

УДК 625.7/.8

**ПРОГНОЗУВАННЯ ДОБОВОЇ ЗМІНИ
ТЕРМОВ'ЯЗКОПРУЖНОГО СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ.
ЧАСТИНА 2. СЕ-АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ**

**І.В. Янчевський, проф., д.ф.-м.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

***Анотація.** Подано результати розрахунку методом скінченних елементів зміни температурного поля в дорожньому одязі впродовж доби літнього/зимового періоду за кліматичних умов Харківської області. Розроблена в рамках дослідження програма розрахунку дозволяє враховувати метеорологічні та дорожні параметри для модельованої ділянки автомобільної дороги.*

***Ключові слова:** дорожній одяг, температурне поле, нестационарна задача термов'язкопружності, метод скінченних елементів.*

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СУТОЧНОГО ИЗМЕНЕНИЯ
ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ.
ЧАСТЬ 2. КЭ-АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ**

**И.В. Янчевский, проф., д.ф.-м.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

***Аннотация.** Представлены результаты расчета методом конечных элементов изменения температурного поля в дорожной одежде на протяжении суток летнего/зимнего периода при климатических условиях Харьковской области. Разработанная в рамках исследования программа расчета позволяет учитывать метеорологические и дорожные параметры для моделируемого участка автомобильной дороги.*

***Ключевые слова:** дорожная одежда, температурное поле, нестационарная задача термовязкоупругости, метод конечных элементов.*

**PREDICTION OF DAILY CHANGE OF THE
THERMOVISCOELASTIC STATE OF ROAD PAVEMENT.
PART 2. FEM-ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELD**

**I. Yanchevskyi, Prof., Ph. D. (Phys.-Math.),
Kharkiv National Automobile and Highway University**

***Abstract.** Results of calculation by the method of finite elements of temperature field change in road pavement during a summer/winter day under climatic conditions of Kharkiv region are presented. The calculation program developed within the investigation makes it possible to consider the meteorological and road parameters for a modelled road section.*

***Key words:** road pavement, temperature field, non-stationary problem, thermoviscoelastic state of layers, method of finite elements.*

Вступ

Температурне поле в дорожньому одязі суттєво впливає на механічні властивості вико-

ристовуваних під час її будівництва матеріалів. Як високі температури в літній період, так і низькі температури – в зимовий є ключовим чинником появи різних дефектів, які

знижують термін служби автомобільної дороги та безпеку руху транспорту в цілому. Тому дослідження, присвячені вивченню температурних полів у дорожніх одягах при комплексному врахуванні погодно-кліматичних факторів, транспортних навантажень та зміни властивостей матеріалів з часом, є актуальними та мають очевидне прикладне значення.

Аналіз публікацій

Одним з потужних інструментів розв'язання прикладних задач, зокрема задач моделювання температурних режимів роботи дорожніх одягів, є метод скінченних елементів. Наявність чіткого математичного обґрунтування методу, геометрична гнучкість, можливість реалізації різних типів граничних умов та численність програмних комплексів, які реалізують МСЕ, визначили його широку застосовність серед інженерів. Деякі конкретні приклади реалізації методу для вивчення температурних полів і механічних напружень у шарах дорожніх одягів можна знайти в публікаціях [1–5]. Однак у цих роботах не порушено питань, пов'язаних з вивченням реакції дорожніх одягів на дію нестационарних зовнішніх впливів із врахуванням термов'язкопружної поведінки деяких його шарів.

Мета і постановка завдання

Мета дослідження полягає в розробці основаної на методі скінченних елементів програми розрахунку нестационарних термомеханічних полів у дорожньому одязі при комплексному врахуванні як термов'язкопружних властивостей матеріалів деяких шарів, так і різних метеорологічних та дорожніх параметрів. Публікація, по суті, є продовженням розпочатих у роботі [6] досліджень і містить деякі чисельні результати з їх аналізом.

Метод розв'язання

Розв'язання задачі, постановку якої дано в [6], виконано методом скінченних елементів. Конкретні розрахунки проводилися для дорожнього одягу на підстильному ґрунті, двовимірну модель якого зображено на рис. 1. Розрахункова область є шестишаровою конструкцією з такими значеннями геометричних параметрів: $B=3$ м, $B_s=2$ м, $H_1=0,05$ м, $H_2=0,10$ м, $H_3=0,15$ м, $H_4=0,18$ м, $H_5=0,23$ м і $H_6=1,19$ м ($y_6=1,9$ м). Тут $H_i=y_i-y_{i-1}$ –

товщини шарів, y_i – координати границь шарів ($i=\overline{1, I+1}$; $I=5$; $y_0=0$).

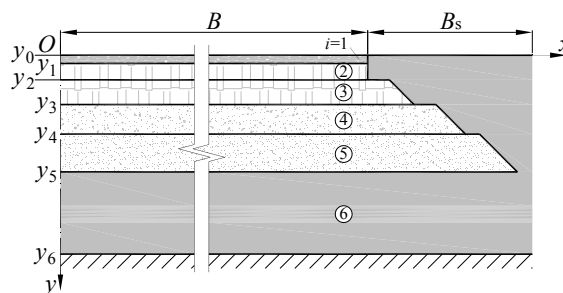


Рис. 1. Розрахункова модель дорожнього одягу

Слід зазначити, що координата y_6 і ширина B_s , які визначають границі розрахункової області (рис. 1), обиралися за критерієм збіжності розрахункових значень термомеханічних польових величин на відповідних границях дискретної моделі для розглянутого часового інтервалу (див. [6]).

Розміри та порядок скінченних елементів (СЕ), а також крок за часом при розв'язанні цієї нестационарної задачі, бралися як компромісне рішення між збіжністю значень досліджуваних величин і тривалістю обчислювального процесу. Тобто як для вибору y_6 й B_s , так і для кроку за часом і параметрів СЕ, на підготовчому етапі були розв'язані декілька тестових задач.

При формуванні таблиць матеріальних властивостей вважалося, що перший шар ($i=1$; $y_{i-1} < y < y_i$) виконаний зі скалинно-мастикового асфальтобетону; шар 2 ($i=2$) – із дрібнозернистого асфальту (тип А); шар 3 – із грубозернистого асфальту (тип А); шар 4 – шар щебеню; шар 5 – пісок; шар 6 – ґрунт. При цьому були використані такі значення теплофізичних параметрів, які для очікуваного діапазону зміни температур вважалися постійними: $\rho_1=\rho_2=2400$, $\rho_3=2350$, $\rho_4=2000$, $\rho_5=1650$, $\rho_6=1400$ – густини, кг/м^3 ; $\lambda_1=1,95$, $\lambda_2=\lambda_3=1,9$, $\lambda_4=3,5$, $\lambda_5=0,79$, $\lambda_6=1,3$ – коефіцієнти об'ємної теплопровідності, $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{K)}$; $C_1=1500$, $C_2=1680$, $C_3=1600$, $C_4=1000$, $C_5=880$, $C_6=2700$ – теплоємності, $\text{Дж/(кг}\cdot^\circ\text{K)}$.

Коефіцієнти конвективного теплообміну для ґрунту ($i=6$) і асфальтобетонного покриття

дорожнього одягу ($i=1$) обчислювалися за наведеними в [6] формулами (13) і (14). Інші константи, що фігурують у граничній умові (6) публікації [6], для цих матеріалів такі: $\xi_1=0,9$ (в цілому $\xi_1=0,8-0,95$ [7]) і $\xi_6=0,75$ – коефіцієнти чорності; $\varepsilon_{e1}=0,95$ [7] і $\varepsilon_{e6}=0,94$ – коефіцієнти емісії.

Конкретні розрахунки температурного поля в дорожньому одязі проведені для літнього дня з порядковим номером $n=212$ (31-го липня) і зимового дня з $n=27$ (27-го січня). На рис. 2 суцільними кривими наведено відповідні цим дням графіки добової зміни енергетичної освітленості Q й розсіяної сонячної радіації q на горизонтальній поверхні ($\beta=\gamma=0$). При їх обчисленні (див. (7) та (12) статті [6]) вважалося, що коефіцієнт прозорості атмосфери ϕ дорівнює 0,8, а $\varphi \approx 50^\circ$ пн.ш. – географічна широта модельованої ділянки автомобільної дороги у Харківській області.

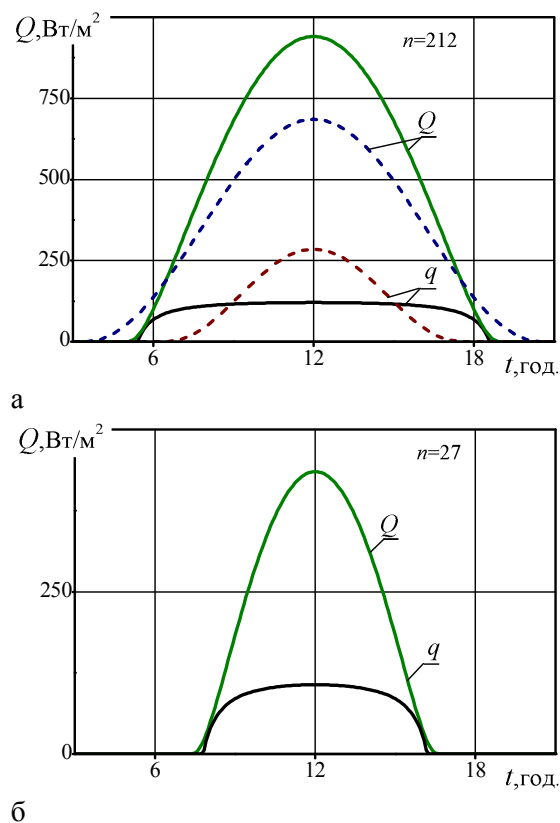


Рис. 2. Добова зміна прямої сонячної радіації Q та розсіяної q на горизонтальній поверхні: а – $n=212$; б – $n=27$

Побудова розв'язку досліджуваної задачі здійснювалася в кілька етапів, що було продиктовано необхідністю формування відсут-

ніх крайових і початкових умов у вигляді функцій $T_B(y,t)$ і $T_\Omega(x,y)$ (див. [6]). Так, для відшукування функції T_B на другому етапі розглядалася нестационарна задача, ідентична досліджуваній, однак при цьому вважалося, що розрахункова область (рис. 1) однорідна, а її властивості відповідають властивостям ґрунтової основи. За початкові умови бралися результати розв'язання цієї ж задачі у статичній постановці (перший етап), коли на границі $y=0$ задавалася усереднена добова температура повітря з поправкою $\Delta T_{iave} = \xi_i(Q+q)_{ave}/h_{iave}$ ($i=6$), зумовленою додатковим нагріванням покриття сонячним опроміненням [8]

$$T|_{y=0} = (T_{air})_{ave} + \rho_6 \frac{(Q+q)_{ave}}{h_{6ave}}.$$

Тут нижній індекс «ave» позначає добове усереднене значення відповідної функції –

$$f_{ave} = \frac{1}{P} \int_0^P f(t) dt \quad (f = T_{air}; Q + q; h_6).$$

На нижній границі ($y = y_{I+1}$) температура T_s обчислювалася за формулою (4); при цьому, з урахуванням географічного положення модельованої ділянки дороги, вважалося, що $T_s^m = 9^\circ\text{C}$; $T_s^a = 10^\circ\text{C}$; $n_{min} = 31$; $d = 3,8$ м.

Результат розв'язання нестационарної задачі другого етапу у вигляді змінної за часом епюри розподілу температури на осі y розрахункової області й брався як функція $T_B(y,t)$. Слід зауважити, що реєстрація температур та збереження їх у табличному вигляді здійснювалися для вузлів, кількість яких залежала від щільності сітки скінченних елементів.

Аналогічним чином, тобто через розв'язання статичної задачі (третій етап), але вже для розглянутої моделі дорожнього одягу (рис. 1), здійснювалося визначення початкових умов для величин термомеханічного поля, зокрема функції $T_\Omega(x,y)$. При цьому на поверхні $y=0$ задавалася температура, яка може бути записана у такий спосіб

$$T|_{y=0} = (T_{air})_{ave} + \Delta T_{lave} H(B-x) + \Delta T_{6ave} H(x-B),$$

де $H(x)$ – одинична функція Хевісайда.

Маючи у розпорядженні функції T_B та T_Q , на заключному, четвертому етапі здійснювалося розв'язання досліджуваної задачі з уже відомими граничними та початковими умовами. При цьому час дослідження обирався за критерієм виходу динамічних процесів на установлений за часом режим. Зокрема для розглянутих у даній роботі прикладів та прийнятої процедури їх розв'язання розрахунковий час взято рівним $7P$ (один тиждень). Разом з тим на рисунках нижче наведено фрагменти результатів, які відображають зміни температур на усталеному режимі.

Слід зазначити, що викладена вище процедура реалізована у вигляді написаної мовою APDL програми і забезпечує розв'язання поставленої задачі у програмному комплексі ANSYS без втручання користувача.

Обчислені добові зміни температур у точках $y=y_0$, y_2 і y_4 ($x=0$) ілюструють подані на рис. 3 криві T_0 , T_2 і T_4 відповідно (рис. 3, а для дня з порядковим номером $n=212$, рис. 3, б – для $n=27$).

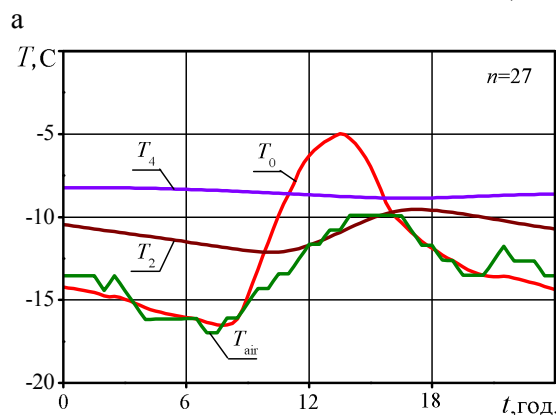
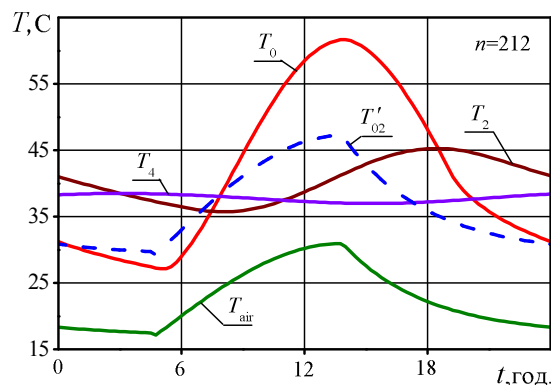


Рис. 3. Добова зміна температур повітря та в точках на осі y розрахункової моделі: а – $n=212$; б – $n=27$

При цьому в першому розрахунковому прикладі (рис. 3, а) вважалося, що вітер відсутній ($V=0$), а добовий хід температури повітря $T_{air}(t)$ змінюється згідно з апроксимацією Партона-Логана ((17), [6]), в якій $T_{air}^{min}=19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{air}^{max}=32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива T_{air} на рис. 3, а). У другому прикладі, як швидкість вітру, так і температуру повітря було взято з електронного ресурсу [9], і вони відображають фактичні дані за 27-е січня 2011 року. Ці дані зображені на рис. 4 і рис. 3, б (крива T_{air}).

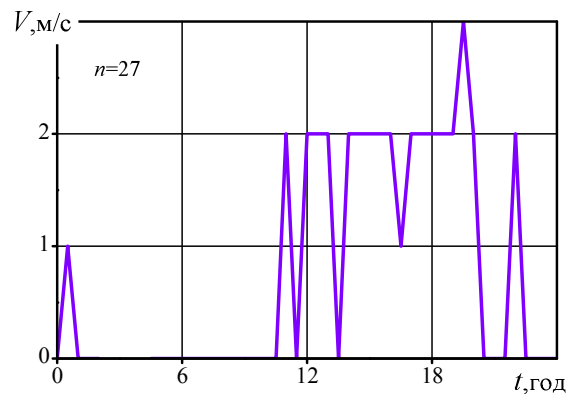


Рис. 4. Швидкість вітру

Ламаний характер наведеної на рис. 4 кривої пояснюється тим, що на веб-сторінках [9] подано округлені до найближчих цілих значень швидкості вітру, які були виміряні з інтервалом у 30 хвилин. При проведенні чисельних розрахунків відсутні дані для швидкості всередині зазначених інтервалів заповнювалися через лінійну інтерполяцію.

Аналіз результатів

Наведені на рис. 3 результати узгоджуються із загальновідомим фактом, що максимальна температура асфальтобетонного покриття T_0^{max} може суттєво перевищувати максимальну температуру навколишнього повітря T_{air}^{max} . Більш явно ця різниця спостерігається для літнього дня, що зумовлено більшими значеннями параметрів енергетичної освітленості Q та q . У цілому графіки функції T_0 для розглянутих прикладів корелюють з добовим ходом температури навколишнього повітря T_{air} . При цьому момент максимального прогріву покриття спостерігається дещо пізніше від моменту з максимальною температурою повітря T_{air}^{max} . Цей зсув зумовлений

теплоінерційними властивостями матеріалів шарів, які визначаються коефіцієнтами температуропровідності κ_i/C_i . Обчислене максимальне значення температури покриття $T_0^{\max}$ для дня $n=212$ становить $61,2\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3, а). Разом з тим на підставі матеріалів публікації [8, 10] орієнтовне значення максимальної температури покриття (у літній період) може бути визначене за однією з формул

$$T_0^{\max'} \approx 0,955(T_{\text{air}}^{\max} - 0,0062\varphi^2 + 0,229\varphi + 42,2) - 17,2;$$

$$T_0^{\max''} \approx T_{\text{air}}^{\max} - 0,0062\varphi^2 + 0,229\varphi + 24,4;$$

$$T_0^{\max'''} \approx -0,0306 \cdot (T_{\text{air}}^{\max})^2 + 3,8071 \cdot T_{\text{air}}^{\max} - 39$$

$$\text{або } T_0^{\max'''} \approx T_{\text{air}}^{\max} + 24,5 \cdot (\sin z)_{\max}^2 \cdot X,$$

які для взятих вхідних даних дають результат від $49,8\text{ }^\circ\text{C}$ до $54,2\text{ }^\circ\text{C}$ ($X=1,1$ – коефіцієнт хмарності при $T_{\text{air}}^{\max} > 30\text{ }^\circ\text{C}$). При цьому сама добова зміна температури $T_0(t)$ може бути апроксимована функцією $1,3 \cdot T_{\text{air}}(t) + 7$ [8] (відповідна цій функції крива зображена на рис. 3, а штриховою кривою T'_{02}). Очевидно, що результати, отримані на підставі розробленої в рамках даного дослідження розрахункової програми, відрізняються від обчислених на основі емпіричних залежностей значень. До можливих причин невідповідності, у першу чергу, слід віднести той факт, що наведені у [8, 10] формули стосуються осередненої температури першого шару дорожньої одягу, в той час коли значення $61,2\text{ }^\circ\text{C}$ є таким, що обчислене на поверхні у $z=0$. По-друге, при моделюванні було взято до уваги ідеально ясне небо і чиста атмосфера, а тому теоретичні значення енергетичної освітленості поверхні (суцільні криві на рис. 2, а) суттєво відрізнялися від вимірюваних за допомогою відповідної апаратури (штрихові криві на рис. 2, а, які побудовані на підставі нормативного документа ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія»). Можлива причина невідповідності може також бути пов'язана з вибором формули для визначення коефіцієнта конвективного теплообміну асфальтобетонного покриття. Так, у розглянутому прикладі розрахункове значення h_1 склало $7,83\text{ Вт/м}^2\text{°К}$, у той час як

у роботі [1] вважалося, що $h_1=34\text{ Вт/м}^2\text{°К}$. Це вказує, що h_1 має визначатися експериментально під конкретну асфальтобетонну суміш. Також при моделюванні взята досить висока денна температура повітря для обраного географічного положення модельованої ділянки автомобільної дороги [9], яка до того ж, вважається, має місце і в попередні дні.

З аналізу наведених на рис. 3 кривих T_4 також випливає, що вже на глибині $y_4=0,48\text{ м}$ температура дорожнього одягу впродовж доби практично не змінюється. При цьому осереднене значення температури T_4 дещо вище середньої за добу температури повітря.

Другий розрахунковий приклад (рис. 3, б), який був присвячений вивченню процесів у дорожньому одязі в зимовий день з $n=27$, показав, що у світлий час доби асфальтобетонне покриття дещо прогрівається ($T_0 > T_{\text{air}}$), однак до вечора досить швидко охолоджується до температури навколишнього середовища, і тому в нічний час спостерігаються практично однакові значення температур повітря й покриття. Цей висновок повністю узгоджується як з відповідними експериментальними спостереженнями, результати яких наведені в публікації [11], так і з результатами математичного моделювання методом скінченних елементів, які отримані іншими авторами (див. [12]). Слід зауважити, що прогнозоване на підставі наведених в [8, 10] емпіричних залежностей мінімальне значення температури покриття дорівнює

$$T_0^{\min'} = 0,7 \cdot T_{\text{air}}^{\min} = -11,9\text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_0^{\min''} = 0,89 \cdot T_{\text{air}}^{\min} + 5,2 = -9,9\text{ }^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\text{чи } T_0^{\min'''} = 0,859 \cdot T_{\text{air}}^{\min} + 1,7 = -12,9\text{ }^\circ\text{C},$$

в той час коли обчислене за наведеною методикою значення склало $T_0^{\min} = -16,6\text{ }^\circ\text{C}$. У формулах (1) $T_{\text{air}}^{\min} = -17\text{ }^\circ\text{C}$ – мінімальна температура повітря. Можливими причинами невідповідності, як і раніше, є розбіжність щодо тлумачення поняття «мінімальна температура» (безпосередньо на поверхні чи осереднене значення для першого шару), ідеалізація погодно-кліматичних умов і наближені значення деяких теплофізичних параметрів матеріалів шарів.

Висновки

У рамках цього дослідження розроблено програму розрахунку, яка дозволяє моделювати фізичні процеси в дорожніх одягах при нестаціонарних термомеханічних впливах на її покритті з урахуванням метеорологічних (температура повітря, швидкість вітру, прозорість атмосфери) та дорожніх (географічні координати розташування ділянки дороги, поздовжній ухил, азимут, альbedo покриття) параметрів. Зазначена програма реалізує метод скінченних елементів і, відповідно, може бути легко адаптована як під дорожній одяг іншої конструкції, так і під більш широкий перелік вхідних даних та варіантів граничних умов.

У даній публікації наведено деякі конкретні результати скінченно-елементного моделювання температурного поля в дорожньому одязі за змінних у часі метеорологічних умов літнього/зимового дня, які задовільно узгоджуються з обчисленими на підставі наявних у літературі емпіричних залежностей. Для підвищення точності математичного моделювання у розрахунковій програмі слід використовувати вимірювані експериментально значення величин, які визначають погодно-кліматичні умови та фізико-механічні параметри матеріалів шарів.

Результати досліджень можуть бути використані для прогнозування теплотривкості та механічної міцності/жорсткості шарів дорожнього одягу, удосконалення методик їх розрахунку.

Література

1. Богомолов В.А. О стационарном температурном поле многослойной дорожной одежды / В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук, И.Л. Разницын и др. // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 67. – С. 94–97.
2. Мельникова И.С. Моделирование воздействия температуры и транспортных нагрузок на возникновение и развитие трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях / И.С. Мельникова // Наука и техника: междунар. науч.-техн. журнал. – 2012. – № 4. – С. 44–52.
3. Feng T. A numerical model for predicting road surface temperature in the highway / T. Feng, S. Feng // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 37. – P. 137–142.
4. Shibib K.S. Temperature distribution through asphalt pavement in tropical zone / K.S. Shibib, Q.A. Jawad, H.I. Gattea // Anbar J. for Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 5, No. 2. – P. 188–197.
5. Minhoto M.J. Asphalt pavement temperature prediction / M.J. Minhoto, J.C. Pais, P.A.A. Pereira // Road Materials and Pavements Design. – 2005. – Режим доступа: [civil.uminho.pt/.../2006_\(AR2006\)_Minhoto_Pais_Pereira_A.pdf](http://civil.uminho.pt/.../2006_(AR2006)_Minhoto_Pais_Pereira_A.pdf).
6. Янчевський І.В. Прогнозування добової зміни термов'язкопружного стану дорожнього одягу. Частина 1. Постановка задачі / І.В. Янчевський // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2015. – Вып. 70. – С. 106–112.
7. Hu Yu. The use of screening effects in modelling route-based daytime road surface temperature / Yu. Hu, E. Almkvist [et al.] // Theor. Appl. Climatol. – 2015. DOI 10.1007/s00704-015-1508-9.
8. Кирюхин Г.Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Г.Н. Кирюхин // Дороги и мосты : сб. науч. тр. – 2013. – № 2. – С. 309–328.
9. <http://meteopost.com/weather/archive/>.
10. Arangi S.R. Review paper on pavement temperature prediction model for Indian climatic condition / S.R. Arangi, R.K. Jain // Int. J. of Innovative Research in Adv. Engineering. – 2015. – Vol. 2, Iss. 8. – P. 1–9.
11. Hassan H.F. Development of Asphalt Pavement Temperature Models for Oman / H.F. Hassan, A.S. Al-Nuaimi, R. Taha, T.M.A. Jafar // The J. of Engineering Research. – 2005. – Vol. 2, No. 1. – P. 32–42.
12. Feng T. A numerical model for predicting road surface temperature in the highway / T. Feng, S. Feng // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 37. – P. 137–142.

Рецензент: В.П. Кожушко, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 1 грудня 2015 р.