

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 625.7/8

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОБОВОЇ ЗМІНИ ТЕРМОВ'ЯЗКОПРУЖНОГО СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ. ЧАСТИНА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

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

Анотація. Дано математичне формулювання задачі при дослідженні нестационарної термов'язкопружної/термопружної поведінки шарів дорожнього одягу на ґрунтовій основі. Граничні умови враховують метеорологічні та дорожні параметри модельованої ділянки дороги. Розв'язок задачі може бути використаний при прогнозуванні теплотривкості та механічної міцності/жорсткості шарів дорожнього одягу.

Ключові слова: дорожній одяг, температурне поле, нестационарна задача, термов'язкопружний стан шарів, метеорологічні та дорожні параметри

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СУТОЧНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ. Часть 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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

Аннотация. Дана математическая формулировка задачи при исследовании нестационарного термовязкоупругого/термоупругого поведения слоев дорожной одежды на грунтовом основании. Граничные условия учитывают метеорологические и дорожные параметры моделируемого участка дороги. Решение задачи может быть использовано при прогнозировании теплоустойчивости и механической прочности/жесткости слоев дорожной одежды.

Ключевые слова: дорожная одежда, температурное поле, нестационарная задача, термовязкоупругое состояние слоев, метеорологические и дорожные параметры

PREDICTION OF DAILY CHANGE OF THERMOVISCOELASTIC STATE OF THE ROAD PAVEMENT. PART 1. PROBLEM STATEMENT

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

Abstract. The mathematical formulation of the problem for investigation of non-stationary thermoviscoelastic/thermoelastic behaviour of road pavement layers on the soil basis is given. Boundary conditions take into account meteorological and road parameters of the modelled road section. The solution of the problem can be used while prediction of the thermal stability and mechanical durability/rigidity of road pavement layers.

Key words: road pavement, temperature field, non-stationary problem, themoviscoelastic state of layers, meteorological and road parameters.

Вступ

Термін служби автомобільної дороги залежить від багатьох факторів, і в першу чергу

від інтенсивності та складу транспортного потоку і погодно-кліматичних умов місцевості. Відомо, що в літній період при комплексному впливі транспортних навантажень і

високих температур на покриттях автомобільних доріг з в'язкопружних матеріалів можливе утворення колій, напливів і хвиль внаслідок втрати теплостійкості покриття. У зимовий період часта зміна низьких температур і нерівномірний її розподіл по глибині дорожнього одягу є основними причинами утворення тріщин. Як у першому, так і в другому випадку, поява дефектів пов'язана з температурним полем, що визначає механічні властивості використовуваних при будівництві доріг матеріалів. Тому дослідження, присвячені вивченню зв'язаних полів теплової й механічної природи в дорожніх одягах, є актуальними і мають важливе прикладне значення, зокрема при виборі матеріалів, технології та організації дорожніх робіт та ін.

Аналіз публікацій

Задачі відновлення картини температурного поля в дорожньому одязі присвячені численні публікації. Класичний підхід до її розв'язання передбачає безпосереднє (пряме) вимірювання температур за допомогою спеціальних датчиків. У той же час більш розповсюдженим при прогнозуванні температурних полів є використання різних емпіричних залежностей, які побудовані шляхом статистичної обробки результатів багаторічних експериментальних досліджень [1–4]. Разом з тим цей підхід не можна назвати універсальним, оскільки він не дозволяє враховувати ландшафтні та пришляхові особливості, відмінності матеріальних і конструктивних параметрів тощо. Тому обчислені в такий спосіб температури можуть суттєво відрізнятися від результатів натурних вимірів.

У статтях [5–8] запропоновані альтернативні методи розрахунку температурних полів, що зводяться, по суті, до чисельно-аналітичного розв'язання систем диференціальних рівнянь нестационарної теплопровідності при заданих початково-крайових умовах. Потужним інструментом для розв'язання складних прикладних задач є метод скінченних елементів. Деякі конкретні приклади реалізації МСЕ для вивчення температурних полів і механічних напружень у шарах дорожніх одягів наведені в роботах [9–13]. Однак у цих роботах не порушені питання, що пов'язані з вивченням реакції дорожніх одягів на дію нестационарних зовнішніх впливів з урахуванням термов'язкопружної поведінки деяких їх шарів.

Мета і постановка завдання

Мета даного дослідження полягає в узагальненні деяких отриманих до теперішнього часу результатів із вивчення температурних полів у дорожніх одягах і розробці ефективного методу їх розрахунку з можливістю комплексного врахування як термов'язкопружних властивостей матеріалів деяких шарів, так і погодно-кліматичних і дорожньо-експлуатаційних параметрів. Отримані в рамках даного дослідження результати розбиті на частини. У першій частині дане математичне формулювання відповідної задачі, яка належить до класу зв'язаних задач нестационарної термов'язкопружності. Її розв'язок може бути отриманий методом скінченних елементів. Конкретні численні результати моделювання поля температур у дорожньому одязі припускається представити в другій частині дослідження.

У декартовій системі координат Oxy розглядається I -шарова модель дорожнього одягу на підстильному ґрунті. Вісь x суміщена з поверхнею дорожнього одягу, а вісь y є віссю симетрії моделі та спрямована вглиб її (рис. 1).

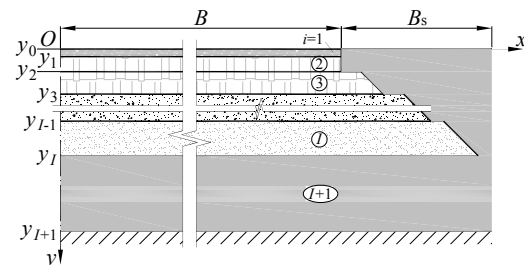


Рис. 1. Розрахункова схема дорожнього одягу

Через симетрію конструкції та припускаємо схему навантаження відносно до осі y на рис. 1 представлена лише права половина розрахункової моделі ($x > 0$). Характеристики кожного шару, товщини яких позначені через $H_i = y_i - y_{i-1}$ ($y_0 = 0$; y_i – координата границі поділу i -го та $i-1$ -го шарів, м; i – порядковий номер шару, $i = \overline{1, I+1}$), визначаються як теплофізичними, так і фізико-механічними параметрами. Значення цих параметрів вважаються відомими.

Математична постановка розглянутої задачі має включати систему диференціальних рівнянь, що описують динамічні процеси в ша-

рах розрахункової моделі, і відповідні їм початково-крайові умови.

При певних обмеженнях на виникаючі в шарах напруження задача може бути зарахована до класу нестационарних задач зв'язаної термов'язкопружності. І тому згадана система диференціальних рівнянь буде складатися з рівнянь термов'язкопружного руху та нестационарної теплопровідності в шарах ($i=1, I+1$), які у векторній формі можуть бути записані в такий спосіб [14]

$$L_i(\bar{u}_i) - L_i^*(\bar{u}_i) + \bar{F}_i - 6\mu_i \alpha_i \nabla T_i + 3\alpha_i \Gamma^* \nabla T_i = \rho_i \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial t^2};$$

$$\Delta T_i - \frac{C_i}{\kappa_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{s_{ijk}}{\kappa_i} \frac{\partial e_{ijk}}{\partial t} - \frac{\sigma_{i*}}{\kappa_i R_i(0)} \frac{\partial \sigma_{i*}}{\partial t} = 0. \quad (1')$$

У цих рівняннях $L(\bar{u}_i) = (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \bar{u}_i + \mu \Delta \bar{u}_i$, $L^*(\bar{u}_i)$ – оператори Ламе; $\bar{u}_i(\bar{x}, t)$ – вектор переміщень; $\bar{x} = [x; y]$ – вектор просторових координат; t – час, с; T_i – поточна температура в матеріалі i -го шару, точніше її перевищення над відліковою температурою T_0 , при якій відсутні деформації та напруження, °К; \bar{F}_i – об'ємні сили; λ_i , μ_i – пружні постійні Ламе (для ізотермічної деформації) матеріалу i -го шару; ρ_i – об'ємна густина матеріалу i -го шару, кг/м³; κ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару, Вт/м°К; C_i – питома теплоємність матеріалу i -го шару при нульовій постійній деформації, Дж/кг°К; $\sigma_{i*}^2 = s_{ijk} s_{ijk}$, e_{ijk} – девіатор деформацій; $s_{ijk} = \int_0^t R_i(t-\tau) de_{ijk}(\tau)$; R_i – ядро релаксації; ∇ , $\Delta = \nabla \cdot \nabla$ – оператори Гамільтона і Лапласа; "·" – знак скалярного добутку.

Відзначимо, що при пружній поведінці матеріалів система (1') дещо спрощується [15] –

$$L(\bar{u}_i) + \bar{F}_i - \alpha_i \nabla T_i = \rho_i \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial t^2};$$

$$\Delta T_i - \frac{C_i}{\kappa_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} - \frac{\alpha_i T_0}{\kappa_i} \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \bar{u}_i = 0. \quad (1'')$$

Тут $\alpha_i = (3\lambda_i + 2\mu_i) \beta_i$ – термомеханічна постійна (β_i – коефіцієнт об'ємного теплового розширення).

Ці рівняння необхідно доповнити механічними та тепловими граничними умовами.

Граничні умови механічної групи припускають задання деформацій або зовнішніх навантажень. У якості основних граничних умов другої групи виступають задання температури, густини теплового потоку через поверхню чи теплообмін із контактуючим середовищем.

Для розглянутої задачі на межах поділу шарів дорожнього одягу приймаються граничні умови, що забезпечують рівність переміщень, механічних напружень $\hat{\sigma}$, температур і теплових потоків, які моделюють допущення про достатній механічний і термічний контакт шарів. Математично ці умови можуть бути записані таким чином:

$$\bar{u}_i|_{y=y_i} = \bar{u}_{i+1}|_{y=y_i}; \quad \hat{\sigma}_i|_{y=y_i} = \hat{\sigma}_{i+1}|_{y=y_i};$$

$$T_i|_{y=y_i} = T_{i+1}|_{y=y_i}; \quad \kappa_i \frac{\partial T_i}{\partial y}|_{y=y_i} = \kappa_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y}|_{y=y_i}. \quad (2)$$

На певній глибині, яка позначена через y_{I+1} (рис. 1), гранична умова записується на підставі припущення, що зсуви точок відсутні, як і відсутні коливання температури на досліджуваному проміжку часу

$$\bar{u}_{I+1}|_{y=y_{I+1}} = 0; \quad T_{I+1}|_{y=y_{I+1}} = T_s = \text{const}, \quad (3)$$

де T_s – температура нижнього шару (грунт) при $y = y_{I+1}$. Наближене значення T_s може бути обчислене на підставі рівності

$$T_s = T_s(y_{I+1}, n), \quad (4)$$

у якій функція

$$T_s(y, n) = T_s^m - T_s^a e^{-\frac{y}{d}} \cos\left(\Gamma - \Gamma_{\min} - \frac{180^\circ y}{\pi d}\right)$$

апроксимує зміну усередненої добової температури ґрунту (°С) по глибині y [16]. Тут n – порядковий номер дня у році; T_s^m – середньорічна температура ґрунту, °С; T_s^a – амплітуда річних коливань температури на поверхні, °С; $\Gamma = 360^\circ n / 365$; $\Gamma_{\min} = 360^\circ \times n_{\min} / 365$, n_{\min} – орієнтовне значення порядкового номера дня, коли спостерігається мінімальна усереднена температура ґрунту; D_h – коефіцієнт термодифузії ґрунту, м²/с; $d = \sqrt{365 D_h / \pi}$ – коефіцієнт, що визначає ін-

тенсивність зменшення амплітуди температурних коливань у ґрунті, м.

На іншій межі розрахункової області ($x=B+B_s$; рис. 1) задаються умови

$$\bar{u}|_{x=B+B_s}=0; \quad T|_{x=B+B_s}=T_B(y,t), \quad (5)$$

які визначають рівність нулевій переміщенню (у припущенні відсутності зовнішніх механічних навантажень на $y=0$, $x>B$) і деякий закон розподілу температури по глибині.

Щодо самих значень y_{I+1} ($y_{I+1}>y_I$) і B_s , то тут необхідно врахувати той факт, що для передбачуваної схеми навантаження досліджуваної моделі (рис. 1) амплітуди добових коливань термомеханічних змінних із ростом y зменшуються, а з ростом x – сходяться до певних усталених у часі законів. На підставі цього й обираються габаритні розміри розрахункової області, тобто значення y_{I+1} і B_s мають бути такими, щоб забезпечити правомірність граничних умов виду (3) та (5).

На осі y прийняті граничні умови відображають симетрію деформованого стану.

Щодо формулювання граничної умови теплової групи на поверхні $y=0$ моделі, то воно має враховувати як вхідний тепловий потік від сонячної радіації, так і конвективний і радіаційний теплообмін з навколишнім середовищем. Схему даної теплової взаємодії ілюструє рис. 2. У припущенні відсутності зовнішніх механічних впливів умова на межі $y=0$ на підставі аналізу публікацій [3, 5, 13] у даній роботі представлена у вигляді

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \xi(Q+q) + h(T_a - T|_{y=0}) + \sigma_0 \varepsilon_c T_a^4 - \sigma_0 \varepsilon_a T|_{y=0}^4. \quad (6)$$

Тут ξ – коефіцієнт поглинання сонячної радіації (коефіцієнт чорності, який дорівнює 1 – альбедо); Q – нормальна до досліджуваної поверхні інтенсивність прямого сонячного випромінювання, Вт/м²; q – інтенсивність розсіяного q випромінювання на поверхні, Вт/м²; h – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м²·К; T_a – розрахункова температура повітря, °К; $\sigma_0 \approx 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ – постійна Стефана-Больцмана; ε_a , ε_c – коефіцієнти емісії повітря та коефіцієнт по-

глинання довгохвильової радіації покриттям (у публікації [3] прийнято $\varepsilon_a = \varepsilon_c = \varepsilon$).

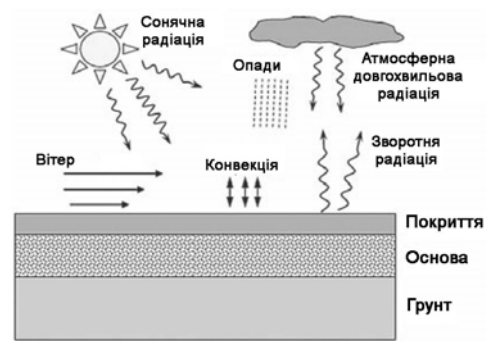


Рис. 2. Схема енергетичного балансу на поверхні дороги [4]

Зупинимося більш детально на фігуруючих (6) величинах. Із врахуванням представленої на рис. 1 схеми коефіцієнти ξ , k , h і ε_c визначаються рівностями

$$j(x) = j_1 \cdot H(B-x) + j_{I+1} \cdot H(x-B) \quad (j = \xi, k, h, \varepsilon_c),$$

де H – одинична функція Хевісайда.

Наближене значення Q може бути обчислене за формулою [17]

$$Q = \frac{I_0}{R^2} \cdot \sin z \cdot \Psi, \quad (7)$$

де $I_0 \approx 1366$ Вт/м²; z – зведений кут падіння сонячних променів на поверхню $y=0$, град. Кут z визначається часом t , відлічуваного від опівночі, і географічним положенням досліджуваної ділянки дороги – географічною широтою φ , напрямком γ (азимутом) і позовжнім ухилом β [17]

$$\begin{aligned} \sin z = & \cos \beta \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) - \sin \beta \times \\ & \times [\cos \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos \gamma + \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega]. \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $\delta \approx 23.45^\circ \cdot \sin(\Gamma + 280^\circ)$ – схилення Сонця для північної півкулі; $\omega = 360^\circ t / P$, $P = 86400$ с – тривалість доби.

Для горизонтальної ділянки дороги ($\beta=0$ і $\gamma=0$) формула (8) суттєво спрощується –

$$\sin z = \sin \varphi \cdot \sin \delta - \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega.$$

На підставі цієї формули та умови $\sin z \geq 0$ легко встановити як моменти сходу t_r і заходу t_s Сонця для географічного положення модельованої ділянки дороги –

$$t_r = \frac{P}{360^\circ} \arccos(\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta); \quad t_s = P - t_r, \quad (9)$$

так і орієнтовну тривалість світлого часу доби (від сходу до заходу) –

$$P_s = t_s - t_r = P - 2t_r. \quad (10)$$

Параметр траєкторії руху Землі R визначається рівністю [3]

$$R \approx [1.00011 + 0.03425 \cdot \sin(\Gamma + 87.858^\circ) + 0.00072 \cdot \sin(2\Gamma + 83.887^\circ)]^{-0.5}.$$

До формули (7) входить також коефіцієнт Ψ , який враховує розсіювання й поглинання сонячної радіації атмосферою –

$$\Psi = \phi^{1/\sin z} \quad (\Psi > 0), \quad (11)$$

де $\phi = 0.6 \dots 0.9$ – коефіцієнт прозорості атмосфери, що залежить від вологості повітря, змісту пилу, аерозолів, озону інше.

Слід зазначити, формула (11) виписана з публікації [18], однак у літературі можна знайти й інші формули для обчислення Ψ (див., зокрема, [11]).

Для розрахунку густини потоку розсіяної сонячної радіації q (див. (6)) використовується наведена в роботі [19] емпірична залежність

$$q = 137.1 - \frac{14.82}{\sin z}, \quad q \geq 0. \quad (12)$$

Найбільшу складність при формуванні граничної умови (6) склав вибір з наявних у літературі формули для обчислення значення коефіцієнта конвективного теплообміну між поверхнею першого шару (який, зокрема, моделював шар асфальтобетонної суміші) і навколишнім середовищем. Складність полягала в тім, що обчислені за запропонованими різними авторами формулами значення коефіцієнта h_1 суттєво відрізнялися між собою. Так, у публікаціях [3, 5, 7, 13] наведені наступні емпіричні залежності для h_1 –

$$h_1 = 0.00058 \cdot \Delta^{0.15} \cdot \frac{\lambda_a(T_1|_{y=0})}{v_a^{1.15}(T_1|_{y=0})} \cdot V^{1.15};$$

$$h_1 = 0.826 \left[1.206 |T_1|_{y=0} + T_{\text{air}} \right]^{0.3} V^{0.5} + |T_1|_{y=0} - T_{\text{air}} \left[0.5 \right],$$

де V – швидкість вітру, м/с; Δ – шорсткість покриття, мм; $\lambda_a = 0.02346 + 7.86 \cdot 10^{-5} \cdot T_a$ – теплопровідність повітря, Вт/(м²К); $v_a = (13.44 + 0.088 \cdot T_a) \cdot 10^{-6}$ – кінематична в'язкість повітря, м²/с.

Разом із тим, у монографії [20] вказується, що для асфальтобетонного покриття коефіцієнт теплообміну залежить виключно від швидкості вітру –

$$h_1 = 2.91 + 4.92 V^{0.66} + 3.78 e^{-1.28V}, \quad \text{Вт/(м}^2\text{К)}. \quad (13)$$

При цьому в [20] вважається, що V визначає значення швидкості вітру на висоті 1,0 м над поверхнею дорожнього покриття, що відрізняється від прийнятої метеослужбами за основу відліку швидкості вітру на висоті 14 м над земною поверхнею V' за допомогою масштабного коефіцієнта 0.55 –

$$V = 0.55 \cdot V'.$$

Велика кількість розрахункових виразів для h_1 може ґрунтувати розрахунковий вираз для h_{I+1} прийнято за рекомендаціями монографії [21] –

$$h_{I+1} = 11.63 + 2\sqrt{V}, \quad \text{Вт/(м}^2\text{К)}. \quad (14)$$

Для обчислення коефіцієнта емісії атмосфери ϵ_a (див. гранична умова (6)) може бути використана наведена в [22, 23] формула

$$\epsilon_a = 0.711 + 0.56 \cdot \frac{T_{\text{dp}}}{100} + 0.73 \cdot \left(\frac{T_{\text{dp}}}{100} \right)^2, \quad (15)$$

де T_{dp} – свідчити лише про те, що фактичне значення коефіцієнта конвективного теплообміну має визначатися експериментально під конкретну асфальтобетонну суміш.

Стосовно шару точки роси (°С), яка для ясного дня визначається рівністю $T_{\text{dp}}^c = 0.71 \cdot T_{\text{air}} - 0.79$, а для хмарного – $T_{\text{dp}}^o = 0.82 \cdot T_{\text{air}} - 0.81$, де T_{air} – температура навколишнього середовища, °С.

Слід зазначити, що в літературі є й інші розрахункові вирази для ε_a . Зокрема, в публікації [24] наведений модифікований вираз Брутсаєрта (Brutsaert)

$$\varepsilon_a = (1.22 + 0.06 \sin(n + 75^\circ)) \left(\frac{p_a}{T_a + 273} \right)^{1/7} (1 + 0.25X),$$

де p_a – тиск насиченої пари на поверхні, мбар ($p_a \approx 6.108 \cdot e^{17.2694T_a/(T_a+238.3)}$); $X=0 \dots 1$ – коефіцієнт хмарності ($X=0$ для ясного неба, $X=1$ – для хмарного).

Розрахунок температури навколишнього середовища T_a (див. (6)), як і коефіцієнт ε_a , залежить від T_{air} [12, 22] –

$$T_a = T_{\text{air}} \cdot [\varepsilon_a + 0.013 \cdot \cos \omega]^{0.25}. \quad (16)$$

Очевидно, що сама функція T_{air} може бути взята з метеорологічних даних, однак у рамках даного дослідження більший інтерес представляє її прогнозування на основі розроблених до теперішнього часу апроксимацій добової її зміни. Однієї з найбільш розповсюджених є апроксимація Партона-Логана [25], яка використовує ділянку синусоїди для опису денного росту температури та експоненти для вечірнього зниження

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{air}}^{\min} + (T_{\text{air}}^{\max} - T_{\text{air}}^{\min}) \times \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi(t-t_r)}{P_s+2a}\right), & t \in (t_r, 0.5P+a]; \\ e^{-\frac{t-0.5P-a}{2t_r}}, & t \in (0.5P+a, P+t_r]. \end{cases} \quad (17)$$

Тут T_{air}^{\min} , T_{air}^{\max} – мінімальна та максимальна добова температури повітря; $a \approx 5760$ с – наближене значення зміщення від полудня моменту добового максимуму температури; $b=2.1$ – коефіцієнт зменшення нічної температури [25]. Значення t_r і P_s визначаються рівностями (9) і (10).

Початкові умови до розглянутої задачі припускають рівність нулеві швидкостей точок середовища ($\dot{u}_i|_{t=0} = 0$), а також деякий початковий розподіл температурного поля по розрахунковій області $T_Q(x, y)$, який, як і функція $T_B(y, t)$, підлягає визначенню.

Співвідношення (1)–(17) представляють математичне формулювання розглянутої задачі нестационарної термов'язкопружності зі змінними в процесі її розв'язання деякими граничними умовами.

Висновки

У роботі наведено математичне формулювання задачі з дослідження нестационарного термов'язкопружного/термопружного стану дорожнього одягу на підстильному ґрунті. Сформульовані граничні умови враховують не тільки геометричні характеристики шарів, фізико-механічні та теплофізичні властивості матеріалів, але й метеорологічні та дорожні параметри. До метеорологічних параметрів належать сонячна радіація, температура повітря, хмарність, швидкість вітру; до дорожніх – географічні координати розташування ділянки автомобільної дороги, поздовжній ухил і азимут ділянки, альbedo покриття, транспортні навантаження, інше.

Розв'язання даної задачі, наприклад, методом скінченних елементів, дозволяє обчислювати напружено-деформований стан і температурне поле в шарах досліджуваної моделі, у т.ч. з метою прогнозування механічної міцності/жорсткості та теплотривкості дорожнього одягу, а також удосконалення методик її розрахунку. Деякі результати скінченно-елементного аналізу передбачається представити в другій частині даного дослідження.

Література

1. Гамеляк І.П. Аналіз існуючих моделей прогнозування температури покриття нежорстких дорожніх одягів / І.П. Гамеляк, Д.В. Волощук // Вісник Нац. трансп. ун-ту : Наук.-техн. зб. – 2012. – № 26 (1). – С. 52-57.
2. Леонович И.И. Методика и результаты оценки экстремальных температур дорожных покрытий в различных регионах республики Беларусь / И.И. Леонович, И.С. Мельникова // Автомобильные дороги и мосты : Научн.-техн. журнал. – 2012. – № 1 (9). – С. 39-47.
3. 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.

4. Matic B. A model for the pavement temperature prediction at specified depth / Matic B., Matic D., Cosic D. [et al.] // *Metallurgija*. – 2013. – Vol. 52 (4). – P. 505-508.
5. Самодурова Т.В., Бакланов Ю.В. Влияние солнечной радиации на температурный режим дорожного покрытия / Т.В. Самодурова, Ю.В. Бакланов // *Известия КГАСУ*. – 2013. – № 2 (24). – С. 308-314.
6. Пшембаев М.К. Расчет полей температур и их градиентов в дорожных бетонных покрытиях / М.К. Пшембаев, Я.Н. Ковалев, В.Д. Акельев // *ЭНЕРГЕТИКА. Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ : Международ. научн.-техн. журнал*. – 2015. – № 4. – С. 54-63.
7. Alavi M. Prediction of asphalt pavement temperature profile using the Finite Control Volume Method (FCVM) / M. Alavi, M. Pouranian, E.Y. Hajj // Режим доступа: docs.trb.org/prp/14-3111.pdf
8. 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
9. Богомолов В.А. О стационарном температурном поле многослойной дорожной одежды / В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук, И.Л. Разницын, А.Н. Кабанов, С.А. Чугуенко // *Вестник ХНАДУ : Сб. научн. тр.* – 2014. – Вып. 67. – С. 94-97.
10. Мельникова И.С. Моделирование воздействия температуры и транспортных нагрузок на возникновение и развитие трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях / И.С. Мельникова // *Наука и техника : Международ. научн.-техн. журнал*. – 2012. – № 4. – С. 44-52.
11. 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.
12. 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.
13. Minhoto M.J. Asphalt pavement temperature prediction / M.J. Minhoto, J.C. Pais, P.A.A. Pereira // *Road Materials and Pavements Design*. – Режим доступа: civil.uminho.pt/.../2006_(AR2006)_Minhoto_Pais_Pereira_A.pdf
14. Ильюшин А.А. Основы математической теории термовязкоупругости / А.А. Ильюшин, Б.Е. Победря. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
15. Коваленко Е.Д. Основы термоупругости / Е.Д. Коваленко. – К.: Наукова думка, 1970. – 308 с.
16. Hillel D. Introduction to soil physics / D. Hillel. – San Diego, CA: Academic Press. – 1982. – 392 p.
17. Duffie J.A. Solar engineering of thermal processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – New York: Wiley, 2006. – 936 p.
18. Колесник В.С. Метеорологія і кліматологія: Консп. лекцій / В.С. Колесник. – Дніпропетровськ: Вид-во ДВНЗ «Нац. гірничий університет», 2015. – 69 с.
19. Бринкворт Б. Солнечная энергия для человека / Б. Бринкворт. – М.: Мир, 1976. – 291 с.
20. Алиев А.М. Строительство автомобильных дорог и аэродромов : монография в 4 т. Т.1 / А.М. Алиев. – М.: Интрансдорнаука, 2013. – 360 с.
21. Справочная книга по добыче нефти. Под ред. Ш.К. Гиматудинова. – М.: Недра, 1974. – 704 с.
22. Garnier C. Thermal model for performance prediction of integrated collector storage systems / C. Garnier, T. Muneer, J. Currie // *J. of Renewable and Sustainable Energy*. – 2011. – Vol. 3, Iss. 1. – P. 013104-1-013104-17.
23. Tang R. Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands / R. Tang, Y. Etzion, I.A. Meir // *Energy Conversion and Management*. – 2004. – Vol. 45. – P. 1831-1843.
24. Herrero J. Parameterization of atmospheric longwave emissivity in a mountainous site for all sky conditions / J. Herrero, M.J. Polo // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2012. – Vol. 16. – P. 3139-3147.
25. Parton W.J. A model for diurnal variation in soil and air temperature / W.J. Parton, J.A. Logan // *Agric For Meteorol.* – 1981. – No. 23. – P. 205-216.

Рецензент: В.О. Карпенко, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 23 липня 2015 р.