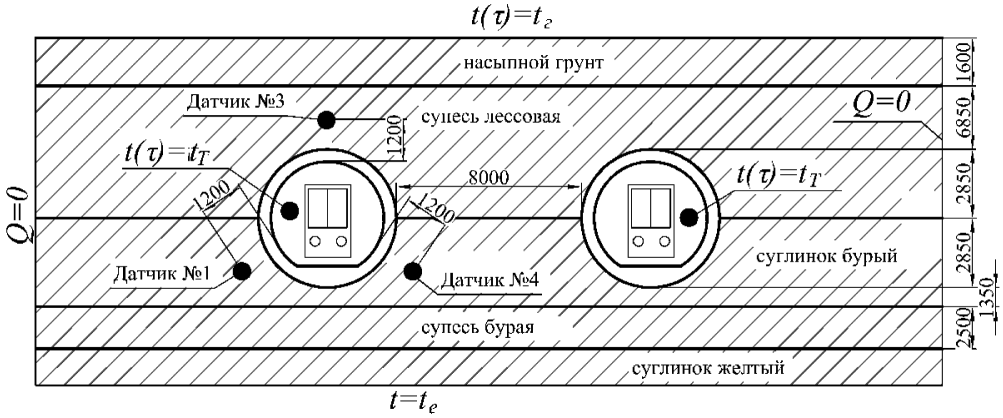

Рис. 6. Поперечное сечение перегона «ст. Сибирская» — «ст. Гарина-Михайловского», расчетная схема и граничные условия

Таблица 3

Теплофизические характеристики слоев грунта по трассе «ст. Сибирская» — «ст. Гарина-Михайловского»

№ п/п	Описание грунтового слоя	Плотность ρ, кг/м³	Теплоемкость $c_м$, кДж/(кг · °С)	Теплоемкость $c_т$, кДж/(кг · °С)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_м$, Вт/(м · °С)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_м$, Вт/(м · °С)
1	Насыпной грунт	1870	1,60	1,80	1,66	1,50
2	Супесь лессовая	1875	1,11	1,31	1,92	1,45
3	Суглинок бурый	1620	—	1,53	—	1,14
4	Супесь бурая	1740	—	1,27	—	1,42
5	Суглинок желтый	1680	—	1,63	—	1,25

$$t_T = -1{,}1 \cdot \cos\frac{z}{58{,}1} + 16{,}6 \qquad (15)$$

Теплофизические характеристики слоев грунта приняты согласно [15] и сведены в табл. 3.

Результаты моделирования температуры в пунктах № 1, 3, 4 на 12 год эксплуатации показаны на рис. 7. Средние отклонения σ, %, результатов, полученных в ANSYS CFX от экспериментальных данных сведены в табл. 4.

Наибольшее среднее отклонение составляет 13,25% для датчика 4 (максимальное абсолютное отклонение для VII месяца составило 3,28 °С), из чего можно сделать вывод об адекватности результатов, полученных путем моделирования в ANSYS CFX и о правильности построения математической модели.

Таблица 4

Средние отклонения результатов, полученных в ANSYS CFX, от экспериментальных данных

	Датчик № 1	Датчик № 3	Датчик № 4
Экспериментальные данные	11,87%	5,9%	13,25%

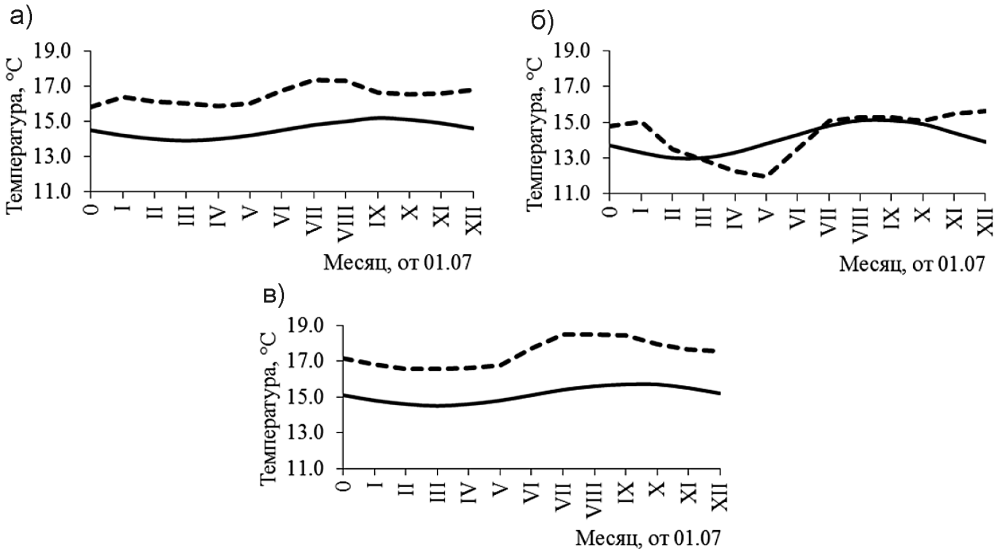

Рис. 7. Результаты моделирования температуры в пунктах № 1, 3, 4: пункт № 1 (а); пункт № 3 (б); пункт № 4 (в). Сплошная линия — численное моделирование в ANSYS CFX; пунктирная линия — показания датчика температуры

Таблица 5

Поправочные коэффициенты на теплофизические свойства грунтов

$a \cdot 10^7$	4	5	6	7	8
Значения коэффициента K_{aB} для среднегодовой величины теплового потока					
h = 1 м	0,73	1	1,26	1,52	1,74
h = 5 м	0,68	1	1,37	1,75	2,12
h = 10 м	0,66	1	1,40	1,83	2,29
h = 15 м	0,61	1	1,43	1,91	2,48
h = 20 м	0,65	1	1,47	2,00	2,59
Значения коэффициента K_{aA} для амплитуды колебаний величины теплового потока					
h = 1 м	0,92	1	1,06	1,12	1,16
h = 5 м	0,86	1	1,13	1,24	1,34
h = 10 м	0,87	1	1,12	1,24	1,35
h = 15 м	0,87	1	1,12	1,23	1,33
h = 20 м	0,87	1	1,12	1,24	1,34
Значения коэффициента $K_{a\omega}$ для начальной фазы колебаний величины теплового потока					
h = 1 м	0,96	1	1	1	1
h = 5 м	0,96	1	1	1,04	1,04
h = 10 м	0,96	1	1,04	1,07	1,08
h = 15 м	0,96	1	1,04	1,07	1,08
h = 20 м	0,96	1	1,04	1,07	1,08

Таблица 6

Поправочные коэффициенты для западной части РФ

h	1	5	10	15	20
K_{kB}	0,76	0,77	0,79	0,83	0,86
K_{kA}	1,05	0,98	1	0,99	0,99
$K_{k\omega}$	1,04	0,96	0,96	0,96	0,96

Зависимости величины теплового потока от теплофизических свойств грунтов и наружного климата

Формула (7) и коэффициенты, рассчитываемые по формулам (8), (10)—(12) справедливы для условий г. Новосибирска. В работах [8, 20] показано, что тепловой поток кроме глубины заложения зависит еще и от климатических условий и теплофизических характеристик окружающих станцию грунтов.

В исследованиях [20] были установлены коэффициенты формулы теплового потока для условий резко-континентального климата (г. Новосибирск) и умеренно-континентального климата (г. Москва) и для различного коэффициента температуропроводности окружающих станцию грунтов.

В рамках данной работы найдены поправочные коэффициенты K_{aB}, K_{aA}, $K_{a\omega}$, K_{kB}, K_{kA}, $K_{k\omega}$ к формуле (7). За значения коэффициентов, равные 1, принимаются следующие условия: коэффициент температуропроводности $a = 5 \cdot 10^{-7}$, климатические характеристики г. Новосибирска (резко-континентальный климат).

Значения коэффициентов сведены в табл. 5 и 6 для различных глубин заложения.

С учетом поправочных коэффициентов формула (7) запишется в виде:

$$q_h(\tau) = K_{aB}(h) \cdot K_{kB}(h) \cdot B(h) + \\ + K_{aA}(h) \cdot K_{kA}(h) \cdot A(h) \cdot \\ \cdot \cos\left(0{,}0172 \cdot \tau + K_{a\omega}(h) \cdot K_{k\omega}(h) \cdot \omega(h)\right) \quad (16)$$

Заключение

1. Определены аналитические зависимости теплообмена между помещениями станции закрытого типа метрополитена с двухпутным тоннелем и окружающими станцию грунтами в установившемся режиме эксплуатации в зависимости от:

- глубины заложения;
- теплофизических характеристик окружающих станцию грунтов;
- климатических особенностей региона строительства.

2. Для наземной станции закрытого типа и станции с глубинами заложения 1÷20 м определено время установления характера изменения теплового потока. Время достижения устойчивого циклического характера колебаний удельного теплового потока составит:

- для помещения пассажирской платформы — от 6 до 9 лет;
- для путевого отсека — от 6 до 7 лет;
- для помещения СТП — от 5 до 6 лет;
- для кассового зала — от 4 до 7 лет.

3. Показано, что годовая сумма теплопотерь в грунт и теплопоступлений от грунта для наземной станции и станций с глубиной заложения 1÷20 м в 1-ый год эксплуатации значительно больше (в 4,17—10,34 раза) теплопотерь в грунт от станции в установившемся режиме эксплуатации.

4. Проведена проверка соответствия результатов, полученных с помощью математической модели теплового состояния системы «грунт–станция закрытого типа» в ANSYS CFX, экспериментальным данным. Среднее отклонение составило не более 13,25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мельник А. П.*, *Мельник Г. А.*, *Полянкин А. Г.* Внедрение современных технологий при строительстве подземного участка городской внеуличной транспортной системы в Москве // Метро и тоннели. — 2013. — № 1. — С. 12—14.

2. *Старков А. Ю.* Технология строительства двухпутного перегонного тоннеля Санкт-Петербургского метрополитена // Метро и тоннели. — 2011. — № 2. — С. 8—9.

3. *Krasyuk A. M., Lugin I. V., Alferova E. L., Kiyanitsa L. A.* Evaluation of ventilation flow charts for double-line subway tunnels without air chambers // Journal of mining science. — 2016. — vol. 52. — № 4. — pp. 740—751.

4. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М., 2013. — 260 с.

5. СП 2.5.2623-10 Санитарные правила эксплуатации метрополитенов. Изменения и дополнения N 1 к СП 2.5.1337-03: утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2010: дата введ. 08.06.2010. — М., 2010. — 15 с.

6. *Кияница Л. А.*, *Лугин И. В.* Тепло-влажностный баланс как определяющий расчетный параметр раздельной вентиляции метрополитена со станциями закрытого типа // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016, — № 3. — т. 2. — С. 86—91.

7. *Sadokierski S., Thiffeault J.-L.* Heat Transfer in Underground Rail Tunnels // Physical Review E 77(5 Pt 2):055306, May 2008.

8. *Цодиков В. Я.* Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Недра, 1975. — 568 с.

9. *Пьянкова А. Ю.* Прогнозирование процесса изменения температуры грунта, окружающего станцию метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 1. — С. 407—414.

10. *Красюк А. М.*, *Лугин И. В.*, *Пьянкова А. Ю.* Исследование температурных полей грунтового массива, окружающего станции метрополитена мелкого заложения //ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 64—74.

11. *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. — pp. 359—378.

12. *Сотников А. Г.* Теплофизический расчет теплопотерь подземной части зданий // АВОК. — 2010. — № 8. — С. 62—67.

13. *Федорова Н. Н.*, *Вальгер С. А.*, *Данилов М. Н.*, *Захарова Ю. В.* Основы работы в ANSYS 17. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 210 с.: ил.

14. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М., 2013. — 96 с.

15. *Красюк А. М.*, *Лугин И. В.*, *Пьянкова А. Ю.* Определение размеров массива грунта, подверженного тепловому влиянию подземных станции и тоннелей метрополитена //ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 122—128.

16. *Электронное* пособие ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.

17. *Пьянкова А. Ю.* Прогнозирование тепловых режимов подземных сооружений метрополитенов мелкого заложения в условиях Западной Сибири: Дис.канд. тех. наук: 25.00.20. — Новосибирск, 2016. — 211 с.

18. *Kumar S.,Pahuja D. D., Bakre A., Saha S. K.* Prediction of unsteady heatgains using SES analysis in an interchange subway station of the Delhi metro / 11th International Symposium on Aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels. — Luzern, Switzerland: Earth Tech, 2003. — pp. 411—426.

19. *Красюк А. М.*, *Лугин И. В.* Исследование процессов теплопередачи в тоннеле метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2008. — № 6. — С. 112—117.

20. *Лугин И. В.*, *Алферова Е. Л.* Влияние годовой цикличности изменения теплового потока в грунт на расчетный тепловой баланс двухпутного тоннеля метрополитена // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 191—196. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Кияница Лаврентий Александрович — аспирант, инженер, e-mail: kla00@yandex.ru,
Федеральное агенство научных организаций (ФАНО России),
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 2, pp. 89–102.

L.A. Kiyanitsa

DETERMINING ANALYTICAL DEPENDENCES FOR HEAT FLOW IN SOIL FROM ENCLOSED-TYPE SHALLOW UNDERGROUND SUBWAY STATIONS WITH DOUBLE-TRACK TUNNELS

The article presents the procedure and results of the research into the process of heat exchange between an enclosed-type subway station with a double-track tunnel and enclosing soil. The mathematical model of the soil–enclosed station heat exchange is constructed and its conformity with the in situ research data obtained in Novosibirsk Metro is estimated. The heat exchange process is analyzed by means of the finite-element modeling of nonstationary heat transmission from the subway station rooms to soil. Based on the research data, the analytical dependences of the specific heat flow from a track section, passenger platform, combined rectifier–secondary substation and a ticket hall on the occurrence depth of the station, thermophysical properties of soil and the outward climate given the steady-state operation are obtained. It is shown that the change in the value of heat flow during a year given the steady-state operation is fluctuating and sign-alternating. For the enclosed-type stations at different depth of occurrence, the time of detecting the change in the heat flow behavior and the heat loss at the station in the initial operating period (operation year 1) are determined. It is found that the heat loss in the initial operating period is considerably higher than during the steady-state operation.

Key words: subway, enclosed-type station, soil, specific heat flow, occurrence depth, thermophysical properties of soil, heat exchange.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-89-102

AUTHOR

Kiyanitsa L.A., Graduate Student, Engineer, e-mail: kla00@yandex.ru,
The Federal Agency for Scientific Organizations (FASO Russia),
Chinakal Institute of Mining Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia.

REFERENCES

1. Mel'nik A. P., Mel'nik G. A., Polyankin A. G. *Metro i tonneli*. 2013, no 1, pp. 12—14.
2. Starkov A. Yu. *Metro i tonneli*. 2011, no 2, pp. 8—9.
3. Krasyuk A. M., Lugin I. V., Alferova E. L., Kiyanitsa L. A. Evaluation of ventilation flow charts for double-line subway tunnels without air chambers. *Journal of mining science*. 2016, vol. 52, no 4, pp. 740—751.
4. *Metropoliteny SP 120.13330.2012*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-02-2003 (Underground, set of rules 120.13330.2012. Revised edition SNiP 32-02-2003), Moscow, 2013, 260 p.
5. *Sanitarnye pravila ekspluatatsii metropolitenov SP 2.5.2623-10*. Izmeneniya i dopolneniya N 1 k SP 2.5.1337-03 (Sanitary rules of operation of subways, sanitary and epidemiological rules 2.5.1337-03. Changes and additions no 1 to set of rules 2.5.1337-03), Moscow, 2010, 15 p.
6. Kiyanitsa L. A., Lugin I. V. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2016, no 3, vol. 2, pp. 86—91.
7. Sadokierski S., Thiffeault J.-L. Heat Transfer in Underground Rail Tunnels. *Physical Review* E 77 (5 Pt 2):055306, May 2008.
8. Tsodikov V. Ya. *Ventilyatsiya i teplosnabzhenie metropolitenov*. Izd. 2-e (Ventilation and heating subways, 2nd edition), Moscow, Nedra, 1975, 568 p.

9. P'yankova A. Yu. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 1, pp. 407—414.

10. Krasyuk A. M., Lugin I. V., P'yankova A. Yu. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 3, pp. 64—74.

11. 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, pp. 359—378.

12. Sotnikov A. G. *AVOK*. 2010, no 8, pp. 62—67.

13. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* (Basics in ANSYS 17), Moscow, DMK Press, 2017, 210 p.

14. *Teplovaya zashchita zdaniy SP 50.13330.2012*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-02-2003 (Thermal protection of buildings, set of rules 50.13330.2012. Revised edition SNiP 23-02-2003), Moscow, 2013, 96 p.

15. Krasyuk A. M., Lugin I. V., P'yankova A. Yu. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 1, pp. 122—128.

16. *Elektronnoe posobie ANSYS*. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.

17. P'yankova A. Yu. *Prognozirovanie teplovykh rezhimov podzemnykh sooruzheniy metropolitenov melkogo zalozheniya v usloviyakh Zapadnoy Sibiri* (Prediction of thermal conditions of underground facilities shallow subways in Western Siberia), Candidate's thesis, Novosibirsk, 2016, 211 p.

18. Kumar S.,Pahuja D. D., Bakre A., Saha S. K. Prediction of unsteady heatgains using SES analysis in an interchange subway station of the Delhi metro. *11th International Symposium on Aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels*. Luzern, Switzerland: Earth Tech, 2003, pp. 411—426.

19. Krasyuk A. M., Lugin I. V. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2008, no 6, pp. 112—117.

20. Lugin I. V., Alferova E. L. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2016, vol. 2, no 3, pp. 191—196.

FIGURES

Fig. 1. A closed-end station of metropolitan with a double-track tunnel: 1 — track chamber; 2 — passenger platform; 3 — day surface; 4 — ground.

Fig. 2. Design scheme and boundary conditions for the mathematical model «gated Station ground»: ground station of the closed type (a); station gated shallow (b); h1—h5 — soil layers according to Table 1; I — ticket hall; II — the premises of the passenger platform; III — STP premises; IV — track chamber.

Fig. 3. Settling time fluctuations of the specific heat flow from the premises of the closed-type plant in the ground.

Fig. 4. Changes in the specific heat flow from the plant into the ground. Positive values heat loss into the ground, negative values heat gain from the soil: ground station (a); the depth of the 1 m (b); the depth of the 15 m (v); laying depth of 25 m (g).

Fig. 5: Heat loss by month, GJ/month, from the premises of the closed-type plant in the ground: ground station (a); the depth of the 1 m (b); the depth of the 3 m (v); laying depth of 5 m (g); the depth of the 10 m (d); laying depth of 20 m (e). Solid line the heat loss at the initial (1st year) operation; dashed line the heat loss in the steady operation phase. Positive values on the vertical axis the heat loss from the station, the negative heat gain from the soil.

Fig. 6. Cross section of ferrying «Siberia»—«Garin-Mikhailovsky», the design scheme and boundary conditions.

Fig. 7. The temperature of the modeling results in paragraphs N 1,3,4: Point N 1 (a); point N 3 (b); Item N 4 (v). Figures: solid line numerical simulation in ANSYS CFX; dashed line temperature sensor.

TABLES

Table 1. Thickness of soil layers along the route Lenin's Square—Krasny Prospect. Thermal loss at the enclosed-type station in the first operating year and during the state-state operation.

Table 2. Thermal loss at the enclosed-type station in the first operating year and during the state-state operation.

Table 3. Thermophysical properties of soil layers along the route Sibirskaya Station—Garin-Mikhailovsky's Square.

Table 4. Average bias of ANSYS CFX modeling results from the experimental data.

Table 5. Correction factor for thermophysical properties of soil.

Table 6. Correction factors for western Russia.