

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 3, Number 301 (2015), 55 – 66

**Transient temperature field in road****B.B. Teltayev, K.A. Aitbayev**  
[bagdatbt@yahoo.com](mailto:bagdatbt@yahoo.com), [aytbaev53@mail.ru](mailto:aytbaev53@mail.ru)

Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Kazakhstan

**Key words:** road, subgrade, transient temperature field, finite element method, calculation, experiment.

**Abstract:** On the basis of the finite element method a mathematical model of transient temperature field in road has been developed. The model takes into account solar radiation energy, energy of atmospheric emission, pavement surface emission and convective heat transfer between pavement surface and air. Computer software in the MATLAB mathematical package has been developed. Temperature variation curves for characteristic points of pavement structure and subgrade on a section of «Oskemen-Zyryanovsk» road from May 17 till September 30, 2014 by calculation have been defined. Comparison of calculated temperatures and temperatures obtained experimentally has showed high accuracy.

Asphalt concrete is one of the widely used road materials in the world. It is known that the strength and deformation properties of asphalt concrete are strongly dependent on temperature. Therefore, in the design phase, it is necessary to have a pavement of reliable data on the distribution and change of temperature in asphalt layers. For this purpose it is necessary to develop a mathematical model to predict a non stationary temperature field in road clothing and earthen surfaces depending on the climate and weather conditions.

УДК 625.7/.8

**Нестационарное температурное поле  
в автомобильной дороге****Б.Б. Телтаев, К.А. Айтбаев**  
Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Алматы, Казахстан  
[bagdatbt@yahoo.com](mailto:bagdatbt@yahoo.com), [aytbaev53@mail.ru](mailto:aytbaev53@mail.ru)

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, дорожная одежда, земляное полотно, нестационарное температурное поле, метод конечных элементов, расчет, эксперимент.

**Аннотация.** На основе метода конечных элементов разработана математическая модель нестационарного температурного поля в автомобильной дороге. Модель учитывает поступление энергии на поверхность дорожного покрытия от солнечной радиации и атмосферного излучения, оттока энергии за счет земного излучения и конвективный теплообмен между поверхностью дорожного покрытия и воздухом. На математическом пакете MATLAB разработана компьютерная программа. Расчетным путем в характерных точках конструкции дорожной одежды и земляного полотна на участке автомобильной дороги «Оскемен-Зырянск» определен температурный режим в период с 17 мая по 30 сентября 2014 года. Сравнение вычисленных температур с экспериментально полученными показало высокую сходимость.

**Введение**

Асфальтобетон является одним из повсеместно используемых дорожных материалов в мире. Известно, что прочностные и деформационные свойства асфальтобетона сильно зависят от температуры [1, 2]. Поэтому на стадии проектирования дорожных одежд необходимо располагать достоверными данными о распределении и изменении температуры в асфальтобетонных слоях [3, 4]. Для этого надо разработать математическую модель, позволяющую прогнозировать нестационарное температурное поле в дорожной одежде и земляном полотне в зависимости от климатических и погодных условий.

Первичным источником энергии, поступающей на поверхность земли (на поверхность дорожного покрытия), является Солнце [5]. Энергия Солнца до поверхности дорожного покрытия доходит в виде коротковолновой прямой солнечной радиации и коротковолновой рассеянной солнечной энергии [6]. Дорожная одежда, поглотив солнечную радиацию, начинает испускать длинноволновое излучение обратно в атмосферу. Между атмосферой и поверхностью дорожного покрытия постоянно происходит конвективный теплообмен. А в дорожной одежде и земляном полотне непрерывно происходит перенос тепла через кондукцию [7-9].

Разрабатываемая модель должна учитывать все перечисленные выше виды теплообмена, связанные с конструкцией дорожной одежды.

Авторами настоящей работы на основе метода конечных элементов разработаны и совершенствуются математические модели нестационарного температурного поля в многослойной дорожной одежде и земляном полотне автомобильной дороги [10-16].

#### Тепловой баланс и его составляющие

Тепловой баланс на поверхности дорожного покрытия представлен в виде:

$$q_k + q_c + q_s + q_a + q_e = 0, \quad (1)$$

где  $q_k$  – энергия, перемещаемая путем кондукции;

$q_c$  – энергия, перемещаемая путем конвекции;

$q_s$  – энергия, поступающая за счет суммарной солнечной радиации;

$q_a$  – энергия, поступающая атмосферным излучением;

$q_e$  – энергия излучения дорожной поверхности.

Конвективный теплообмен происходит между поверхностью дорожного покрытия и окружающим воздухом. Тепловой поток при конвективном теплообмене определяется по выражению:

$$q_c = h_c (T_0 - T_{air}), \quad (2)$$

где:  $h_c$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_0$  – температура поверхности дорожного покрытия, К;

$T_{air}$  – температура воздуха, К.

В работе [17] дана формула определения коэффициента конвективного теплообмена между поверхностью дорожного покрытия и окружающим воздухом:

$$h_c = 698,24 \cdot \left[ 0,00144 \cdot T_{av}^{0,3} \cdot U^{0,7} + 0,00097 \cdot (T_0 - T_{air})^{0,3} \right], \quad (3)$$

где  $U$  – скорость ветра, м/сек;

$T_{av}$  – средняя температура поверхности дорожного покрытия и воздуха,

вычисляемая как:

$$T_{av} = (T_0 + T_{air}) / 2. \quad (4)$$

Тепловой поток от суммарной солнечной радиации, поступающей на поверхность дорожной одежды, вычисляется по формуле:

$$q_r = I_0 \cdot k_r \cdot E_0 \cdot \cos(\varphi + \delta) \cdot k_h, \quad (5)$$

где  $I_0$  – солнечная постоянная, равная 1370 Вт/м<sup>2</sup>;

$k_r$  – коэффициент, учитывающий отражение солнечной радиации в открытый космос;

$E_0$  – коэффициент, учитывающий эксцентриситет орбиты Земли;

$\varphi$  – географическая широта местности, град;

$\delta$  – угол склонения Солнца, град;

$k_h$  – коэффициент, учитывающий изменение поступления солнечной радиации в течение светового дня.  
 Коэффициент, учитывающий эксцентриситет орбиты Земли, определяется по формуле:  

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cdot \cos(\Gamma) + 0.001280 \cdot \sin(\Gamma) + 0.000719 \cdot \cos(2\Gamma) + 0.000077 \cdot \sin(2\Gamma),$$
 (6)

где параметр  $\Gamma$  вычисляется по выражению:

$$\Gamma = \frac{2\pi d}{365}. \quad (7)$$

Здесь  $d$  – порядковый номер суток в году, начиная с 1 января.

Угол склонения Солнца находится из зависимости:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \times \left( \frac{180}{\pi} \right). \quad (8)$$

Коэффициент  $k_h$  вычисляется по формуле:

$$k_h = \frac{\sin\left(t - \frac{\pi}{2}\right) + 1}{2}, \quad (9)$$

где  $t$  – текущее время, которое изменяется с момента восхода Солнца  $t_{sr}$  до момента его захода  $t_{ss}$ .

Атмосфера поглощает солнечную радиацию и излучает длинноволновую радиацию в направлении земной поверхности. Поток тепла от этого излучения вычисляется по закону Стефана-Больцмана:

$$q_a = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{air}^4, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_a$  – коэффициент поглощения поверхности дорожного покрытия;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, равная  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ ;

$T_{air}$  – температура воздуха, К.

Поверхность Земли, поглощая поступающую солнечную радиацию, нагревается, и как черное тело, сама излучает длинноволновую радиацию в атмосферу. Тепловой поток, образованный за счет такого излучения вычисляется также по закону Стефана-Больцмана:

$$q_e = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot T_0^4, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_e$  – коэффициент излучения;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$T_0$  – температура поверхности дорожного покрытия, К.

#### Конечно-элементная модель

Нестационарное кондуктивное перемещение тепла в дорожной одежде и земляном полотне автомобильной дороги при его конечно-элементном моделировании записывается в виде [15, 16]:

$$[C] \frac{\partial T}{\partial t} + [K] \{T\} + \{Q\} = 0, \quad (12)$$

где  $[C]$  – матрица тепловой инерции системы конечных элементов;

$[K]$  – матрица теплопроводности системы;

$\{T\}$  – вектор температуры в узлах системы;

$\{Q\}$  – вектор теплового потока в системе.

Вклады каждого конечного элемента в матрицы  $[C]$ ,  $[K]$  и  $\{Q\}$  выражаются формулами:

$$[c^e] = \int_V \rho c [N^e]^T [N^e] dV, \quad (13)$$

$$[k^e] = \int_V [B^e]^T [D^e] [B^e] dV + \int_{S_c} h_c [N^e]^T [N^e] ds, \quad (14)$$

$$\{q^e\} = \int_{S_q} q [N^e]^T ds - \int_{S_c} h_c T_{air} [N^e]^T ds, \quad (15)$$

где  $[c^e]$  – матрица тепловой инерции конечного элемента;

$[k^e]$  – матрица теплопроводности конечного элемента;

$\{q^e\}$  – вектор теплового потока конечного элемента;

$[N^e]$  – вектор функций формы конечного элемента;

$\rho, c$  – плотность и теплоемкость материала конечного элемента.

В формуле (14) матрица теплопроводности конечного элемента  $[D^e]$  состоит из коэффициентов теплопроводности  $k_x$  и  $k_y$ :

$$[D^e] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Матрица  $[B^e]$  состоит из частных производных от функций формы конечного элемента по глобальным координатам  $x$  и  $y$ :

$$[B^e] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

В настоящей работе область исследования была дискретизирована на конечные элементы второго порядка с числом узлов 8. Функции формы такого конечного элемента, т.е. компоненты вектора  $[N^e]$  имеют следующий вид [15, 18, 19]:

$$\begin{aligned} N_1 &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(\xi+\eta+1), & N_2 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta), & N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1), \\ N_4 &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1+\xi), & N_5 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1), & N_6 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta), \\ N_7 &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(\xi-\eta+1), & N_8 &= \frac{1}{2}(1-\eta^2)(1-\xi). \end{aligned} \quad (18)$$

В выражениях (18)  $\xi$  и  $\eta$  представляют собой горизонтальную и вертикальную координаты точек конечного элемента в локальной системе координат  $\xi\eta$ .

Производные  $\frac{\partial N_1}{\partial x}, \frac{\partial N_2}{\partial x}, \dots, \frac{\partial N_8}{\partial x}, \frac{\partial N_1}{\partial y}, \frac{\partial N_2}{\partial y}, \dots, \frac{\partial N_8}{\partial y}$  определяются по зависимости:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix}, i = 1, 2, \dots, 8. \quad (19)$$

В зависимости (19)  $[J]^{-1}$  представляет собой матрицу, обратную к матрице Якоби  $[J]$ . Матрица Якоби в данном случае имеет вид:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Матрицы  $[c^e]$ ,  $[k^e]$  и вектор  $\{q^e\}$  конечного элемента определяются путем численного интегрирования в локальной системе координат. Переход от глобальной системы координат  $xOy$  к локальной системе координат  $\xi O\eta$  осуществляется через следующие замены переменных интегрирования:

$$\begin{aligned} dV &= |\det[J]| r d\xi d\eta, \\ ds &= |\det[J]| r d\xi, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $r$  – толщина конечного элемента, равная в нашем случае 1.

Тогда интегральные выражения в (13)-(15) записываются в следующем виде:

$$\int_V [B^e]^T [D^e] [B^e] dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B^e]^T [D^e] [B^e] |\det[J]| d\eta d\xi, \quad (22)$$

$$\int_V \rho c [N^e]^T [N^e] dV = \rho c \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [N^e]^T [N^e] |\det[J]| d\eta d\xi, \quad (23)$$

$$\int_{S^e} h_c [N^e]^T [N^e] dS = h_c \int_{-1}^1 [N^e]^T [N^e] |\det[J]| d\xi, \quad (24)$$

$$\int_{S^e} h_c T_{air} [N^e]^T dS = h_c T_{air} \int_{-1}^1 [N^e]^T |\det[J]| d\xi, \quad (25)$$

$$\int_{S^q} q [N^e]^T dS = q \int_{-1}^1 [N^e]^T |\det[J]| d\xi. \quad (26)$$

Численное интегрирование по выражениям (22)-(26) выполнено с помощью квадратурной формулы Гаусса-Лежандра. В этом случае формулы численного интегрирования имеют вид:

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f_1(\xi, \eta) d\eta d\xi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_i H_j f_1(\xi_i, \eta_j), \quad (27)$$

$$\int_{-1}^1 f_2(\xi) d\xi = \sum_{i=1}^n H_i f_2(\xi_i), \quad (28)$$

где  $f_1(\xi, \eta)$  – подынтегральные функции в выражениях (22) и (23);

$f_2(\xi)$  – подынтегральные функции в выражениях (24) - (26);

$H_i, H_j$  – весовые коэффициенты;

$\xi_i, \eta_i$  – координаты точек интегрирования в локальной системе координат;

$n$  – число точек интегрирования в направлениях осей координат  $\xi$  и  $\eta$ , которое в нашем случае равно 2.

Чтобы иметь значения температуры в точках исследуемой области, необходимо решить линейное дифференциальное уравнение (12) в каждый момент времени  $t$ . Для этого заменим производную  $\frac{\partial T}{\partial t}$  в уравнении ее конечно-разностным аналогом:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\{T\}_1 - \{T\}_0], \quad (29)$$

где  $\{T\}_0, \{T\}_1$  – векторы температуры в моменты времени  $t_0$  и  $t_1$  соответственно;

$\Delta t$  – интервал времени между моментами времени  $t_0$  и  $t_1$ , т.е.  $\Delta t = t_1 - t_0$ .

Разностное соотношение (29) написано для средней точки интервала времени  $\Delta t$ . Векторы  $\{T\}$  и  $\{Q\}$  также должны быть вычислены для той же средней точки интервала времени:

$$\{T\}^* = \frac{1}{2} [\{T\}_0 + \{T\}_1]; \quad (30)$$

$$\{Q\}^* = \frac{1}{2} [\{Q\}_0 + \{Q\}_1]. \quad (31)$$

Подставив выражения (29), (30) и (31) в уравнение (12), получим:

$$\left( \frac{2}{\Delta t} [C] + [K] \right) \{T\}_{t+\Delta t} = \left( \frac{2}{\Delta t} [C] - [K] \right) \{T\}_t - \{Q\}_{\Delta t}, \quad (32)$$

где  $\{T\}_t, \{T\}_{t+\Delta t}$  – векторы температуры в моменты времени  $t$  и  $t + \Delta t$  соответственно;

$\{Q\}_{\Delta t}$  – вектор теплового потока в системе, накопленного в интервале времени  $\Delta t$ .

Уравнение (32) представляет собой конечно-элементное решение задачи нестационарного теплообмена. Процесс его реализации является эффективным, так как матрицы  $[C]$  и  $[K]$  формируются один раз, и для каждого интервала времени вычисляется только вектор теплового потока  $\{Q\}_{\Delta t}$ .

Разработан программный комплекс на математическом пакете MATLAB, реализующий изложенную выше конечно-элементную модель нестационарного температурного поля в многослойной конструкции автомобильной дороги.

Далее расчетным путем по разработанному программному комплексу определим нестационарное температурное поле в конструкции дорожной одежды и земляном полотне на участке (км 0+075) автомобильной дороги «Оскемен-Зыряновск» в течение весеннее-летне-осеннего периода с 17 мая по 30 сентября 2014 года.

### Конструкция дорожной одежды

Конструкция дорожной одежды на рассматриваемом участке автомобильной дороги включает следующие слои:

1-й слой: Асфальтобетон мелкозернистый плотный,  $h_1 = 3$  см;

2-й слой: Асфальтобетон холодный,  $h_2 = 10$  см;

3-й слой: Песчано-гравийная смесь,  $h_3 = 10$  см;

Грунт земляного полотна – суглинок тяжелый песчанистый.

Расчетные значения характеристик материалов слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики материалов слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна

| Материал, грунт | Толщина, см | Плотность, кг/см <sup>3</sup> | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | Теплоемкость, Дж/(кг·К) |
|-----------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|
| Асфальтобетон   | 3           | 2400                          | 1,40                                                 | 1650                    |

|                                               |    |      |      |      |
|-----------------------------------------------|----|------|------|------|
| мелкозернистый<br>плотный                     |    |      |      |      |
| Асфальтобетон<br>холодный<br>(высокопористый) | 10 | 2000 | 1,10 | 1350 |
| Песчано-гравийная смесь                       | 10 | 1900 | 1,80 | 1000 |
| Грунт – суглинок<br>тяжелый песчанистый       | -  | 2000 | 1,62 | 1440 |

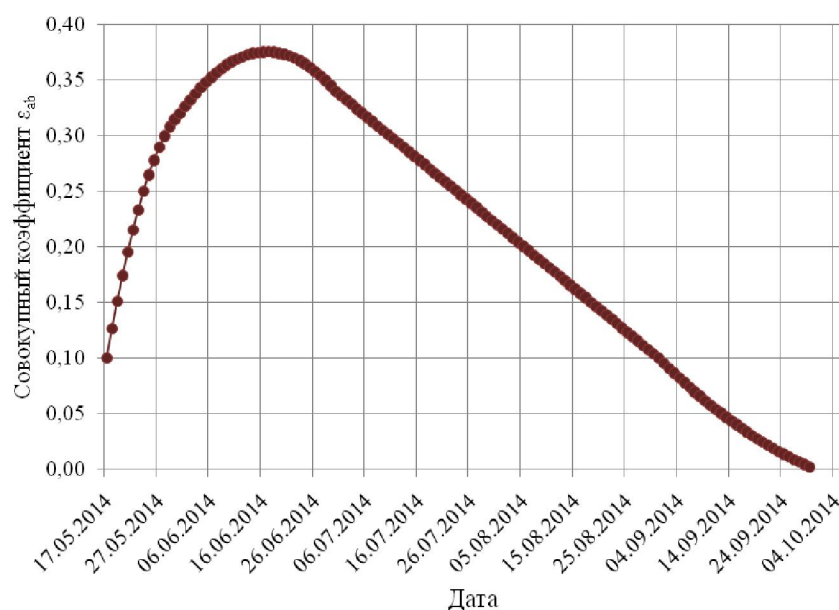
### Параметры модели

Средние значения коэффициента  $k_r$  в формуле (5) взяты следующими:

- с 17 мая по 31 мая 2014 года  $k_r = 0,35$ ;
- с 1 июня по 30 июня 2014 года  $k_r = 0,47$ ;
- с 1 июля по 31 июля 2014 года  $k_r = 0,35$ ;
- с 1 августа по 31 августа 2014 года  $k_r = 0,27$ ;
- с 1 сентября по 30 сентября 2014 года  $k_r = 0,08$ .

Так как выражения (10) и (11) имеют одинаковую структуру, влияние коэффициентов  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_e$  учтено совокупным коэффициентом  $\varepsilon_{ab}$ . Исследование показало, что он в течение рассматриваемого периода изменяется по сложной зависимости. В первый период продолжительностью 50 суток увеличивается по степенной зависимости, затем в течение 10 суток уменьшается по параболическому закону и за весь оставшийся период времени уменьшается практически по линейному закону (рисунок 1).

Рисунок 1. Изменение совокупного коэффициента  $\varepsilon_{ab}$



Расчетные значения времен восхода  $t_{sr}$  и захода Солнца  $t_{ss}$  в формуле (9) были приняты по данным из интернета и справочника [20] и изменялись в следующих пределах:

- время восхода Солнца  $t_{sr}$ : 4:43 (17 мая 2014 года)...  
6:28 (30 сентября 2014 года);
- время захода Солнца  $t_{ss}$ : 20:11 (17 мая 2014 года)...  
18:14 (30 сентября 2014 года).

Средняя скорость ветра в выражении (3) принята равной 5,2 м/с [21].

Географическая широта местности  $\varphi = 49^{\circ} 58' 44''$ .

### Датчики температуры и влажности

С целью долговременного измерения температуры и влажности в характерных точках дорожной одежды и земляного полотна на участке (км 0+075) автомобильной дороги «Оскемен-Зыряновск» летом 2013 года был установлен комплекс датчиков температуры и влажности. Датчики расположены в 11 точках конструкции дорожной одежды и земляного полотна, лежащих на одной вертикали. Последние датчики расположены на глубине 280 см.

### Конечно-элементная дискретизация

Расчетная область в виде прямоугольника с шириной 3,0 м и высотой 2,8 м была дискретизирована на 420 плоских четырехугольных конечных элементах второго порядка.

Граничные условия задавались следующим образом:

- значения температуры грунта на глубине 2,8 м задавались по результатам экспериментального измерения;
- на поверхности асфальтобетонного покрытия задавались значения суммарного теплового потока в соответствии с уравнением баланса (1). При этом температура воздуха принималась по данным измерения датчика;
- на вертикальных поверхностях расчетной области отсутствует теплообмен.

### Температурный режим

На рисунке 2 показан график изменения температуры воздуха. Видно, что температура воздуха в рассмотренный период изменялась по сложной зависимости. При этом можно отметить, что отрицательные температуры воздуха отмечались и в июне месяце. Осенью первые опускания температуры воздуха ниже  $0^{\circ}\text{C}$  имели место уже в первой декаде сентября. Максимальная температура, равная  $37^{\circ}\text{C}$ , имела место в середине июня. В летний период средняя максимальная температура составляла  $25-30^{\circ}\text{C}$ , а средняя минимальная –  $15-17^{\circ}\text{C}$ .

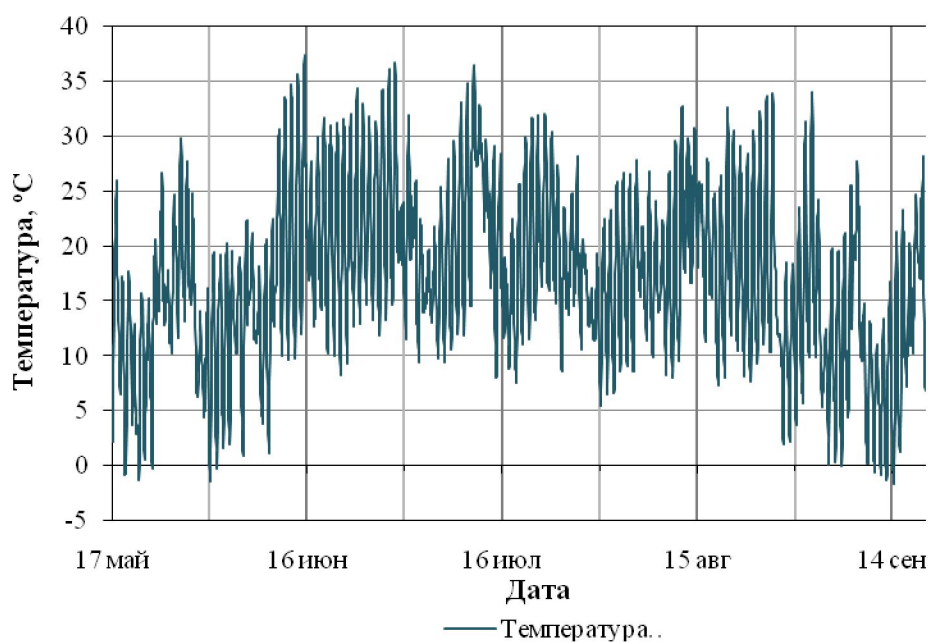


Рисунок 2. Изменение температуры воздуха на автомобильной дороге «Оскемен-Зыряновск» с 17 мая по 30 сентября 2014 года

С увеличением глубины амплитуда температурных колебаний уменьшается, но характер изменения температуры остается таким, как у температуры воздуха. Это можно видеть на рисунках 3-5, на которых показаны графики изменения температуры на глубинах 13, 23 и 35 см, т.е. на нижней поверхности слоя из холодного асфальтобетона, на нижней поверхности слоя из песчано-гравийной смеси и на глубине 12 см от поверхности земляного полотна соответственно.

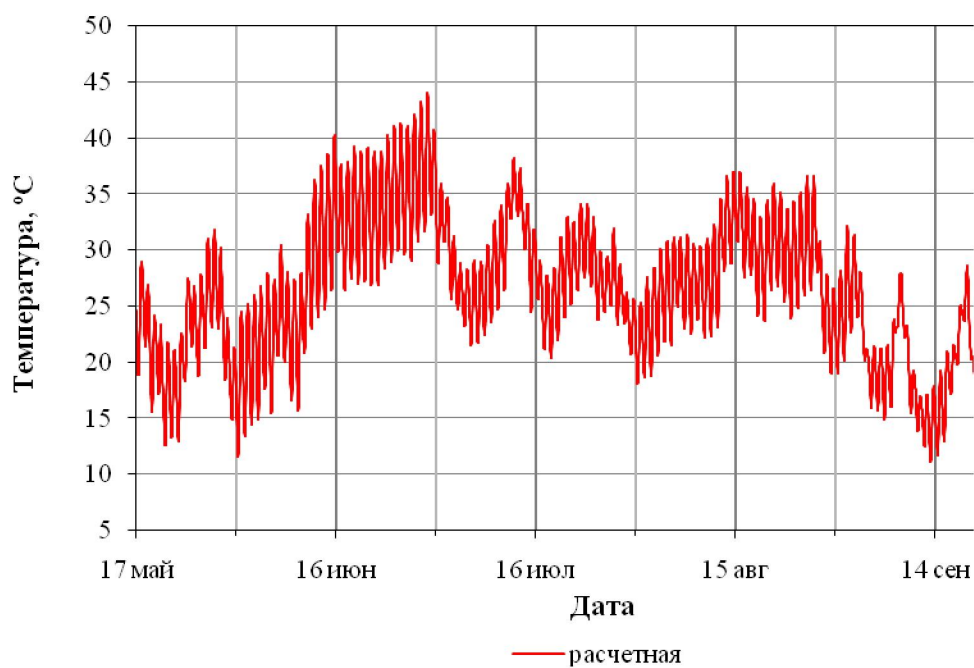


Рисунок 3. Изменение температуры на глубине 13 см с 17 мая по 30 сентября 2014 г.

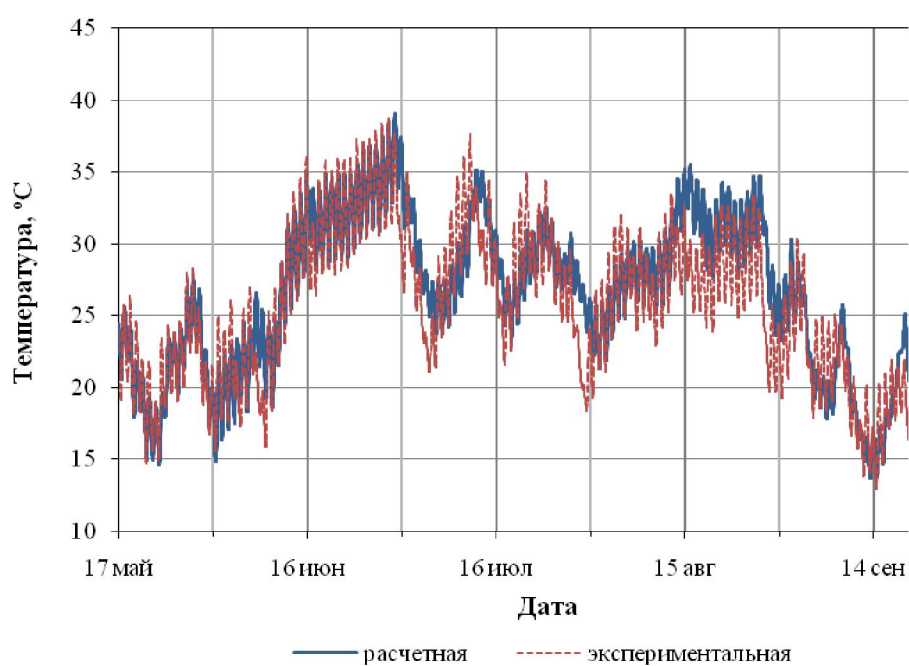
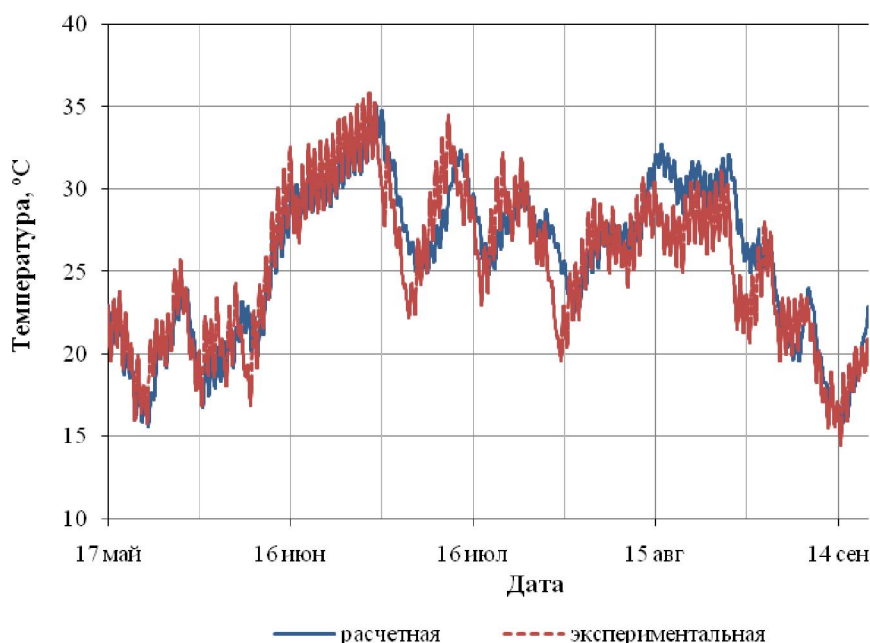


Рисунок 4. Изменение температуры на глубине 23 см

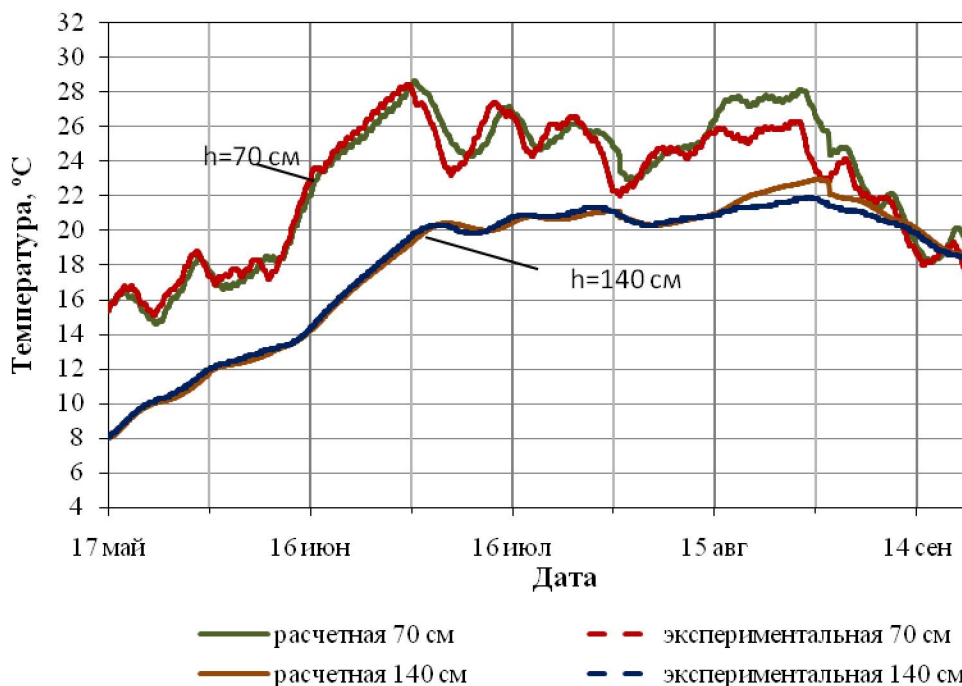
с 17 мая по 30 сентября 2014 г.

Рисунок 5. Изменение температуры на глубине 35 см с 17 мая по 30 сентября 2014 г.



Следует также отметить, что температура в асфальтобетонных слоях и в слое из песчано-гравийной смеси выше, чем температура воздуха. Даже на глубине 35 см максимальные суточные температуры сравнимы с температурой воздуха, а суточные минимальные температуры существенно выше, чем суточные минимальные температуры воздуха.

Рисунок 6. Изменение температуры на глубинах 70 см и 140 см с 17 мая по 30 сентября 2014 г.



На рисунках 6 и 7 даны графики изменения температуры на глубинах 70, 140, 210, 245 и 280 см. Хорошо видно, что с увеличением глубины влияние колебания температуры в суточном цикле

уменьшается и приблизительно на глубине 140 см практически исчезает. В точках, расположенных глубже этой, температурный режим определяется средним значением колебания температуры воздуха в годовом цикле.

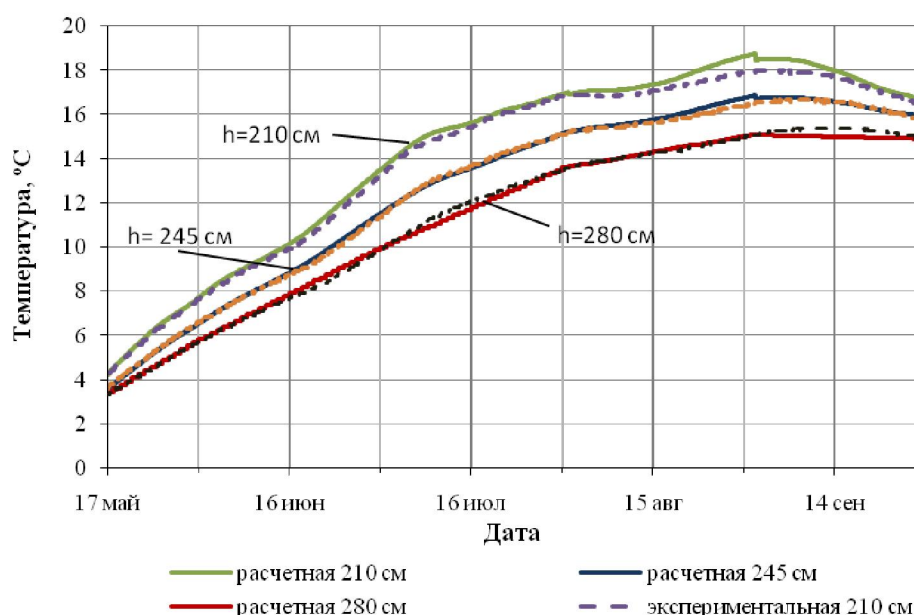


Рисунок 7. Изменение температуры на различных глубинах с 17 мая по 30 сентября 2014 г.

На рисунках 4-7 графики изменения температуры в точках, полученные расчетным путем даны в сравнении с графиками температуры, полученными экспериментальным измерением. Следует отметить высокую сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Оказалось, что максимальная величина разницы в значениях расчетных и экспериментальных температур уменьшается с увеличением глубины. Так, она на глубине 23 см составляет 3 °C, а на глубине 280 см - 0,5 °C.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yoder E., Witczak M. Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 1975.
- [2] Papagiannakis A., Masad E. Pavement Design and Materials. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2008.
- [3] Huang Y. Pavement Analysis and Design. Second Edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2004.
- [4] ARA, Inc, ERES Consultants Division. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. NCHRP Project 1-37 A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2004.
- [5] Geiger R. The Climate Near the Ground. Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1959.
- [6] Anderson E.E. Fundamentals of solar energy conversion. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1983.
- [7] Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. Clarendon Press, London, 1959.
- [8] Dewitt D.P., Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [9] Ozisik M.N. Heat Transfer: A basic Approach. McGraw-Hill, New York, 1985.
- [10] Айталиев Ш.М., Муртазин Б.С., Телтаев Б.Б., Алипов У.Т. Приближенное моделирование температурного режима дорожной конструкции // Наука и техника в дорожной отрасли. 2003. № 4. С. 18-20.
- [11] Телтаев Б.Б. Прогноз температурного режима дорожной конструкции методом конечных элементов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 2. С. 18-21.
- [12] Айталиев Ш.М., Телтаев Б.Б. Моделирование нестационарного температурного режима дорожных конструкций // Известия вузов. Строительство. 2006. № 8. С. 65-69.
- [13] Teltayev B., Aitbaev K. Assessment of the non-stationary temperature field in a road construction with an underground heat pipeline by the finite element method. International Journal of Pure and Applied Mathematics. Vol. 93, № 5, 2014, pp. 647-659.
- [14] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of temperature field in flexible pavement. Indian Geotechnical Journal. 08 July 2014, pp. 1-9.
- [15] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement. Geomechanics and Engineering, Vol. 8, No. 2, 2015, pp. 133-152.
- [16] Телтаев Б.Б., Мынжасаров Н.К. Об одном алгоритме решения нестационарной задачи теплопроводности / Труды Международной научно-практической конференции «Механика и строительство транспортных сооружений». – Алматы, 2010. – С. 104-106.

- [17] Hermanson A. Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature. Transportation Research Record 1966. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 134-141.
- [18] Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. John Wiley and Sons, New York, 1976.
- [19] Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method in Engineering science. McGraw-Hill, London, 1971.
- [20] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 18. Казахская ССР. Книга 1. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 516 с.
- [21] СНиП 2.04-01-2001\*. Строительная климатология. – Астана, 2005, – 216 с.

## REFERENCES

- [1] Yoder E, Witczak M (1975) Principles of Pavement Design. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. (in Eng.).
- [2] Papagiannakis A, Masad E (2008) Pavement Design and Materials. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. (in Eng.).
- [3] Huang Y (2004) Pavement Analysis and Design. Second Edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. (in Eng.).
- [4] ARA, Inc, ERES Consultants Division (2004) Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report. NCHRP Project 1-37 A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. (in Eng.).
- [5] Geiger R. The Climate Near the Ground. Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1959. (in Eng.).
- [6] Anderson E.E. Fundamentals of solar energy conversion. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1983. (in Eng.).
- [7] Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of Heat in Solids. Clarendon Press, London, 1959. (in Eng.).
- [8] Dewitt D.P., Incropera F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley and Sons, New York, 1996. (in Eng.).
- [9] Ozisik M.N. Heat Transfer: A basic Approach. McGraw-Hill, New York, 1985. (in Eng.).
- [10] Aitalyev S.M., Murtazyn B.S., Teltayev B.B., Alypov U.T. Approximate modeling of temperature regime of road structure. Science and technique in road field. № 4, 2003, pp. 18-20. (in Russ.).
- [11] Teltayev B.B. Prediction of temperature regime of road structure by finite element method. Science and technique in road field. № 2, 2007, pp. 18-21. (in Russ.).
- [12] Aitalyev S.M., Teltayev B.B. Modeling of transient temperature regime of road structures. High School Bulletins. Construction. № 8, 2006, pp. 65-69. (in Russ.).
- [13] Teltayev B., Aitbaev K. Assessment of the non-stationary temperature field in a road construction with an underground heat pipeline by the finite element method. International Journal of Pure and Applied Mathematics. Vol. 93, № 5, 2014, pp. 647-659. (in Eng.).
- [14] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of temperature field in flexible pavement. Indian Geotechnical Journal. 08 July 2014, pp. 1-9. (in Eng.).
- [15] Teltayev B., Aitbaev K. Modeling of transient temperature distribution in multilayer asphalt pavement. Geomechanics and Engineering, Vol. 8, No. 2 (2015). P. 133-152. (in Eng.).
- [16] Teltayev B.B., Mynzhasarov N.K. About one algorithm of transient heat transfer problem decision. Materials of International scientific and practical conference «Mechanics and construction of transport structures». – Almaty, 2010, pp. 104-106. (in Russ.).
- [17] Hermanson A. Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature. Transportation Research Record 1966. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 134-141. (in Eng.).
- [18] Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. John Wiley and Sons, New York, 1976. (in Eng.).
- [19] Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method in Engineering science. McGraw-Hill, London, 1971. (in Eng.).
- [20] Scientific and Applied Handbook on Soviet Union Climate. Issue 18. Kazakhstan. Book 1. Hydrometeorology, Leningrad, 1989, 516 p. (in Russ.).
- [21] СНиП 2.04-01-2001\*. Building Climatology. Astana, 2005, 216 p. (in Russ.).

## АВТОМОБИЛЬ ЖОЛЫНДАҒЫ СТАЦИОНАРЛЫҚ ЕМЕС ТЕМПЕРАТУРА ӨРІСІ

Б.Б. Телтаев, К.А. Айтбаев

[bagdatbt@yahoo.com](mailto:bagdatbt@yahoo.com), [aytbaev53@mail.ru](mailto:aytbaev53@mail.ru)

Қазақстан жол ғылыми зерттеу институты Алматы, Қазақстан

**Тірек сөздер:** автокөлік жолы, жол төсемесі, жер төсемесі, стационарлық емес температура өрісі, шектік элементтер әдісі, есептеу, тәжірибесі.

**Аннотация.** Шектік элементтер әдісі негізінде автокөлік жолындағы стационарлық емес температура өрісінің математикалық моделі жасалды. Модель жол жамылғысы бетіне Күн радиациясынан және атмосфералық шағылысудан түсетін энергияны, Жерден сәулеленуден энергияның кемуін және жол жамылғысының беті мен ауа арасындағы конвективтік жылу алмасуды есепке алады. MATLAB математикалық пакетінде компьютерлік бағдарлама жасалды. «Өскемен-Зырянск» автокөлік жолының бөлігінде жол төсемесі мен жер төсемесінің нүктелеріндегі температураның 2014 жылдың мамырдың 17-нен қыркүйектің 30-на дейінгі өзгеруі есептелді. Есептелген температуралардың тәжірибеде анықталған температуралармен салыстырылуы жоғары дәлдікті көрсетті.

Сведения об авторах:

1. Телтаев Бағдат Бурханбайұлы – доктор технических наук, профессор, президент АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт». Адрес: Республика Казахстан, 050061, г. Алматы, ул. Нурпеисова, 2а, АО «КаздорНИИ». e-mail: [bagdatbt@yahoo.com](mailto:bagdatbt@yahoo.com)

2. Айтбаев Кобланбек Айтбаевич - кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт». Адрес: Республика Казахстан, 050061, г. Алматы, ул. Нурпеисова, 2а, АО «КаздорНИИ». e-mail: [aytbaev53@mail.ru](mailto:aytbaev53@mail.ru)

Поступила 20.03.2015 г.