

УДК 539.3
UDC 539.3

ДЕЯКІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕРМОПРУЖНОГО ДЕФОРМУВАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДОРОГИ

Гуляев В.І., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Мозговий В.В., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
Заєць Ю.О., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Шевчук Л.В., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

SOME REGULARITIES OF THERMO-ELASTIC DEFORMING OF THE ASPHALT ROAD OVERLAY

Gulyayev V.I., Doctor of Science (Technology), National Transport University, Kyiv, Ukraine
Mozghoyi V.V., Doctor of science (Technology), National Transport University, Kyiv, Ukraine
Gaidaichuk V.V., Doctor of Science (Technology), Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
Zaiets Yu.O., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine
Shevchuk L. V., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕРМОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ДОРОГИ

Гуляев В.И., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина
Мозговой В.В., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина
Гайдайчук В.В., доктор технических наук, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина
Заец Ю.А., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина
Шевчук Л. В., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Постановка проблеми.

На теперішній час основні проблеми забезпечення якості автомобільних доріг значною мірою пов'язані з недосконалою і застарілою базою нормативних документів їх проектування, будівництва та експлуатації. Ці обставини ускладнюють комплексне вирішення питань раціонального забезпечення відповідними ресурсами всього життєвого циклу дорожніх покриттів з урахуванням виникаючих під час їх експлуатації реальних термомеханічних процесів.

Оскільки діючі нормативні документи спираються на застарілу наукову базу, недостатньо повне врахування в ній термомеханічних властивостей матеріалів дорожнього та їх зміну у процесі експлуатації суттєво впливає на передчасне вичерпання міцності і довговічності покриття, а також знижує рівень необхідних ресурсів для відновлення його експлуатаційних характеристик.

Як свідчить практика [1,2], підвищення якості доріг виявляється можливим за допомогою вирішення ряду наукових задач, спрямованих на обґрунтування раціональних рішень з вибору дорожнього покриття. Існуюче методичне забезпечення та нормативні документи із визначення раціональних конструкцій дорожнього покриття, в основному, орієнтовані на використання узагальнюючої інформації про їх роль в системі експлуатації автомобільної дороги і, як правило, не відтворюють вимог до їх обґрунтування. Тому для повного вирішення проблеми, пов'язаної з обґрунтуванням конструкцій дорожнього покриття, слід вирішити такі задачі:

– створити математичні моделі з розрахунку критеріїв обґрунтування варіантів конструкцій дорожнього покриття;

- створити алгоритми визначення відношень між критеріями обґрунтування конструкцій дорожнього покриття при умові їх довгострокової експлуатації та змінних кліматичних умовах;
- розробити методичні основи та алгоритми з обґрунтування конструкцій дорожнього покриття в умовах їх довгострокової експлуатації та невизначеності впливу на цей процес зовнішніх факторів.

Оскільки розв'язання поставлених задач дозволяє здійснити аналіз фізичних процесів утворення тріщин, що є основним чинником передчасного руйнування дорожнього покриття, планується дослідити термомеханічні процеси при дії транспортного і кліматичного факторів, що спричиняють утворення тріщин в дорожньому покритті. Це дасть можливість створити наукові основи підвищення довговічності дорожнього покриття за рахунок раціональних технологічних рішень, застосування ефективних матеріалів і конструкцій та на основі цього розробити теоретичні положення, щодо управління ресурсним забезпеченням для підвищення довговічності дорожнього покриття протягом його життєвого циклу. Для цього передбачена розробка методів визначення розрахункових термомеханічних характеристик матеріалів покриття з застосуванням алгоритмів комп'ютерного моделювання термомеханічних процесів, що протікають в ньому при робочому і граничному станах за можливих значних градієнтах та неоднорідності їх температурних полів й створенням комп'ютерних програм для проведення чисельних досліджень термомеханічних процесів у дорожньому покритті.

Аналіз досліджень і публікацій.

Основна особливість задач аналізу термопружного напружено-деформованого стану дорожнього обшиву є їх багатопараметричність. Перш за все конструкції дорожніх покриттів являються істотно неоднорідними. В механіці суцільних середовищ розрізняють шарувато-неоднорідні середовища, в яких середовище складається з декількох пружних шарів з відмінними термомеханічними характеристиками, і градієнтно-неоднорідні середовища [3, 4], властивості яких змінюються за просторовими змінними неперервним способом.

Оскільки в дорожньому будівництві, в основному, застосовуються шарувато-неоднорідні дорожні покриття, то при математичному моделюванні механічних процесів, що протікають при їх експлуатації, доводиться мати справу з властивою їм специфікою розподілу полів деформацій і напружень. Справа в тому, що функції деформацій і напружень (а іноді і переміщень), які виникають в них, як правило, виявляються розривними і їх важко описувати простими аналітичними і чисельними засобами. З цією особливістю пов'язане і істотне ускладнення механічних явищ, що спостерігаються в них. Оскільки при експлуатації покриття дороги піддаються не тільки дії інтенсивних швидко змінних (розривних) за просторовими і часовими змінними навантажень, але також і постійно тепловим збуренням, що еволюціонує, з істотними градієнтами, проектування їхніх конструкцій має проводитися на основі вибору оптимальних (раціональних) характеристик матеріалів, що використовуються, їх термо-механічних властивостей, геометричних параметрів проєктованих шарів і порядку їхнього чергування. Цей вибір може бути зроблений за допомогою комп'ютерного моделювання термо-напруженого стану дорожнього покриття та його еволюції за часом.

Мета даної роботи полягає в розробці методики дослідження термопружних напружень в шарувато-неоднорідних дорожніх покриттях.

Основна частина.

Виділений для розрахунку термопружного напружено-деформованого стану поперечний переріз конструкції дороги включає чотири шари дорожнього покриття і масив прилеглої ґрунту. Загальна схема конструкції і її фрагментів представлена на рис.1.

Геометрія системи визначається параметрами $L_1 = 24,5$ м, $L_2 = 23,5$ м, $L_3 = 11,5$ м, $L_4 = 7,5$ м, $H = 0,55$ м, $H_1 = 0,5$ м, $H_2 = 2$ м.

Види матеріалів фрагментів конструкції, їхні товщини h_1, h_2, h_3, h_4 , і значення термо-механічних параметрів наведені у таблиці 1. В ній позначено: E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – густина; α_T – коефіцієнт теплового лінійного розширення; λ – коефіцієнт теплопровідності; $c_{об}$ – питома об'ємна теплоємність.

Вважалося, що конструкція доріг піддається термічній дії в результаті денної зміни температури повітря. Було прийнято, що при цьому температура на її верхній поверхні змінюється за заданим законом. Розрахунки еволюції поля температури в масиві конструкції проведені методом скінченних елементів. При цьому було враховано, що уздовж поздовжньої осі Oy дороги деформації

$\varepsilon_y = 0$ і весь масив знаходиться в стані плоского деформованого стану. Ця обставина дозволила виділити перетинами $y = 0$ і $y = \Delta y$ поперечний шар масиву товщиною Δy і апроксимувати систему тривимірними скінченними елементами з розміром Δy вздовж координати y . Скінченно-елементна модель системи з виділеним її пошаровим фрагментом 1-4 і ґрунтовим масивом 5 показана на рис. 2. Збоку кожного фрагмента вказано число скінченних елементів дискретної моделі. При цьому загальне число скінченних елементів склало 29868.

Таблиця 1 – Фізичні та термомеханічні значення параметрів матеріалів конструкції дорожнього одягу

Номер i шару	Матеріал	h_i (м)	E_i (Па)	ρ кг/м ³	ν	α_T С ⁻¹	λ Вт/(м·К)	$c_{об}$ Дж/(м ³ ·К)
1	Асфальтобетон дрібнозернистий	0,05	$5 \cdot 10^9$	2400	0,2	$2,46 \cdot 10^{-5}$	1,0	$3,77 \cdot 10^6$
2	Асфальтобетон пористий круглозернистий	0,1	$1,4 \cdot 10^9$	2390	0,25	$1,92 \cdot 10^{-5}$	0,7	$2,63 \cdot 10^6$
3	Щебінь	0,2	$0,4 \cdot 10^9$	2300	0,3	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,5	$1,81 \cdot 10^6$
4	Пісок	0,2	$0,1 \cdot 10^9$	2050	0,3	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1,5	$4,83 \cdot 10^6$
5	Ґрунт	2,5	$0,1 \cdot 10^9$	1960	0,35	$0,31 \cdot 10^{-5}$	1,05	$3,23 \cdot 10^6$

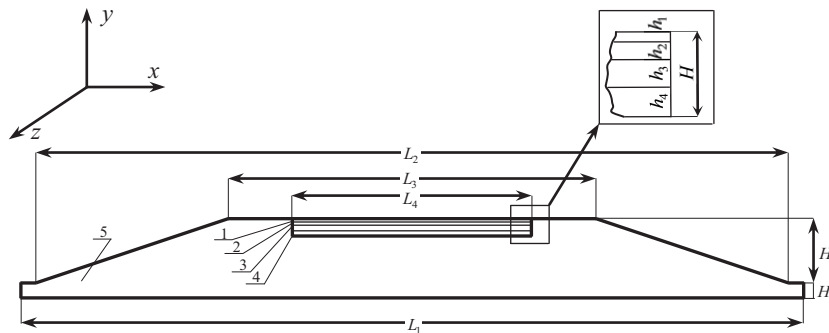


Рисунок 1 - Схема поперечного перерізу конструкції дорожнього покриття

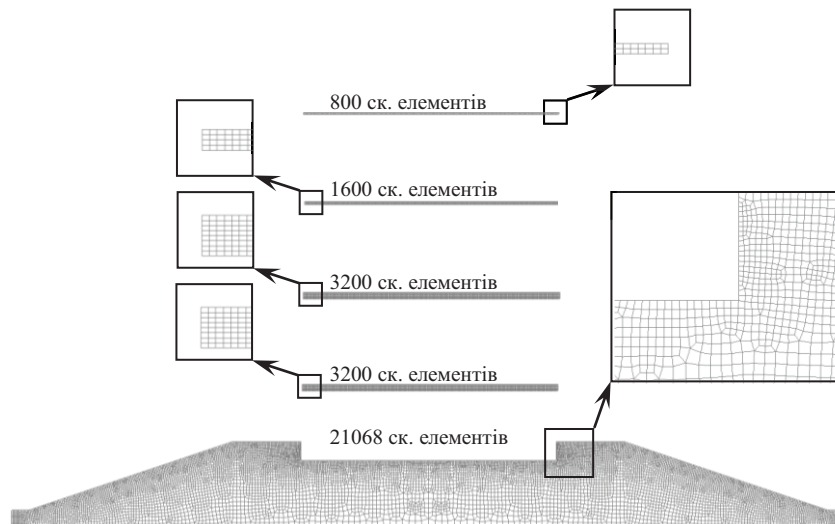


Рисунок 2 - Скінченно-елементна модель перерізу дороги

Досліджуються процеси еволюції поля температури в масиві покриття дороги при добовій зміні температури навколишнього середовища. З урахуванням натурних спостережень прийнято, що в результаті атмосферних температурних варіацій температура T на поверхні покриття та придорожнього ґрунту в денний час змінюється за законом синусоїди від деякого початкового значення T_0 (вранці) до її максимуму T_{max} (опівдні) і до вечора знову падає до вихідного значення

T_0 . В нічний час, навпаки, температура зменшується від T_0 (ввечері) до T_{\min} (опівночі) і потім знову зростає до T_0 (в ранковий час). Схема зміни $T(t)$ протягом 24 годин ($0 \leq t \leq 86400$ с) показана на рис.3.

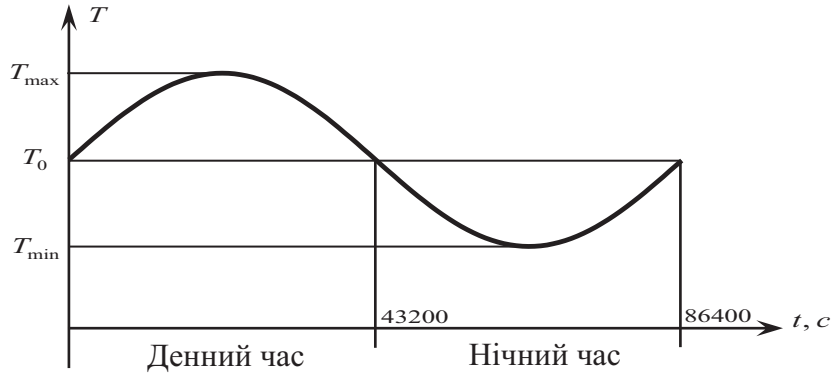


Рисунок 3 - Графік зміни за часом t температури на поверхні покриття

Задача про термопружне деформування дорожнього покриття розв'язується в лінійній постановці. Це дозволяє аналізувати тільки прирости деформацій і напружень, викликані приростами температури. Тому будемо вважати, що в початковому стані температура всього масиву (як і T_0), деформації та напруження дорівнюють нулю і будемо аналізувати процес термопружного деформування при зміні температури $T(t)$ на поверхні за законом (рис. 3)

$$T(t) = (T_{\max} - T_0) \sin(\pi t / 43200). \quad (1)$$

Тоді еволюція поля температури на границях кожного шару покриття і масиву ґрунту визначається рівнянням нестационарної теплопровідності [5]

$$\nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Тут $a = \lambda_q / c_{об}$ – коефіцієнт температуропровідності, λ_q – коефіцієнт теплопровідності, $c_{об}$ – питома об'ємна теплоємність, доданок $\nabla^2 T$ – еквівалентний виразу $\partial T / \partial x^2 + \partial T / \partial y^2 + \partial T / \partial z^2$.

Вважаємо, що при термопружному деформуванні всього масиву силами інерції можна знехтувати і процес буде квазістатичним. Тоді поле пружних переміщень $\mathbf{u}(x, y, z)$ описується векторним рівнянням [5, 6, 7]

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (x + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad}(T) = 0 \quad (3)$$

де λ і μ – ізотермічні параметри Ляме.

Граничні умови для функції $T(x, y, z, t)$ на вільній поверхні задаються у формі (1), на умовних кінцях виділеної області прийнято, що теплові потоки в напрямку нормалі відсутні, тому похідна від T за нормаллю \mathbf{n} дорівнює нулю,

$$\partial T / \partial n = 0. \quad (4)$$

При формулюванні граничних умов для функції $\mathbf{u}(x, y, z)$ вважалося, що на верхній поверхні середовище вільне від нормальних і дотичних напружень, а на бічних і нижній поверхнях умовних розрізів переміщення по нормалі і дотичній напруження дорівнюють нулю. На поверхнях контакту шарів покриття між собою і з ґрунтовим масивом були прийняті умови сполучення функцій T і відповідних функцій переміщень і деформацій.

Прийнята постановка задачі про термопружне деформування виділеного багатошарового масиву дозволила використовувати алгоритм її вирішення, при якому спочатку розв'язується задача нестационарної теплопровідності для рівняння (2) на всьому діапазоні часу t , рівному 12 годин (43200 с). Потім в потрібні для нас моменти часу t_i з використанням побудованих полів температури $T(x, y, z, t_i)$, за допомогою рівнянь (3) визначалися поля переміщень, деформацій і напружень.

Розв'язання цих рівнянь здійснюється шляхом переходу до скінченно-елементних моделей [8]

$$\begin{aligned} [K_T]\{T\} - [A]\{\dot{T}\} &= \{T_f(t)\}, \\ [K_u]\{u\} &= [L]\{T(t_i)\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тут $[K_T]$ – матриця коефіцієнтів скінченно-елементної моделі рівняння теплопровідності, $[A]$ – матриця коефіцієнтів моделі при похідній \dot{T} , $\{T_f(t)\}$ – вектор заданих значень температури T на поверхні покриття, $[K_u]$ – матриця жорсткості для скінченно-елементної моделі пружного масиву, $[L]$ – матриця, яка відображає вплив температури на переміщення елементів масиву.

Після підрахунку значень компонент вектора переміщень $\{u\}$ у вузлах скінченно-елементної моделі обчислювалися компоненти тензорів деформацій ε_{jk} і напружень σ_{jk} . Вони визначалися за допомогою рівностей [7]

$$\begin{aligned} \varepsilon_{jk} &= \frac{1}{2}(u_{j,k} + u_{k,j}), \\ \sigma_{jk} &= 2\mu\varepsilon_{jk} + [\lambda\varepsilon_{ll} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \cdot T]\delta_{jk}, \end{aligned} \quad (6)$$

дискретизованих в кожному вузлі моделі.

У цих рівностях індекси j, k, l пробігають значення 1, 2, 3; при цьому напрямки x_1, x_2, x_3 відповідають напрямкам x, y, z ; $u_{j,k} = \partial u_j / \partial x_k$; $\varepsilon_{ll} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$; δ_{jk} – символ Кронекера, що дорівнює 0 при $j \neq k$ і рівний 1 при $j = k$.

Попередній розгляд геометричної схеми дорожнього покриття (рис. 1), термо-механічних параметрів властивостей його фрагментів (табл. 1) і форми функції теплового збурення (рис. 3) змушують зробити припущення, що поставлена задача про термонапружений стан проста і термопружні ефекти, які супроводжують еволюцію поля температур в даному шаруватому масиві, є елементарними. Однак такий спрощений висновок є поверхневим і абсолютно не відповідає дійсності. Є два фактори, які роблять явище, що розглядається, нетривіальним і вельми привабливим, а проблему його моделювання досить трудомісткою. По-перше, середовище, в якому еволюціонує температурне поле, шарувато-неоднорідне і, по-друге, проблема його моделювання при обраних значеннях термо-механічних характеристик і розмірів виділеної для розгляду області відноситься до класу сингулярно збурених [9, 10, 11]. Відзначимо, що задача теплопровідності є сингулярно збуреною, якщо коефіцієнт $1/a$ перед похідною $\partial T / \partial t$ в рівнянні (2) малий, а розмір області в напрямку поширення теплового потоку досить великий. Тоді при зовнішньому тепловому збуренні тепловий потік не встигає проникнути від граничної поверхні вглиб тіла і поле температури отримує помітну зміну лише в приграничній зоні, набуваючи форму так званого крайового ефекту. У цьому випадку функція температури $T(x, y, z, t)$ не тільки досягає помітні прирости в крайовій області, а й характеризується також високими значеннями її градієнтів, тобто похідних за просторовими змінними. Такий ефект супроводжується утворенням великих перепадів значень функції переміщень і деформацій пружного тіла, а також нормальних і дотичних напружень. Відомо, що тільки у випадку, коли в однорідному пружному тілі, вільному від в'язей, поле температури $T(x, y, z)$ постійне або навіть змінюється лінійно за просторовими змінними x, y, z , то всі напруження в ньому дорівнюють нулю. У всіх інших випадках у ньому формуються ненульові напруження і вони зростають з ускладненням температурних полів. Другий фактор пов'язаний з тим, що інтенсивності термопружних напружень ще більше збільшуються, якщо неоднорідними є також характеристики пружності середовища, тим більше, якщо вони шарувато неоднорідні. Тоді поле напружень стає розривним і набуває яскраво виражені екстремуми. Очевидно, що всі ці явища є деструктивними для

тіл і середовищ, що розглядаються, а задачі теоретичного (комп'ютерного) моделювання цих явищ відрізняються великою складністю і поганою обчислювальною збіжністю. У зв'язку з цим чисельне дослідження термопружного напруженого стану таких систем доводиться проводити на малих скінченно-елементних решітках і додатково тестувати результати обчислень.

За розробленою методикою було проведено комп'ютерне моделювання конструкції дорожнього покриття, представленого на рис. 1, при значеннях параметрів, наведених у таблиці 1, на основі скінченно-елементної моделі, показаної на рис. 2. Було прийнято, що протягом дня температура на верхній поверхні покриття змінювалася за законом (1) при $T_0 = 0$, $T_{\max} = 12^\circ \text{C}$ (див. графік на рис. 3). На рис. 4 показано поле розподілу температури в поперечному перерізі конструкції дороги в момент часу $t = 6$ годин, коли температура на поверхні покриття досягає максимуму. Значення температури в кожній точці перерізу можуть бути визначені за шкалою кольорової палітри, яка наведена праворуч. Для наочності температурне поле представлено на окремих фрагментах системи (рис. 5). Можна помітити, що максимальні значення температури локалізуються в крайовій зоні, прилеглій до верхньої поверхні покриття.



Рисунок 4 - Поле температури

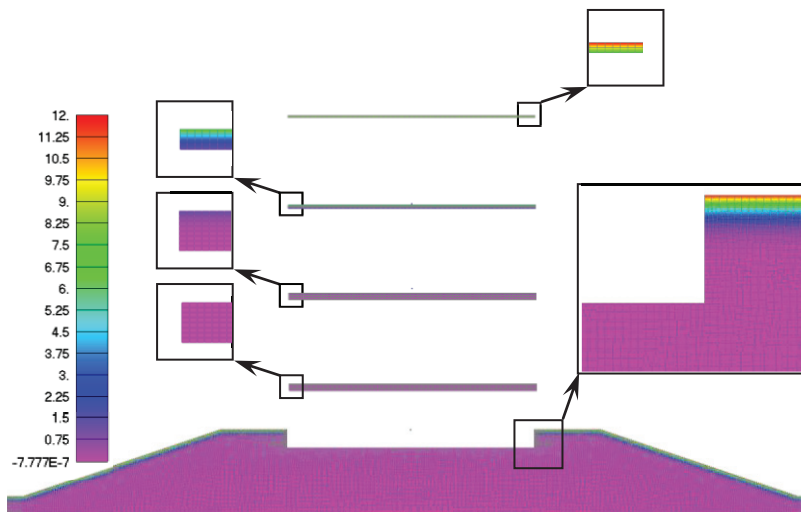


Рисунок 5 - Поля температури у фрагментах дороги

Для більшої наочності представимо в детальній формі графік зміни температури вздовж центральної вертикалі покриття. На рис. 6а подана схема шарів покриття, що знаходиться у відповідності з координатною віссю Oy , яка напрямлена вертикально. На цій осі побудована функція для моментів часу $t = 6$ год (рис. 6б), $t = 12$ год (рис. 6в) та $t = 18$ год (рис. 6г). Можна побачити, що поле температури має помітні значення лише на границях першого і половини другу шарів. При цьому наступні (більш низькі) шари і ґрунт виявилися непрогрітими. На рис. 6б видно також істотний градієнт функції $T(y)$ в приграничній зоні, яка знаходиться у відповідності з теорією сингулярно збурених рівнянь параболічного типу [10, 11].

Генерування температурного поля у вигляді крайового ефекту і шарувата неоднорідність дорожнього покриття обумовлюють формування в ньому полів напружень досить складної структури. Для їх побудови спочатку з використанням знайденої функції температури розв'язується система рівнянь (3) на тій же самій скінченно-елементній решітці і потім за допомогою формул (4) обчислюються деформації і напруження в усіх її вузлах.

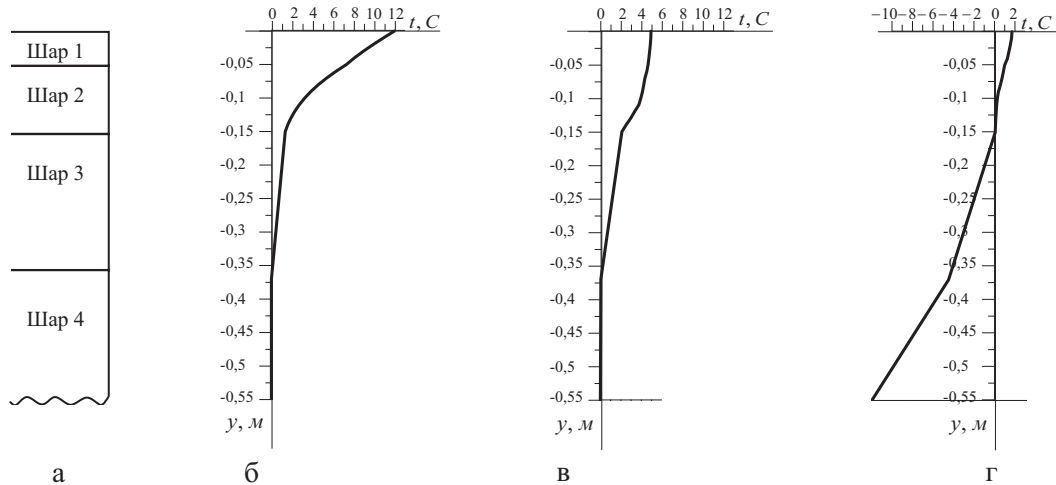


Рисунок 6 - Схема розподілу температури по глибині у виділеному центральному скінченно-елементному стовпчику (стовпцю)

На рис. 7 представлена схема поперечного перерізу покриття в деформованому стані. Відповідний йому напружений стан конструкції має особливу специфіку. Вона обумовлена не тільки неоднорідністю температурного поля і характеристик пружності системи, але і її конструкцією. Так, для прийнятої розрахункової схеми конструкції дороги пружні переміщення уздовж її поздовжньої осі дорівнюють нулю. Тому можна записати

$$u_z = u_3 = 0, \quad \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{33} = 0. \quad (7)$$

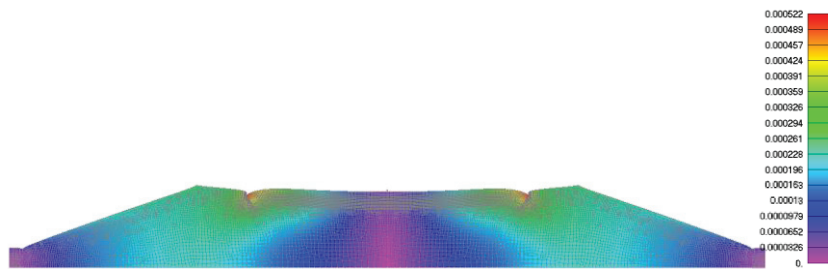


Рисунок 7 - Схема перерізу дороги в термодформованому стані

Оскільки вся виділена для розрахунку конструкція дороги являє собою шарувату структуру і на її верхній поверхні нормальні напруження дорівнюють нулю, то можна вважати, що і в усьому її масиві

$$\sigma_{yy} = \sigma_{22} \approx 0. \quad (8)$$

тоді маємо

$$\sigma_{yy} = 2\mu\varepsilon_{yy} + [\lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})] - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T = 0. \quad (9)$$

Звідси можна ε_{yy} виразити через ε_{xx}

$$\varepsilon_{yy} = [-\lambda\varepsilon_{xx} + (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T]/(\lambda + 2\mu) \quad (10)$$

і напруження σ_{xx} і σ_{zz} представити в формі

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 2\mu\varepsilon_{xx} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T = \frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} \varepsilon_{xx} - \frac{2\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + 2\mu} \alpha_T T, \\ \sigma_{zz} &= \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T = \frac{2\lambda\mu}{\lambda + 2\mu} \varepsilon_{xx} - \frac{2\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + 2\mu} \alpha_T T.\end{aligned}\quad (11)$$

Оскільки в отриманих виразах функції σ_{xx} і σ_{yy} виражені тільки через деформацію ε_{xx} і температуру T , причому складові, що містять T , однакові, можна напруження σ_{zz} виразити через σ_{xx} і T

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xx} - 2\mu\varepsilon_{xx}. \quad (12)$$

Ця рівність дозволяє встановити важливі закономірності розподілу полів напружень в шаруватих дорожніх покриттях. По-перше, як вже зазначено вище, можна вважати, що нормальні напруження σ_{yy} на площадках $y = const$ малі і тоді прийемо, що

$$\sigma_{yy} = 0. \quad (13)$$

По-друге, враховуючи, що модуль пружності ґрунту E_5 помітно менший модулів пружності $E_i (i=1 \div 4)$ кожного з шарів покриття, то ґрунтове середовище на бічних границях покриття слабо перешкоджає вільному тепловому розширенню в бічному напрямку і шари майже вільно розширюються. Тому прийемо, що при додатній T деформація ε_{xx} також додатня і в рівності (11) для ε_{xx} ця величина набуває порівняно невеликі за модулем від'ємні (стискаючі) значення за рахунок другого доданка.

У цьому випадку за допомогою рівності (12) можна встановити третю характерну особливість розподілу полів термопружних напружень в даній структурі. Так як в правій частині цієї рівності величина σ_{xx} порівняно мала і від'ємна і від неї віднімається немала величина (другий член з додатним ε_{xx}), то σ_{zz} приймає від'ємне і найбільше за модулем значення.

Результати проведеного скінченно-елементного моделювання підтвердили ці висновки. Оскільки під дією теплового збурення встигають прогріватися тільки шари конструкції, прилеглі до її вільної поверхні, то термопружні переміщення також мають помітні переміщення лише в приграничній зоні (рис. 7), хоча їх значення залишаються досить малими і лише трохи перевищують 0,5 мм.

Сформульовані вище докази про особливості формування полів напружень σ_{xx} і σ_{zz} також відповідають даним чисельного аналізу (рис. 8 і 9, відповідно). Перш за все зазначимо, що стискаючі напруження σ_{xx} досягають пікових значень в границях першого шару, де найбільшими є і модуль пружності E (див. табл. 1), і значення температури T . У границях другого шару напруження σ_{xx} набули істотно менших значень, причому вони виявилися знакозмінними. Цей ефект обумовлений тим, що перший шар, завдяки підвищеній температурі, отримав більш істотні переміщення u_x і захопив за собою другий шар, який при цьому виявився частково розтягнутим. Інші шари покриття виявилися практично ненапруженими.

Маючи в своєму розпорядженні графік функції σ_{xx} на рис. 8, можна за допомогою формули (12) легко оцінити вид напружень σ_{zz} (рис. 9). Вони помітно перевищують напруження σ_{xx} і їх концентрація в границях першого шару є очевидною. Дотичні напруження σ_{xy} в даній системі формуються завдяки згенерованому градієнту температурного поля в крайовій зоні. У центральному стовпці конструкції вони дорівнюють нулю в силу симетрії системи відносно цього перерізу і досягають найбільших значень приблизно у вертикальному перерізі, який віддалений на чверть ширини покриття від центру (див. рис. 10). Причому максимальне значення цієї функції досягається на границі першого і другого шарів, де максимальним є градієнт $T(x, y)$.

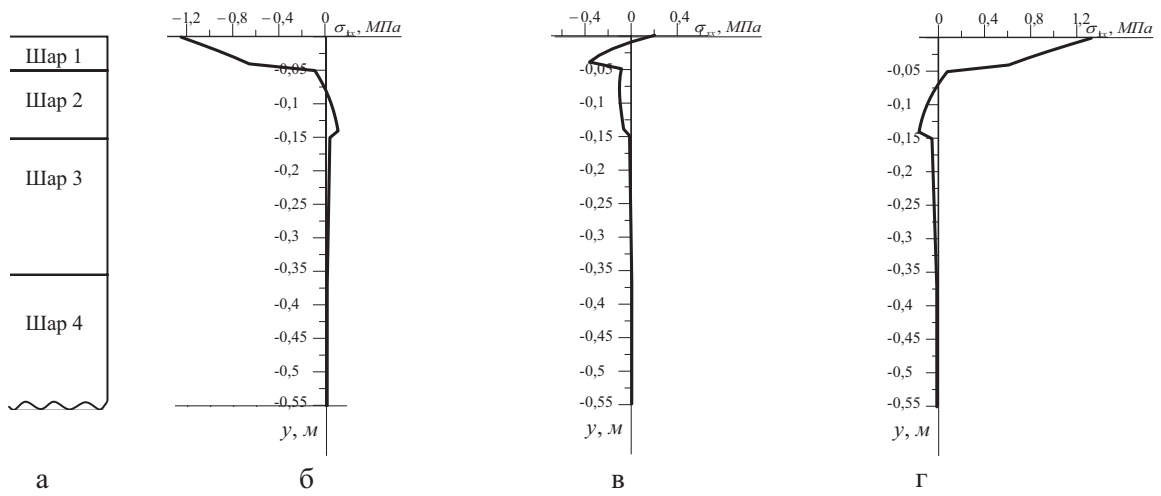


Рисунок 8 - Схема розподілу термопружних напружень σ_{xx} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

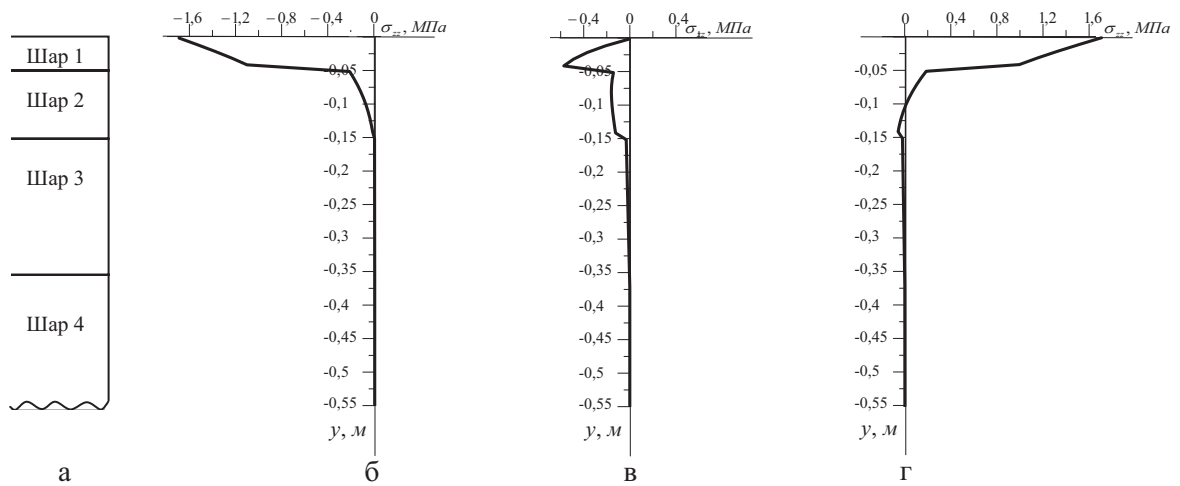


Рисунок 9 - Схема розподілу термопружних напружень σ_{zz} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

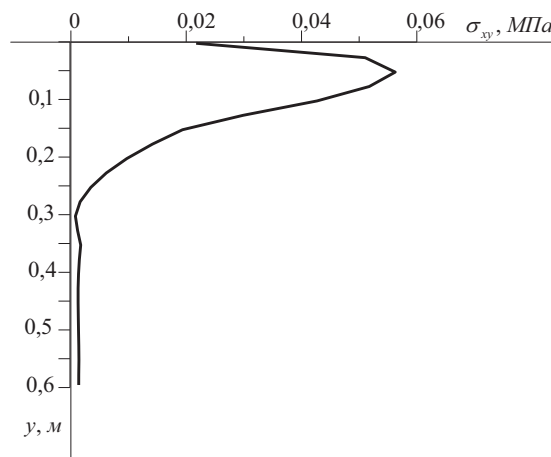


Рисунок 10 - Схема розподілу термопружних напружень σ_{xy} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

Відзначимо також, що напруження σ_{xx} і σ_{xy} зростають зі збільшенням ширини дороги L_4 і зменшуються з її зменшенням. Тому якщо ширина дороги велика і є доцільність зменшення термопружних напружень, то вони можуть бути знижені за рахунок роздільного шва, який зроблений уздовж роздільної лінії дороги.

Зазначені властивості розподілу полів температури і напружень в масиві дорожнього покриття встановлені для випадку додатних збільшень значень температури на вільній поверхні системи. При цьому напруження σ_{xx} і σ_{zz} виявилися, в основному, стискаючими, що можна розцінювати як сприятливий фактор, оскільки матеріали покриття, здебільшого, мають порівняно високі характеристики при їх стисканні, і вони гірше чинять опір зусиллям зсуву і, особливо, розтягу. У зв'язку з тим, що розглянута задача вивчається в лінійній постановці, то можна очікувати, що при від'ємних значеннях температури, що збудується, всі шукані функції збережуть свої форми і тільки змінять знак. Тому можна зробити висновок, що зимовий час є найбільш сприятливим для міцності дорожнього покриття, оскільки напруження σ_{zz} в верхньому шарі є розтягнутими і мають найбільші значення.

На завершення відзначимо основні закономірності формування полів термопружних напружень. До найпомітнішого явища можна віднести утворення крайового ефекту у функції розподілу температури $T(x, y, z, t)$. У зв'язку з цим суміщення гладкої неоднорідності температурного поля і шаруватої неоднорідності термомеханічних властивостей фрагментів покриття приводить до концентрацій напружень, які є розривними функціями і змінюють свої знаки при еволюції температурного поля. Вони також значною мірою залежать від наявності обмежень, що перешкоджають вільному термопружному розширенню-звуженню окремих фрагментів системи. Тому можна стверджувати, що вибором коефіцієнтів теплопровідності і температурного лінійного розширення, а також параметрів пружності можна керувати характером розподілу полів температури і напружень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Radovsky B. Ways to reduce low-temperature cracking of asphalt pavements / B. Radovsky, V. Mozgovoj // 4-th Eurobitum Symposium. Summaries and papers. Madrid, 4-9 oct. – 1989. Vol. 1. – P. 571-575.
2. Мозговой В.В. Повышение гидроизоляционной способности асфальтобетонного покрытия / В.В. Мозговой // Проблемы механики и строительства транспортных сооружений: Труды II Международной научно-практической конференции. - Алматы. – 2015. – 54-60 с.
3. Заєць Ю.О. Екранування розривних хвиль шаром пружного середовища / Ю.О. Заєць // Вісник НТУ. – 2010. – Вип.21. – С.366 – 371.
4. Механика горных выработок при действии гравитационных и динамических нагрузок: монография / [В. И. Гуляев, П. З. Кошель, Ю. А. Заец и др.]. – Ивано-Франковск : Изд-во Прикарпат. нац. ун-та им. В. Стефаника, 2014. – 438 с.
5. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. – Киев: Наукова Думка, 1970. – 239 с.
6. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1970. – 256 с.
7. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975 – 872 с.
8. Гуляев В.І. Скінченноеlementний аналіз стійкості коливань лопатей ВЕУ при складному обертанні / В.І. Гуляев, В.В. Гайдайчук, В.П. Носенко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2013. – №1. – С. 8 – 13.
9. Чанг Н. Нелинейные сингулярно возмущенные краевые задачи / Н. Чанг, Ф. Хауэс. – М.: Мир, 1988. – 247 с.
10. Shishkin G.I. Method of splitting for singularly perturbed parabolic equations / G.I. Shishkin // East-West J.Numer. Math. – 1993. – V.1, № 2. – P.147 – 163.
11. Шишкин Г.И. Аппроксимация решений сингулярно возмущенных краевых задач с параболическим пограничным слоем / Г.И. Шишкин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1989. – Т.29, № 7. – С.963 – 977.

REFERENCES

1. Radovsky B., Mozgovoj V. Ways to reduce low-temperature cracking of asphalt pavements // 4-th Eurobitum Symposium. Summaries and papers. Madrid, 4-9 oct. 1989. Vol. 1. – P. 571-575.

2. Mozhovoy V.V. Povyishenie gidroizolyatsionnoy sposobnosti asfaltobetonnoy pokryitiya // Problemy mehaniki i stroitelstva transportnykh sooruzheniy: Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Almaty. 2015. – P. 54-60.
3. Zayets' Yu.O. Ekranuvannya rozryvnykh khvyly' sharom pruzhnoho seredovyscha. // Visnyk NTU, 2010. No.21. – P.366 – 371.
4. Gulyayev, V. I., Lugovoi, P. Z., Zaets Yu. A. Mechanics of rock systems under action of gravity and dynamic loads. Ivano-Frankivsk: GVUZ, 2014. 438 P.
5. Kovalenko A.D. Osnovyi termouprugosti. Kyiv: Naukova Dumka, 1970. – 239 P.
6. Novatskiy V. Dinamicheskie zadachi termouprugosti. Moskva: Mir, 1970. – 256 P.
7. Novatskiy V. Teoriya uprugosti. Moskva: Mir, 1975 – 872 P.
8. Gulyaev V.I., Gaydaychuk V.V., Nosenko V.P. Skinchennoelementniy analiz stiykosti kolivan lopatey VEU pri skladnomu obertanni // Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy, – 2013. – No1. p. 8 – 13.
9. Chang N., Haues F. Nelineynyye singulyarno vozmuschennyie kraevyye zadachi. Moskva: Mir, 1988. – 247 P.
10. Shishkin G.I. Method of splitting for singularly perturbed parabolic equations // East-West J. Numer. Math, 1993. Vol.1, No. 2. – p.147 – 163.
11. Shishkin G.I. Approksimatsiya resheniy singulyarno vozmuschennyih kraevyih zadach s parabolicheskim pogranychnym sloem // Zhurnal vyichislitelnoy matematiki i matematicheskoy fiziki, 1989. – Vol.29, No. 7. – p. 963 – 977.

РЕФЕРАТ

Гуляев В.І. Деякі закономірності термопружного деформування асфальтобетонного покриття дороги / В.І. Гуляев, В.В. Мозговий, В.В. Гайдайчук, Ю.О. Заєць, Л.В. Шевчук // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2017. – Вип. 1 (37).

В роботі розглянуто задачу комп'ютерного моделювання нестационарних полів температури і напружень в шарувато-неоднорідних асфальтобетонних покриттях доріг.

Об'єкт дослідження – процеси і ресурси, що впливають на міцність і довговічність покриття шаруватого напівпростору протягом життєвого циклу.

Мета даної роботи полягає в розробці методики дослідження термопружних напружень в шарувато-неоднорідних дорожніх покриттях.

Метод дослідження. Використовується скінченно-елементний метод розрахунку полів температури та напружень в шарувато-неоднорідних пружних середовищах.

Розглянута задача про термопружне деформування шарувато-неоднорідного напівпростору, що моделює асфальтобетонне покриття автомобільної дороги. Побудовані скінченно-елементні моделі явищ поширення тепла і формування викликаних ним полів напружень. Показано, що сформульоване рівняння теплопровідності є сингулярно збуреним. В зв'язку з цим поля температури, спричинені еволюцією зовнішнього теплового збурення, мають вид крайових ефектів, утворених в прикордонній зоні системи. Виявлено, що максимальні напруження, породжені таким температурним полем, орієнтовані, в основному, у напрямі вздовж осьової лінії автомобільної дороги.

Результати статті можуть бути упровадженні в практику проектування і будівництва асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОМОБІЛЬНА ДОРОГА, АСФАЛЬТОБЕТОННЕ ПОКРИТТЯ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР, ТЕРМОПРУЖНЕ ДЕФОРМУВАННЯ, ШАРУВАТО-НЕОДНОРІДНИЙ НАПІВПРОСТІР.

ABSTRACT

Gulyayev V.I., Mozgovoy V.V., Gaidaichuk V.V., Zaiets Yu. O., Shevchuk L. V. Some regularities of thermo-elastic deforming of the asphalt road overlay. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2017. – Issue 1 (37).

In the paper, the problem of computer simulation of nonstationary fields of temperature and stresses in layered nonhomogeneous asphalt road overlays is considered.

The research object is processes and resources, which influence on the strength and durability of the layered semispace overlay during its life cycle.

The research target is to elaborate techniques for analysis of thermo-elastic stresses in layered nonhomogeneous road overlays.

The method of investigation. The finite element method is used for calculation of the temperature and stress fields in the layered nonhomogeneous elastic media.

The problem on thermo-elastic deforming of layered nonhomogeneous semispace, modeling the asphalt overlay of the automobile road is considered. The finite element models of the phenomena of the temperature propagation and stress fields formulation are created. It is shown that the deduced equations of thermo-conductivity are singularly perturbed. For this reason, the temperature fields, generated by evolution of the external heat perturbation, have the form of boundary effects, formed in the boundary zone of the system. It is established that the maximal stresses, conditioned by the similar temperature fields, are principally oriented in the directions of the automobile road axis line.

The investigation results can be inculcated into the practice of design and building of the automobile road asphalt overlays.

KEY WORDS. AUTOMOBILE ROAD, ASPHALT OVERLAY, TEMPERATURE FIELD, THERMO-ELASTIC DEFORMING, LAYERED NONHOMOGENEOUS SEMISPAC.

РЕФЕРАТ

Гуляев В.И. Некоторые закономерности термоупругого деформирования асфальтобетонного покрытия дороги. / В.И. Гуляев, В.В. Мозговой, В.В. Гайдайчук, Ю.А. Заец, Л.В. Шевчук // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2017. – Вып. 1 (37).

В работе рассмотрена задача компьютерного моделирования нестационарных полей температуры и напряжений в слоисто-неоднородных асфальтобетонных покрытиях дорог.

Объект исследования - процессы и ресурсы, влияющие на прочность и долговечность покрытия слоистого полупространства в течение жизненного цикла.

Цель данной работы заключается в разработке методики исследования термоупругих напряжений в слоисто-неоднородных дорожных покрытиях.

Метод исследования. Используется конечно-элементный метод расчета полей температуры и напряжений в слоисто-неоднородных упругих средах.

Рассмотрена задача о термоупругом деформировании слоисто-неоднородного полупространства, моделирующего асфальтобетонное покрытие автомобильной дороги. Построены конечно-элементные модели явлений распространения тепла и формирования вызванных им полей напряжений. Показано, что сформулированное уравнение теплопроводности является сингулярно возмущенным. В связи с этим поля температуры, вызванные эволюцией внешнего теплового возмущения, имеют вид краевых эффектов, сформированных в прикраевой зоне системы. Выявлено, что максимальные напряжения, вызванные таким температурным полем, ориентированы, в основном, в направлении вдоль осевой линии автомобильной дороги.

Результаты статьи могут быть внедрены в практику проектирования и строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ, АСФАЛЬТОБЕТОННОЕ ПОКРЫТИЕ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР, ТЕРМОУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ, СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО.

АВТОРИ:

Гуляев Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри вищої математики, e-mail: valery@gulyayev.com.ua, тел. +380442847109, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Мозговий Володимир Васильович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, e-mail: mozgovuu@gmail.com, тел. +380505062564, Україна, 01103, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Гайдайчук Віктор Васильович, доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, e-mail: viktor_gaydauchuk@bigmir.net, тел. +380442415572, Україна, 03037, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31.

Заєць Юлія Олександрівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, асистент кафедри вищої математики, e-mail: yzaets@gmail.com, тел. +380979712351, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Шевчук Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, асистент кафедри вищої математики, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, тел. +380667153633, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42.

AUTHOR:

Guliaiev V. I., Doctor of Science (Technology), professor, National Transport University, head of department high mathematics, e-mail: valery@gulyayev.com.ua, tel. +380442847109, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str., 42.

Mozgovyy V. V., Doctor of Science (Technology), professor, National Transport University, head of department road construction materials and chemistry, e-mail: mozgovyy@gmail.com, tel. +380505062564, Ukraine, 01103, Kyiv, Kikvidze str., 42, of. 109.

Gaidaichuk V.V., Doctor of Science (Technology), professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, head of department of theoretical mechanics, e-mail: viktor_gaydaychuk@bigmir.net, tel. +380442415572, Ukraine, 03037, Kyiv, Povitroflotsky Avenue, 31.

Zaiets Yu. O., Ph. D., National Transport University, assistant department of high mathematics, e-mail: yzaets@gmail.com, tel. +380979712351, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42.

Shevchuk L. V., Ph. D., National Transport University, assistant department of high mathematics, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, tel. +380667153633, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42.

АВТОРЫ:

Гуляев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный транспортный университет, заведующий кафедрой высшей математики, e-mail: valery@gulyayev.com.ua, тел. +380442847109, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе, 42.

Мозговой Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, Национальный транспортный университет, заведующий кафедрой дорожно-строительных материалов и химии, e-mail: mozgoviy@gmail.com, тел. +380442859528, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе, 42.

Гайдайчук Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, заведующий кафедрой теоретической механики, e-mail: viktor_gaydaychuk@bigmir.net, тел. +380442415572, Украина, 03037, г. Киев, проспект Воздухофлотский, 31.

Заец Юлия Александровна, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, ассистент кафедры высшей математики, e-mail: yzaets@gmail.com, тел. +380979712351, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе, 42.

Шевчук Людмила Владимировна, кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, ассистент кафедры высшей математики, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, тел. +380667153633, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Лоза І.А., доктор фізико-математичних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Киричук О.А., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWER:

Loza I.A., Ph.D., Physics and Mathematics (Dr), professor, National Transport University, head of department of theoretical mechanics, Kyiv, Ukraine.

Kuruchyk O.A., Ph.D., Engineering (Dr.), professor, National University of construction and architecture, professor, department of theoretical mechanics, Kyiv, Ukraine.