

## РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И ИХ ГРАДИЕНТОВ В ДОРОЖНЫХ БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Канд. техн. наук ПШЕМБАЕВ М. К.<sup>1)</sup>,  
доктора техн. наук, профессора КОВАЛЕВ Я. Н.<sup>2)</sup>, АКЕЛЬЕВ В. Д.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Комитет по автомобильным дорогам Республики Казахстан,

<sup>2)</sup> Белорусский национальный технический университет

E-mail: kov@tut.by

Воздействие тепловых потоков на бетонные покрытия при различных климатических характеристиках районов строительства и эксплуатации дорожных одежд резко снижает их прочность, коррозионно-, сдвиго- и морозоустойчивость, а в конечном итоге – долговечность. Причиной деформационных процессов является характер градиентных температурных полей в материалах дорожных одежд, развиваемых как при длительном (статическом), так и при кратковременном (динамическом) воздействии теплоты и массы, которые способствуют разрушению поверхностных слоев покрытий, контактирующих с наружным воздухом. При этом в порах насыщенного влагой покрытия вследствие движения автомобилей возникают пульсирующие гидродинамические давления, способствующие разрушению структуры материала поверхностных слоев, что приводит к возникновению необратимых деформаций (трещин и т. п.).

Разработана компьютерная программа на языке C++ для инженерных расчетов температурных и градиентных полей дорожных одежд из материалов с различными теплофизическими характеристиками покрытий и наружного воздуха в соответствии с граничными условиями третьего рода для полуграниченного тела. Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей распределения температуры по толщине покрытия в зависимости от его начальной температуры и теплофизических характеристик бетона.

**Ключевые слова:** температура, градиенты, покрытие, анализ, коэффициенты, граничные условия, параметры.

Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

## ESTIMATION OF THE CONCRETE PAVEMENT TEMPERATURE FIELDS AND THEIR GRADIENTS

PSHEMBAEV M. K.<sup>1)</sup>, KOVALEV Ya. N.<sup>2)</sup>, AKELYEV V. D.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *The Committee for Automobile Roads of the Republic of Kazakhstan,*

<sup>2)</sup> *Belarusian National Technical University*

The heat fluxes impact on the road-dressing concrete surfacing under different regions climatic conditions of the construction and maintenance dramatically degrades their solidity, corroding-, shifting- and frost-resistance, and ultimately – the service durability. The source of deformation processes is the character of the gradient temperature fields in the road dressing materials developing with both protracted (static) and short run (dynamic) heat-and-mass impacts that forward destruction of the pavement surface layers being in contact with free air. In addition, pulsating hydrodynamic pressures appear in the pores of moisture-laden pavement as a result of the vehicular traffic that foster material structure disruption of the surface layers leading to irreversible deformation incipency (cracks etc.).

The authors report of developing a C++ computer program for temperature and gradient fields engineering evaluations of the road dressings made of materials with various surfacing and free-air thermophysical characteristics in line with boundary conditions of the 3<sup>rd</sup> kind for semi-bounded body. The paper presents the evaluation results in form of graphical curves

of the temperature allocation along the surfacing thickness as function of its initial temperature and thermophysical characteristics of the concrete.

**Keywords:** temperature, gradients, pavement, analysis, coefficients, boundary conditions, parameters.

Fig. 4. Tab. 2. Ref.: 14 titles.

**Введение.** Энергия разрушения структуры поверхностного слоя покрытий автомобильных дорог и аэродромов компенсируется адгезионной прочностью структурных элементов поверхностных слоев материалов на разделе фаз, что практически периодически обеспечивается при содержании дорожных одежд [1–4]. Анализ работы поверхностных слоев бетонных покрытий при воздействии гидродинамических и тепловых факторов на основе термодинамических, тепло- и массообменных, неравновесных процессов с учетом климатологических процессов весьма проблематичен. Факторами, влияющими на долговечность бетонных покрытий, являются температурные поля и их градиенты в переходные периоды года (осень – зима – весна) [5]. В настоящее время не решены задачи аналитических расчетов напряжений, деструктивных процессов, деформационного отклика бетонных покрытий на температурные воздействия.

Первые исследования температурных волн с использованием теории функций комплексных переменных выполнили Н. Grober, W. Ludtin, В. А. Берг, Л. И. Горецкий, П. Шнейдер, О. Е. Власов, С. И. Муромов, Г. А. Селиверстов, А. М. Шкловер, Е. Г. Швидковский, Х. С. Карслоу, А. В. Лыков и др. [1, 6–10]. Например, С. П. Тимошенко [7] предложил соотношение для определения внутренних температурных напряжений при синусоидальных изменениях температуры покрытий. И. А. Медников [7] рассмотрел критические температурные перепады, вызывающие продольные изгибы бетонных плит. С учетом исследований В. Ульсона, Г. Жеффруа, К. Д. Некрасова, М. Г. Маслениковой и других модуль упругости  $E$  и предел прочности на сжатие  $R$  в зависимости от температуры  $t$  (0–300 °C) можно представить уравнениями [7]:

$$E = 2,47 \cdot 10^{10} - 5,95 \cdot 10^7 t, \text{ Па}; \quad (1)$$

$$R = \frac{8,73 \cdot 10^9 - 2,07 \cdot 10^6 t}{570 + t}, \text{ Па}. \quad (2)$$

Существенные факторы, влияющие на долговечность и износоустойчивость, – температурные поля, их градиенты в пограничных слоях материалов покрытий в переходные периоды года (осень – зима – весна), когда следует рассматривать физические и тепломассотехнические проблемы (аспекты) дорожных покрытий с учетом термодинамической теории структуры, термодиффузионной устойчивости, флуктуационных процессов. Сюда можно отнести следующие исследования бетонных покрытий:

- расчет температурных полей;
- анализ закономерностей тепло- и массопереноса;

- расчет температурных напряжений при линейном и гармоничном распределениях температур в покрытии [11];
- термодинамический анализ «теплого удара» и его влияние на деформации поверхностного слоя бетонных покрытий при наличии на их поверхности антигололедных реагентов.

Оценку плотности поверхностного слоя бетонных покрытий можно осуществить, например, методом определения воздухопроницаемости микроструктуры покрытий [12, 13].

**Расчет температурных полей дорожных покрытий.** Бетонные покрытия (одно- и многослойные неограниченные пластины, термические контактные сопротивления теплопроводности между которыми отсутствуют). Градиенты температур имеют место только в направлении координаты  $x$ , а по координатам  $y$  и  $z$  равны 0 (рис. 1). Таким образом, бетонное покрытие – это полуограниченное тело, в котором перенос теплоты и массы зависит от коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ , удельной массовой изобарной теплоемкости  $c_p$ , плотности  $\rho$ , температуропроводности  $a$ , коэффициентов теплоотдачи у поверхности  $\alpha(0, \tau)$  [2, 6, 14]. Например, бетон с характеристиками:  $\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_p = 1,08 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\lambda = 1,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  имеет коэффициент температуропроводности

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p} = 4,63 \cdot 10^{-7}, \frac{\text{М}^2}{\text{с}}. \quad (3)$$

Конвективный и радиационный теплообмен у поверхности бетонного покрытия происходит в соответствии с законами Ньютона – Рихмана (граничное условие третьего рода) и Стефана – Больцмана, а поле температур в различные моменты времени можно представить в соответствии со схемой рис. 1.

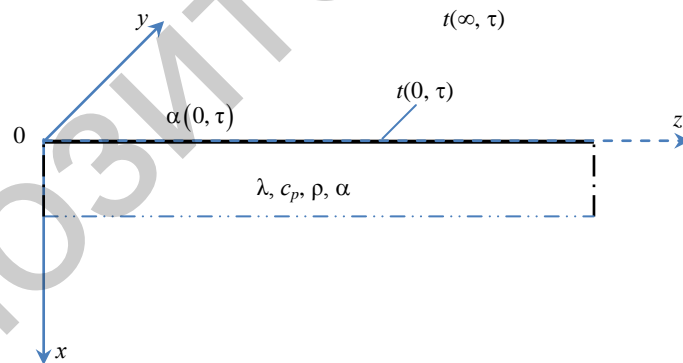


Рис. 1. Схема бетонного покрытия

Без учета теплоточков у торцевых поверхностей обочин бетонное покрытие можно рассматривать как полуограниченное тело, распространение теплоты в котором одномерное. Расчет температурного поля связан с решением дифференциального уравнения теплопроводности [6, 14]

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0; 0 < x < \infty) \quad (4)$$

с начальными и граничными условиями:

$$t(x, 0) = \text{const}; \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + \alpha [t(\infty, \tau) - t(0, \tau)] = 0; \quad (6)$$

$$t(\infty, \tau) = t(x, 0); \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Средний радиационно-конвективный коэффициент теплообмена у поверхности в расчетах принимали постоянным. Задачу решали операционным методом (Т. Г. Bromwich, Н. Jeffreys, А. М. Эфрос, А. М. Данилевский, Ван-дер-Поль и др.) [14].

Решение рассматриваемой задачи можно представить в виде

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t(x, 0)}{t(\infty, \tau) - t(x, 0)} = \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \exp \left[ \frac{\alpha}{\lambda} x + \left( \frac{\alpha}{\lambda} \right)^2 a\tau \right] \text{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right), \quad (8)$$

где  $\text{erfc}(u) = 1 - \text{erf}(u)$ ,  $\text{erf}(u)$  – функция (интеграл) ошибок Гаусса,

$$\text{erf}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) \left( \frac{1}{u} - \frac{1}{2u^3} + \frac{1 \cdot 3}{2^2 u^5} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 u^7} + \dots \right). \quad (9)$$

В первой части (8)  $u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}$ , во второй  $u = \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau}$ .

Если  $\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow \infty$ , то из граничного условия (6) следует:  $t(0, \tau) = t(\infty, \tau) = \text{const}$ , т. е. температура поверхности покрытия станет равна температуре воздуха. При  $u \geq 2,8$  ( $\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow \infty$ ) в соответствии с правилом Лопиталья функция  $\text{erfc}(u)$  стремится к нулю, тогда

$$\theta = \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}, \quad (10)$$

что тождественно решению задачи при охлаждении полуграниченного тела

$$\theta = \frac{t(x, 0) - t(x, \tau)}{t(x, 0) - t(\infty, \tau)}, \quad (11)$$

где  $t(x, 0) > t(\infty, \tau)$ .

Относительная температура поверхности бетонного покрытия может быть рассчитана из уравнения

$$\theta = \frac{t(0, \tau) - t(x, 0)}{t(\infty, \tau) - t(x, 0)} = 1 - \exp\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 a\tau\right] \operatorname{erfc} \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau}. \quad (12)$$

При больших отрезках времени  $\tau$  это уравнение не всегда корректно из-за резкого увеличения экспоненциальной функции, и его решение может быть получено исходя из следующего:

$$\exp(u^2) \operatorname{erfc}(u) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{1}{u} - \frac{1}{2u^3} + \frac{1}{4u^5} - \dots \right). \quad (13)$$

Для больших значений времени уравнение (12) имеет вид

$$\theta_k = 1 - \frac{1}{\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\pi a\tau}} \left( 1 - \frac{1}{2 \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 a\tau} + \frac{1}{4 \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^4 a^2 \tau^2} - \dots \right). \quad (14)$$

В критериальном виде оно может быть представлено выражением

$$\theta = \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}} - \exp\left[\operatorname{Bi}_y + (\operatorname{Bi}_y)^2 \sqrt{\operatorname{Fo}_x}\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}} + \operatorname{Bi}_y \sqrt{\operatorname{Fo}_x}\right), \quad (15)$$

где  $\operatorname{Fo}_x = \frac{a\tau}{x^2}$  – число Фурье;  $\operatorname{Bi}_y = \frac{\alpha y}{\lambda}$  – число Био;  $y$  – поперечный размер дорожного полотна.

По комплексу  $\operatorname{Bi}_y \sqrt{\operatorname{Fo}_x}$  находится обобщенный аргумент (число гомохронности) для нестационарного температурного поля полуограниченных тел в виде

$$N_{a,\tau} = \operatorname{Bi}_y \sqrt{\operatorname{Fo}_x} = \frac{a\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda c \rho}} = \frac{a}{S} \sqrt{\tau}, \quad (16)$$

где  $S$  – коэффициент теплоусвоения дорожного покрытия, характеризующий способность материала принимать (отдавать) теплоту при колебании температуры на его поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С); он равен отношению количества теплоты, передаваемой через поверхность тела в единицу времени при разности температур между поверхностью и окружающей средой в один градус, к коэффициенту тепловой активности материала

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c_p \rho}{\tau}}. \quad (17)$$

Для технических расчетов [6] имеются корреляционные зависимости безразмерной температуры от комплекса  $\operatorname{Bi}_x \sqrt{\operatorname{Fo}_x}$  для чисел  $\frac{1}{2\sqrt{\operatorname{Fo}_x}}$ .

Плотность теплового потока через поверхность бетонного покрытия составит

$$q = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x}, \quad (18)$$

следовательно:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\lambda} [t(\infty, \tau) - t(x, 0)] \exp\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \alpha \tau\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\alpha \tau}\right), \quad (19)$$

а плотность теплового потока от воздуха к поверхности покрытия

$$q = \alpha (t(\infty, \tau) - t(x, 0)) \exp\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \alpha \tau\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\alpha \tau}\right). \quad (20)$$

Из (20) следует, что поток теплоты от воздуха к поверхности покрытия в начальные моменты времени максимален, затем уменьшается и стремится к нулю при  $\tau \rightarrow \infty$ . В начальный момент времени плотность теплового потока равна

$$q_{\max} = \alpha [t(\infty, \tau) - t(x, 0)]. \quad (21)$$

**Программное обеспечение для расчета температурных полей дорожных покрытий.** Для инженерных расчетов разработано компьютерное приложение, позволяющее получить численные значения температур покрытий при различных теплофизических параметрах воздуха и дорожных материалов в соответствии с рассматриваемой физико-математической моделью. Программирование выполнено на языке C++. Результаты расчетов представлены графическими зависимостями температуры (ось ординат, °C) и расстоянием от поверхности по толщине (ось абсцисс, м) для рассматриваемого временного интервала. Ввод параметров модели должен осуществляться в соответствующие текстовые поля интерфейса.

Возможность масштабирования реализована в интерактивном режиме манипулятором «мышь» при помощи операций drag'n'drop (перетаскивание) и scroll (прокрутка колесика) для изменения области отображения и масштаба соответственно, для детализации данных выбранного интервала кривой с необходимой точностью.

В левом поле происходит осуществление записи выполненного расчета, после чего возможен экспорт всех записанных данных в файл в формате PDF с необходимым типографическим разрешением в пикселях. Расширение функционала возможно за счет применения к математическим, физико-техническим моделям различных климатических условий и адаптации представления данных при инженерных теплотехнических расчетах покрытий из различных материалов. Графические результаты расчетов температурных полей покрытий при различных их начальных температурах и наружного воздуха представлены на рис. 2.

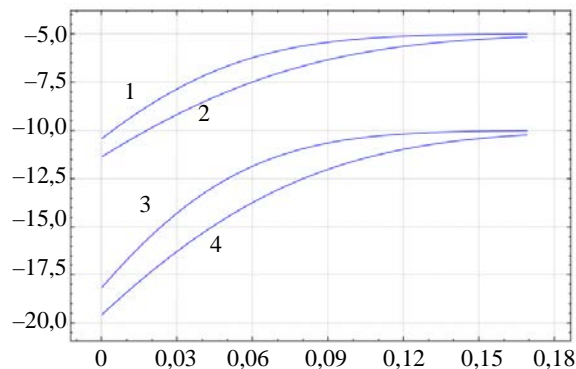


Рис. 2. Температурное поле покрытия при коэффициенте теплопроводности материала 1,05 Вт/(м·К), коэффициенте теплообмена у поверхности 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К), начальной температуре, °С: 1, 2 – (-5); 3, 4 – (-10), температуре наружного воздуха, °С: 1, 2 – (-15); 3, 4 – (-25); в момент времени, с: 1, 3 – 3600; 2, 4 – 7200

Температура бетонного покрытия в различные моменты времени для разных расстояний от поверхности приведена в табл. 1 ( $t(x,0) = -4$  °С;  $t(\infty, \tau) = -20$  °С;  $\lambda = 1,05$  Вт/(м·К);  $\alpha = 19$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $a = 4,63 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\rho = 2100$  кг/м<sup>3</sup>).

Таблица 1

| Временной интервал $\tau$ , с | Температура бетонного покрытия $t$ , °С, при расстоянии $x$ , м |       |       |       |
|-------------------------------|---|-------|-------|-------|
|                               | 0,02  | 0,05  | 0,07  | 0,13  |
| 720                           | -5,52   | -4,12 | -4,01 | -4,00 |
| 1440                          | -6,85   | -4,65 | -4,18 | -4,00 |
| 2160                          | -7,81   | -5,25 | -4,49 | -4,01 |
| 2880                          | -8,55   | -5,83 | -4,86 | -4,04 |
| 3600                          | -9,15   | -6,35 | -5,25 | -4,10 |
| 4320                          | -9,65   | -6,83 | -5,63 | -4,19 |
| 5040                          | -10,08  | -7,26 | -5,99 | -4,30 |
| 5760                          | -10,46  | -7,65 | -6,33 | -4,42 |
| 6480                          | -10,79  | -8,00 | -6,65 | -4,56 |
| 7200                          | -11,08  | -8,33 | -6,95 | -4,70 |
| 7920                          | -11,35  | -8,62 | -7,23 | -4,85 |
| 8640                          | -11,59  | -8,90 | -7,50 | -5,01 |
| 9360                          | -11,81  | -9,16 | -7,75 | -5,16 |
| 10080                         | -12,02  | -9,39 | -7,99 | -5,32 |
| 10800                         | -12,20  | -9,62 | -8,21 | -5,47 |

**Расчет градиентов температур бетонных покрытий.** Для расчета градиентов температур разработана компьютерная программа. Результаты расчетов представлены в табл. 2 в зависимости от расстояния по глубине бетонного покрытия при определенных его теплофизических характеристиках ( $\tau = 3600$  с;  $\lambda = 1,05$  Вт/(м·К);  $\alpha = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $a = 4,63 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\rho = 2100$  кг/м<sup>3</sup>); приведены также значения градиентов температур для 3600 и 7200 с при начальных температурах покрытия -10, -5, 0 °С. Примеры расчетов градиентов температур представлены на рис. 3, 4.

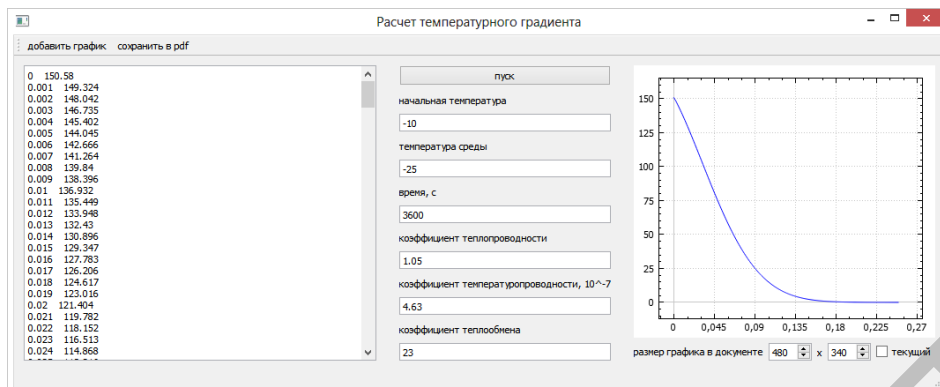


Рис. 3. Пример расчета градиентов температур

Таблица 2

Поле градиентов температур дорожных покрытий

| Расстояние от поверхности покрытия по глубине, м | Градиент температуры gradt, °C/м, при                           |   |  |  |
|--|---|---|--|--|
|  | $t(x, 0) = -10\text{ °C};$<br>$t(\infty, \tau) = -25\text{ °C}$ | $t(x, 0) = -10\text{ °C};$<br>$t(\infty, \tau) = -20\text{ °C}$ | $t(x, 0) = -5\text{ °C};$<br>$t(\infty, \tau) = -15\text{ °C}$ | $t(x, 0) = 0\text{ °C};$<br>$t(\infty, \tau) = -5\text{ °C}$ |
| 0,01   | 136,93  | 91,28   | 75,59  | 45,64  |
| 0,02   | 121,40  | 80,93   | 70,58  | 40,46  |
| 0,03   | 104,89  | 69,93   | 65,03  | 34,96  |
| 0,04   | 88,29   | 58,86   | 59,11  | 29,43  |
| 0,05   | 72,37   | 48,25   | 53,02  | 24,12  |
| 0,06   | 57,76   | 38,50   | 46,91  | 19,25  |
| 0,07   | 44,86   | 29,91   | 40,94  | 14,95  |
| 0,08   | 33,91   | 22,60   | 35,24  | 11,30  |
| 0,09   | 24,93   | 16,62   | 29,92  | 8,31   |
| 0,1  | 17,83   | 11,89   | 25,05  | 5,94   |
| 0,11   | 12,40   | 8,27  | 20,68  | 4,13   |
| 0,12   | 8,39  | 5,59  | 16,84  | 2,79   |
| 0,13   | 5,51  | 3,67  | 13,52  | 1,83   |
| 0,14   | 3,52  | 2,35  | 10,70  | 1,17   |
| 0,15   | 2,19  | 1,46  | 8,35   | 0,73   |

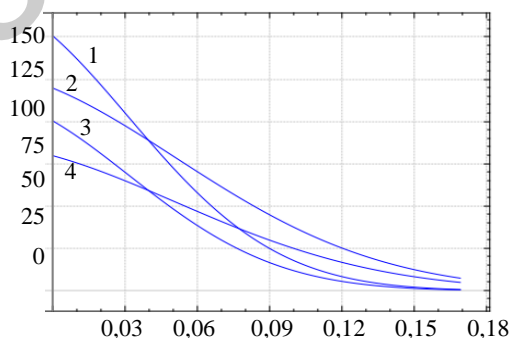


Рис. 4. Градиенты температур по глубине (ось абсцисс, м) при: коэффициенте теплопроводности материала 1,05 Вт/(м·К), коэффициенте теплообмена у поверхности 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К), начальной температуре: 3, 4 – (-5) °C; 1, 2 – (-10) °C; температуре наружного воздуха: 3, 4 – (-15) °C; 1, 2 – (-25) °C в моменты времени: 1, 3 – 3600 с; 2, 4 – 7200 с



## ВЫВОДЫ

1. Динамические нагрузки на бетонные, битумоминеральные дорожные покрытия во многих климатических районах приводят к снижению их прочности, долговечности, трещиностойкости вследствие деформации структур покрытий, которые зависят от температурных полей и их градиентов.

2. Физико-математической моделью одно- или многослойного дорожного покрытия является полугограниченное тело при граничных условиях третьего рода.

3. Разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать температурные и градиентные поля покрытий с различными теплофизическими характеристиками в широком диапазоне параметров наружного воздуха, продолжительности теплообмена и начальных температур дорожных одежд. Представлены примеры результатов расчета термоградиентных и полей температур дорожных покрытий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести / С. В. Александровский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.

2. Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар; пер. с фр. С. Г. Беды [и др.]. – М.: Мир, 1968. – 464 с.

3. Хрусталева, Б. М. Техническая термодинамика: учеб. для студ. строит. и энергетич. спец.: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. – Минск: Технопринт, 2004. – Ч. 1. – 485 с.

4. Лебедев, Н. Н. Температурные напряжения в теории упругости / Н. Н. Лебедев. – М.: ОНТИ, 1937. – 110 с.

5. Строительная климатология: СНиП 23-01-99. – Взамен СНиП 2.01.01-82; введ. 01.01.2000. – М.: Госстрой России, 2000. – 58 с.

6. Лыков, А. В. Теория теплопроводности: учеб. пособие для теплотехн. спец. вузов / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

7. Горещкий, Л. И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия / Л. И. Горещкий. – М.: Транспорт, 1965. – 286 с.

8. Ludt W. Temperaturänderungen in Betonk Orpern Infolge der Abbindevarme und Unter dem Einfluss der Umgebungs Temperatur und der Sonnenstrahlung / W. Ludtin. – Der Bauingenieur, 1924.

9. Швидковский, Е. Г. К теории плоских температурных волн / Е. Г. Швидковский // Журнал технической физики. – 1940. – Т. X, вып. 2. – С. 145–167.

10. Gröber, H. Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges / Gröber, Heinrich. – Berlin: Springer, 1921. – 271 p.

11. Гейтбуд, Б. Е. Температурные напряжения применительно к самолетам, судам, турбинам и ядерным реакторам / Б. Е. Гейтбуд. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1959. – 349 с.

12. Ковалев, Я. Н. К вопросу о воздухопроницаемости дорожного строительства / Я. Н. Ковалев, В. Д. Акельев, Р. Н. Смольский // Автомобильный транспорт и дороги. – 1975. – № 2. – С. 193–199.

13. Акельев, В. Д. О микроструктуре дорожного асфальтобетона / В. Д. Акельев, М. Т. Солдаткин, Я. Н. Ковалев // Автомобильный транспорт и дороги. – 1979. – № 6. – С. 135–139.

14. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск: Бел. национ. техн. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 606 с.

## REFERENCES

1. Aleksandrovskiy, S. V. (1973) *Temperature and Humidity Fluctuations Computation of the Concrete and Concrete-Steel Constructions with Account of the Creeping*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Stroyizdat. 432 p. (in Russian).

2. M i s n a r, A. (1968) *Thermal Conductivity of Solid Bodies, Liquids, Gases and Their Composites*. Trans. from French. Moscow, Mir. 464 p. (in Russian).
3. K h r u s t a l y e v, B. M., Nesenчук, A. P., & Romaniuk, V. N. (2004) *Technical Thermodynamics*. Part I. Minsk, Technoprint. 485 p. (in Russian).
4. L e b e d e v, N. N. (1937) *Thermal Stresses in Elasticity Theory*. Moscow, ONTI. 110 p. (in Russian).
5. C o n s t r u c t i o n Norms and Rules 23-01-99. Constructional Climatology. Moscow, Gosstroy of Russia, 2000, 58 p. (in Russian).
6. L y k o v, A. V. (1967) *Theory of Heat Conduction: Tutorial Aid for Heat-Engineering Specialities of Higher Educational Institutions*. Moscow, Vysshaya Shkola. 600 p. (in Russian).
7. G o r e t s k i y, L. I. (1965) *Theory and Estimation of the Concrete Road Surfacing for the Temperature Action*. Moscow, Transport. 286 p. (in Russian).
8. L u d t i n, W. (1924) *Temperaturänderungen in Betonk Orpern Infolge der Abbindevarme und Unter dem Einfluss der Umgebungs Temperatur und der Sonnenstrahlung*. Der Bauingenieur (German).
9. S h v i d k o v s k i y, Ye. G. (1940) On the Theory of the Plain Temperature Waves. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* [Journal of Technical Physics], X (2), 145–167 (in Russian).
10. G r ö b e r, H. (1921) *Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges*. Berlin, Springer. 271 p. (German).
11. G e i t b u d, B. E. (1959) *Temperature Stresses as Applied to the Aeroplanes, Shells, Turbines, and Nuclear Reactors*. Moscow, Foreign Literature Publishing House. 349 p. (in Russian).
12. K o v a l y e v, Ya. N., Akyel'ev, V. D., & Smol'skiy, R. N. (1975) On Air Permeability of the Road Construction. *Avtomobil'nyi Transport i Dorogi* [Mechanical Transport and the Roads], 2, 193–199 (in Russian).
13. A k y e l ' e v, V. D., Soldatkin, M. T., & Kovalev, Ya. N. (1979) On Microstructure of the Road Asphalt Concrete. *Avtomobil'nyi Transport i Dorogi* [Mechanical Transport and the Roads], 6, 135–139 (in Russian).
14. K h r u s t a l y e v, B. M., Nesenчук, A. P., Timoshpol'skii, V. I., Akel'ev, V. D., Sednin, V. A., Kopko, V. M., & Nerez'ko, A. V. (2007) *Heat and Mass Transfer. Part I*. Minsk: Belarusian National Technical University. 606 p. (in Russian).

Представлена кафедрой  
теплоснабжения и вентиляции

Поступила 24.04.2015

УДК 536.24

## ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОТДАЧИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ КРУГЛОТРУБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### Часть 2

Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. СУХОЦКИЙ А. Б.<sup>1)</sup>, магистр техн. наук ЯЦЕВИЧ А. В.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный технологический университет,

<sup>2)</sup> ОАО «Минский завод автоматических линий имени П. М. Машерова»

E-mail: alk2905@mail.ru

Показано, что при оценке действительной тепловой эффективности от применения вихревой интенсификации теплоотдачи необходимо учитывать увеличение теплоотдающей площади поверхности трубы соответствующими углублениями (выемками, лунками), которая в зависимости от их геометрических параметров может изменяться от 4 до 280 %, что вызывает повышение теплоотдачи с одновременным ростом ее от турбулизации пограничного слоя потока вихрями, генерируемыми лунковыми турбу-