

УДК 625.768.5:624.144.53

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-3-196-200

*Е.И. КИРЯКОВ, П.В. ЗОМБЕК, Н.В. ВИТРУК,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПОДОГРЕВА ПОКРЫТИЯ МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЕДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Разработана теоретическая модель конструкции дорожной одежды с электроподогревом покрытия для предупреждения образования гололедных явлений на мостовых сооружениях. В качестве теплоносителя используется геосетка с нанокomпозиционным слоем, уложенная между слоями асфальтобетонного покрытия. Подобрана методика расчета данной теплотехнической задачи дифференциальными уравнениями теплопроводности при постоянстве физических параметров и различных граничных условиях.

Ключевые слова: теоретическая модель; гололедные явления; асфальтобетонное покрытие; геосетка; теплопроводность; теплофизические характеристики.

Для цитирования: Киряков Е.И., Зомбек П.В., Витрук Н.В. Разработка теоретической модели электроподогрева покрытия мостового сооружения для предупреждения образования гололедных явлений // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 3. С. 196–200.

*E.I. KIRYAKOV, P.V. ZOMBEEK, N.V. VITRUK,**Tomsk State University of Architecture and Building*

THEORETICAL MODEL OF HOT BRIDGEWORK PAVEMENT FOR GLAZE PREVENTION

The paper proposes a theoretical model of the hot bridgework pavement for glaze prevention. Geomesh with a nanocomposite layer between the asphalt concrete pavement layers is used as a heater. The calculation methodology is suggested to solve the heat engineering problem using the thermal conductivity differential equations at constant physical parameters and different boundary conditions.

Keywords: theoretical model; glaze; asphalt concrete pavement; geomesh; thermal conductivity; thermal and physical characteristics.

For citation: Kiryakov E.I., Zombek P.V., Vitruk N.V. Razrabotka teoreticheskoi modeli elektropodogreva pokrytiya mostovogo sooruzheniya dlya preduprezhdeniya obrazovaniya gololednykh yavlenii [Theoretical model of hot bridgework pavement for glaze prevention]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitektturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 3. Pp. 196–200. (rus)

Снижение коэффициента сцепления до минимальных значений из-за образования на дорожных покрытиях гололедных явлений приводит к большому числу дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Статистические данные о количестве ДТП на сети автомобильных дорог общего пользования [1] (на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры) подтвер-

ждают, что наиболее опасными как по количеству ДТП, так и по тяжести их последствий являются зимний и весенне-осенний периоды. В связи с этим вопрос о предотвращении образования гололедных явлений на автомобильных дорогах в условиях постоянно растущей интенсивности движения и уровня загрузки является актуальным.

На сегодняшний день существуют различные методы и технологии для борьбы с зимней скользкостью на дорогах. Результаты анализа этих методов, приведенные в статьях [2, 3], показывают, что наиболее перспективными технологиями по предотвращению гололеда в настоящее время являются тепловые способы, основанные на кратковременном нагреве верхнего слоя дорожной одежды глубинными нагревательными элементами, монтируемыми между слоями покрытия и автоматически включающимися в период снегонакопления или льдообразования. Однако применяемые или предлагаемые авторами технологии имеют те или иные недостатки, которые не позволяют использовать их в дорожных сооружениях, расположенных в районах Сибири и Крайнего Севера [3]. Для использования теплового метода в данных районах, характеризующихся большим количеством дней с гололедом, в Томском государственном архитектурно-строительном университете разработана новая концепция ликвидации зимней скользкости. Данный тепловой метод основан на использовании в качестве теплоносителя нанокompозиционный материал [4], нанесенный на поверхность геосетки и уложенный между слоями капитальных или усовершенствованных покрытий (рисунок) [5]. Нагрев покрытия происходит в результате излучения тепловой энергии с поверхности тепловыделяющего слоя.

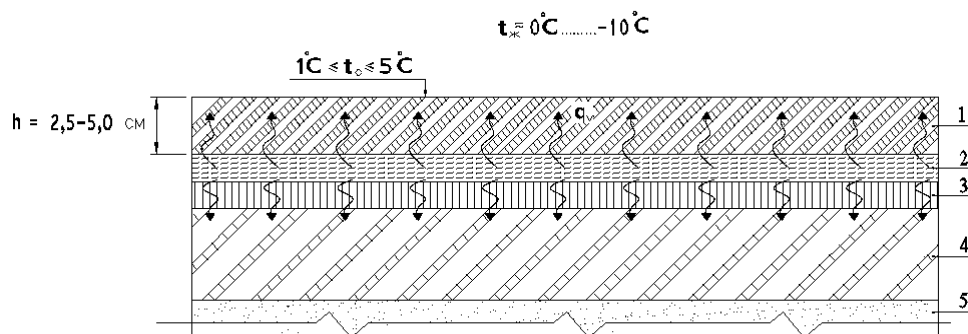


Схема конструкции дорожной одежды с теплоносителем на геосетке:

1 – верхний слой покрытия толщиной в пределах 2,5–5,0 см; 2 – тепловыделяющее покрытие, нанесенное на геосетку 3; 4 – нижний слой покрытия; 5 – защитный слой мостовой конструкции, или основание дорожной одежды; t_0 – температура на поверхности тела; $t_{ж}$ – температура окружающей среды; q_v – источник тепла; стрелками на рисунке изображено тепло, выделяемое теплоносителем

Рассматриваемая на рисунке модель конструкции дорожной одежды с теплоносителем предполагает, что часть тепла будет уходить в нижние слои конструкции дорожной одежды, большая – проникать в верхний слой покрытия и нагревать его поверхность. При этом не будут образовываться гололедные явления на покрытии при понижении температуры и повышении влажности.

Для обоснования данной рабочей гипотезы необходимо решить следующую теплотехническую задачу – определить величину нагрева нанокomпозиционного слоя на геосетке и время теплового воздействия до достижения следующих условий:

- 1) температура поверхности покрытия должна находиться в пределах плюс 1–5 °С с учетом всех теплопотерь;
- 2) толщина слоя покрытия в зависимости от теплопроводности слоя должна варьироваться от 2,5 до 5,0 см;
- 3) время достижения заданной температуры поверхности не должно превышать 30 мин.

Для решения поставленной задачи необходимо воспользоваться дифференциальным уравнением теплопроводности. Для нестационарной задачи с источником теплоты уравнение записывается в следующем виде [6, 7]:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t_i + \lambda \frac{qv}{\rho_i c_i}, \quad (1)$$

где $i = 1 \dots n$, количество уравнений равно количеству слоев (n); t_i – температура на границе слоя, °С; τ – время, ч; qv – объемная плотность теплового потока, Вт/м³; α – коэффициент температуропроводности, Вт/(м²·К); λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град); c_i – удельная теплоемкость, кДж/(кг·град); ρ_i – плотность, кг/м³; $\nabla^2 t_i$ – оператор Лапласа.

Значение оператора Лапласа находится:

$$\nabla^2 t_i = \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_i}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Коэффициент температуропроводности принимается по табличным данным или находится по формуле

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i}. \quad (3)$$

В данной работе задача решается в заданной последовательности. При этом уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} + \lambda \frac{qv}{\rho_i c_i}. \quad (4)$$

Для решения уравнения необходимо задать начальные и граничные условия.

Для слоя 1:

При $\tau = 0$ $t(x, \tau) = t_{\text{окр}}$.

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1} \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (5)$$

При $x = 0$ $t_1(x, \tau)|_{x=0} = \alpha a_n [t_n - t_1(x = 0, \tau)]$.

При $x = x_1$; $t_1(x, \tau)|_{x=x_1} = t_2(x, \tau)|_{x=x_1}$.

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_1}. \quad (6)$$

Для слоя 2:

При $x = x_1$ граничные условия для этого слоя соответствуют выражению (5).

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{c_2 p_2} \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{qv}{c_2 p_2}. \quad (7)$$

При $x = x_2$ $t_2(x, \tau)|_{x=x_2} = t_3(x, \tau)|_{x=x_2}$.

$$\lambda_2 \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = \lambda_3 \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_2}. \quad (8)$$

Для слоя 3:

$$\frac{\partial t_3(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_3}{c_3 p_3} \frac{\partial^2 t_3(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (9)$$

Граничные условия:

при $x = x_2$ $t_2(x, \tau)|_{x=x_2} = t_3(x, \tau)|_{x=x_2}$;

при $x = x_3$ $t_3(x, \tau)|_{x=x_3} = t_4(x, \tau)|_{x_3}$.

Для слоя 4:

$$\frac{\partial t_4(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_4}{c_4 p_4} \frac{\partial^2 t_4(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (10)$$

Граничные условия:

при $x = x_3$ $t_3(x, \tau)|_{x=x_3} = t_4(x, \tau)|_{x_3}$;

при $x = x_4$ $t(x, \tau)|_{x=x_4} = t_{\text{гр}}$.

Для слоёв 1, 2 и 4 температурное поле определяется решением дифференциального уравнения

$$\frac{\partial t_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_i(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad i = 1, 3, 4. \quad (11)$$

Для слоя 2 с внутренним источником тепловыделения qv температурное поле можно определить из решения уравнения

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{c_2 p_2} \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{qv}{c_2 p_2}. \quad (12)$$

Начальные условия для всех слоёв принимаются одинаковыми $t(x, \tau) = t_{\text{гр}}$.

Рассмотренная методика для решения нестационарной задачи позволит определять температуру нагрева каждого из слоёв дорожной конструкции в зависимости от наружной температуры приземного воздуха, времени нагрева, теплофизических свойств материалов конструктивных слоёв. При проведении экспериментальных исследований распределения температурного поля в отдельных конструктивных слоях возможно уточнение математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нюдь А.С., Киряков Е.И. Ликвидация зимней скользкости тепловым способом // Дороги и мосты РДНИИ. 2016. № 34. С. 143–156.
2. Нюдь А.С., Киряков Е.И. Существующие проблемы выявления и ликвидации зимней скользкости на автомобильных дорогах и мостовых сооружениях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 354–361.
3. Киряков Е.И., Нюдь А.С. Разработка системы ликвидации зимней скользкости на мостовых транспортных сооружениях тепловым способом // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4. С. 263–272.
4. Малиновская Т.Д., Рубанов А.В., Калыгина В.М., Мелентьев С.В. Нанокмпозиционное тепловыделяющее покрытие для термоактивной опалубки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1. С. 150–157.

5. Киряков Е.И., Нюдъ А.С. О возможности использования композиционного резистивного материала для нагрева мостового покрытия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6. С. 197–203.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1969. 440 с.
7. Хазен М.М., Матвеев Г.А., Грицевский М.Е., Казакевич Ф.П. Теплотехника / под ред. Г.А. Матвеева. : Высш. школа, 1981. 480 с.

REFERENCES

1. Nyud' A.S., Kiryakov E.I. Likvidatsiya zimnei skol'zkosti teplovym sposobom [Thermal method of winter slipperiness elimination]. *Dorogi i mosty RDNII*. 2016. No. 34. Pp. 143–156. (rus)
2. Nyud' A.S., Kiryakov E.I. Sushchestvuyushchie problemy vyavleniya i likvidatsii zimnei skol'zkosti na avtomobil'nykh dorogakh i mostovykh sooruzheniyakh [Problems of identification and elimination of winter slipperiness on highways and bridgeworks]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 354–361. (rus)
3. Kiryakov E.I., Nyud' A.S. Razrabotka sistemy likvidatsii zimnei skol'zkosti na mostovykh transportnykh sooruzheniyakh teplovym sposobom [Elimination of slide surface conditions using bridge heating method]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 4. Pp. 263–272. (rus)
4. Malinovskaya T.D., Rubanov A.V., Kalygina V.M., Melent'ev S.V. Nanokompozitsionnoe teplovydelyayushchee pokrytie dlya termoaktivnoi opalubki [Nanocomposite hot coating for thermal formwork]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 1. Pp. 150–157. (rus)
5. Kiryakov E.I., Nyud' A.S. O vozmozhnosti ispol'zovaniya kompozitsionnogo rezistivnogo materiala dlya nagreva mostovogo [Potential application of composite resistive material for floor heating bridges]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 6. Pp. 197–203. (rus)
6. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. 2nd ed. Moscow: Energiya Publ., 1969. 440 p. (rus)
7. Khazen M.M., Matveev G.A., Gritsevskii M.E., Kazakevich F.P. Teplotekhnika [Heat engineering]. G.A. Matveev, Ed. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1981. 480 p. (rus)

Сведения об авторах

Киряков Евгений Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, cknr@sibmail.com

Зомбек Пётр Владиславович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, zombeck@rambler.ru

Витрук Наталья Валерьевна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, nvitruk@bk.ru

Authors Details

Evgenii I. Kiryakov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, cknr@sibmail.com

Petr V. Zombek, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, zombeck@rambler.ru

Natal'ya V. Vitruk, Undergraduate, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nvitruk@bk.ru