

УДК 625.73

Є.В.Дорожко, В.М.Ряпухін

**Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ В ТОНКИХ
АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРАХ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ**

Виконано аналіз літературних даних та нормативних документів стосовно розрахунку температурних напружень в асфальтобетонних шарах на жорсткій основі та експлуатаційної поведінки таких конструкцій. Реалізовано уточнення визначення температурних напружень в асфальтобетонних шарах на жорсткій основі.

Ключові слова: асфальтобетонний шар, цементобетонна плита, температурні деформації і напруження, функція релаксації.

Форм 18. Літ 19.

Е.В.Дорожко, В.Н.Ряпухін

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКИХ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЯХ НА ЖЕСТКОМ ОСНОВАНИИ**

Проведен анализ литературных данных и нормативных документов относительно расчета температурных напряжений в асфальтобетонных слоях на жестком основании и эксплуатационного поведения таких конструкций. Реализовано уточнение определения температурных напряжений в асфальтобетонных слоях на жестком основании.

Ключевые слова: асфальтобетонный слой, цементобетонная плита, температурные деформации и напряжения, функция релаксации.

E.Dorozhko, V.Ryapuhin

**DETERMINATION OF TEMPERATURE STRESS IN THIN ASPHALT CONCRETE
COVERINGS ON A RIGID BASE**

Recently, thin layer asphalt carpet constructions on a rigid base are often used as at the reconstruction of highways as for new construction. Ensuring the reliability of such structures is not only important practical problem, but also a complex scientific problem.

The behavior of asphalt concrete layers on concrete slabs significantly different from other constructions. The purpose of thin layers of asphalt concrete rigid pavements calculation is to ensure the required reliability of road surface, pavement. To achieve this goal, a number of tasks aimed to testing and ensuring the strength and stability of thin layers of rigid pavements asphalt carpet was decided.

The article considers the scheme of the temperature structure of the combined deformation asphalt layer on a rigid base and determination of thermal stresses on the contact layer of asphalt concrete and hard ground. As the asphalt concrete layer and the cement concrete slab structurally represent one single (welded contact), so if the temperature changes they will have the same temperature deformations. Thermal stresses arise because of the temperature coefficients of linear expansion of asphalt concrete pavement and cement concrete slab are significantly different. A thin layer of asphalt concrete has an elastic modulus much less than the material of rigid base. It deforms together with cement concrete slab, almost without affecting the deformation of the last one.

Key words: thin layer of asphalt concrete, rigid base, thermal stress, temperature deformation, relaxation function.

Постановка проблеми

Одним з конструктивних рішень при капітальному ремонті і реконструкції жорстких дорожніх одягів, а також при новому будівництві жорстких основ є влаштування тонкошарового асфальтобетонного покриття, що дозволяє підвищити комфортність та безпеку руху транспортних засобів по дорозі, рівність та зчеплення, поліпшити санітарно-гігієнічні та екологічні вимоги: безпильність, зручність механічного прибирання, відведення поверхневих вод, тощо [1].

З вітчизняного досвіду експлуатації таких конструкцій, що підтверджується результатами проведеного візуального та інструментального обстеження стану дорожнього одягу на автомобільній дорозі Р-51 Харків-Красноград-Перещепіно після 5 років експлуатації [2, 3], відомо, що найбільш поширеними деформаціями і руйнуваннями асфальтобетонних покриттів є:

- розшарування (недостатнє зчеплення) асфальтобетонного шару і цементобетонної плити, що призводить до швидкого руйнування покриття;
- колійність (в основному на ділянках підйомів та спусків);
- випирання (зсув частини асфальтобетону у поперечному напрямку);

- поперечні тріщини в зоні деформаційного шва (в основному у випадку влаштування деформаційного шва в асфальтобетоні не над поперечним швом між цементобетонними плитами).

Всі перераховані деформації і руйнування виникають завдяки дії двох головних факторів: температурних напружень при зміні температури навколишнього середовища і повторних динамічних навантажень від транспортних засобів.

Температурні напруження в асфальтобетонному шарі на жорсткій основі виникають, оскільки конструктивно асфальтобетонний шар і цементобетонна плита мають омонолічений контакт, і при зміні температури комбінованої плити температурні деформації в зоні контакту шарів, незалежно від матеріалу шарів, будуть єдині. В той же час температурні коефіцієнти лінійного розширення асфальтобетону і цементобетону значно відрізняються [4, 5, 6]. Шар асфальтобетону має модуль пружності значно менший ніж матеріал жорсткої основи, тому він деформується разом з цементобетонною плитою, майже не впливаючи на деформацію останньої, та має нереалізовану температурну деформацію, що викликає температурні напруження.

Тож для розрахунку напружено-деформованого стану асфальтобетонних шарів на жорсткій основі та подальшої оцінки їх міцності необхідно визначити величину виникаючих температурних напружень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проаналізовані літературні дані та нормативні документи стосовно розрахунку асфальтобетонних шарів на жорсткій основі та безпосередньо визначенню температурних напружень в асфальтобетонних шарах [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] недостатньо враховують вплив зміни температури на виникаючі температурні напруження.

По перше: розрахунок температурних напружень в асфальтобетонних шарах виконують лише для режиму охолодження конструкції, тобто аналізу температурної тріщиностійкості при крихкому стані матеріалу. Але температурні напруження виникають також і при нагріві конструкції, отже ніяк не враховується деформації і руйнування притаманні для пластичного стану матеріалу (розшарування, колійність, зсуви, випирання).

При цьому температурні напруження поєднуються з напруженнями від зовнішнього навантаження можуть призвести до пластичних деформацій та руйнувань, оскільки при високих експлуатаційних температурах зменшуються міцність асфальтобетонного шару та міцність між шарового зчеплення асфальтобетону та цементобетону. До того ж температурний коефіцієнт лінійного розширення асфальтобетону різний для режиму нагріву та охолодження, що також варто враховувати [6].

По друге: розрахунок температурних напружень в асфальтобетонних шарах заснований на врахуванні лише відмінності коефіцієнтів температурного розширення матеріалів асфальтобетону і цементобетону, але не враховує вплив напружень від жолоблення цементобетонної плити і сил тертя-зчеплення плити по основі.

За останні роки завдяки багатьом дослідженням, проведеним на основі теорії термов'язкопружності [15, 16, 17, 18, 19], створено наукову базу для аналізу термореологічних властивостей асфальтобетону з врахуванням зміни температури. Це дозволило більш об'єктивно визначити основні закономірності реологічної поведінки асфальтобетону із врахуванням зміни температури, які варто враховувати при розрахунках температурних напружень, оскільки температурні напруження, на відміну від транспортних діють значний проміжок часу.

Основні результати дослідження

Температурне деформування спостерігається на протязі тривалого часу. За цей час змінюються температура і властивості асфальтобетону, тому виникає необхідність при розрахунку температурних напружень врахування функції релаксації напружень. Релаксація напружень це процес зменшення напружень в матеріалі, величина деформації в якому підтримується постійною. Процес релаксації полягає у розвитку в'язко-пружної деформації і «переродженні» пружною деформації в пластичну. Хоча досягнута деформація не змінюється, але внутрішня течія послаблює напругу, таким чином, що з часом потрібно все менше і менше зусилля для підтримки зразка в деформованому стані. Деформація, викликана первинною напругою після релаксації, перетворюється в залишкову, яка вже не вимагає такої

інтенсивності внутрішніх зусиль для того, щоб підтримати цю деформацію. Основним для характеристики процесу релаксації є час, протягом якого напруга спадає на певну величину.

Для визначення напружень від температурних деформацій необхідно знати характер функції релаксації для кожного типу асфальтобетону при певній температурі. По суті функція релаксації є модуль пружності асфальтобетону у певний момент часу від початку температурного деформування для заданої температури. Функція релаксації має певні граничні умови: при $t = 0$, $R(t) = E_0$ (E_0 – миттєвий модуль пружності), при $t = \infty$, $R(t) = E_\infty$, (E_∞ – довготривалий модуль пружності) [15, 19].

Температурне розширення (або стискання) асфальтобетонного шару і цементобетонної плити залежать від коефіцієнтів теплодеформативності (ТКЛР) цих матеріалів і градієнтів температур, при цьому ТКЛР асфальтобетону у декілька разів більше ніж цементобетонну.

Для прийнятої умови омоноліченого контакту асфальтобетонного шару і цементобетонної плити, при зміні температури такої комбінованої плити, температурні деформації на стику шарів, незалежно від матеріалу шарів, коефіцієнтів теплодеформативності шарів та градієнту температур, будуть однакові. При цьому асфальтобетонний шар має меншу товщину і значно менший модуль пружності ніж цементобетонна плита, тому асфальтобетонний шар вимушений деформуватися так як цементобетонна плита в основі. Тому при зміні температури комбінованої плити в асфальтобетонному шарі виникають вимушені (нереалізовані) деформації та відповідні температурні напруження.

Незважаючи на рівність температурних деформацій, напруження по низу асфальтобетонного шару і по верху цементобетонної плити будуть відрізнятися, тому що модулі пружності та реологічні властивості асфальтобетону і цементобетонну значно відрізняються.

Температурні деформації та відповідні напруження пропонується визначати за основними законами термодинаміки (теорії теплоти) та відповідних залежностей теорії пружності між деформаціями та напруженнями.

Температурні напруження в асфальтобетонному шарі необхідно визначати за величиною нереалізованої температурної деформації:

$$\sigma_{ab} = \frac{\varepsilon_{ab}^H \cdot R_{ab}^t}{(1 - \mu_{ab}^t)} \quad (1)$$

де: σ_{ab} – температурні напруження в асфальтобетонному шарі, МПа;

ε_{ab}^H – нереалізована температурна деформація асфальтобетонного шару;

R_{ab}^t – функція релаксації асфальтобетону при температурі (t), МПа;

μ_{ab}^t – коефіцієнт Пуассону асфальтобетону при температурі (t).

Нереалізована температурна деформація асфальтобетонного шару дорівнює різниці між деформацією при вільному подовженні (вільний контакт асфальтобетонного шару та цементобетонної плити) та фактичної деформації:

$$\varepsilon_{ab}^H = \varepsilon_{ab}^B - \varepsilon_{ab}^\Phi \quad (2)$$

де: ε_{ab}^B – відносна температурна деформація асфальтобетонного шару при умові вільного контакту асфальтобетонного шару та цементобетонної плити;

ε_{ab}^Φ – фактична відносна температурна деформація асфальтобетонного шару (при умові омоноліченого контакту асфальтобетонного шару та цементобетонної плити);

При умові вільного контакту асфальтобетонного шару з цементобетонною плитою відносна деформація асфальтобетонного шару дорівнює:

$$\varepsilon_{ab}^B = \alpha_{ab} \cdot \Delta t_{ab}^{cp} \quad (3)$$

де: α_{ab} – ТКЛР асфальтобетону, $^\circ\text{C}^{-1}$;

$\Delta t_{аб}^{cp}$ – зміна температури в середині асфальтобетонного шару, °С.

Якщо температура в асфальтобетонному шарі розподіляється за прямолінійним законом, що найбільш характерно для тонких асфальтобетонних шарів [4], то формула (3) матиме вигляд:

$$\varepsilon_{аб}^B = \alpha_{аб} \cdot \left(\frac{\Delta t_{аб}^B + \Delta t_{аб}^H}{2} \right) \quad (4)$$

де: $\Delta t_{аб}^B$ – температурний градієнт (зміна температури) верха асфальтобетонного шару, °С;

$\Delta t_{аб}^H$ – температурний градієнт (зміна температури) по низу асфальтобетонного шару, °С.

Оскільки, для прийнятої умови омоноліченого контакту шарів, лінійна температурна деформація асфальтобетонного шару і цементобетонної плити буде однакою, то визначити фактичну відносну температурну деформацію асфальтобетонного шару можна за деформацією цементобетонної плити:

$$\varepsilon_{аб}^{\Phi} = \varepsilon_{цб}^{\Phi} \quad (5)$$

де: $\varepsilon_{цб}^{\Phi}$ – фактична відносна температурна деформація цементобетонного шару.

При зміні температури цементобетонна плита внаслідок її монолітності матиме фактичну зміну лінійних розмірів по всій товщині плити однакою [4, 14], тоді відносна деформація цементобетонної плити дорівнює:

$$\varepsilon_{цб}^B = \alpha_{цб} \cdot \Delta t_{цб}^{cp} \quad (6)$$

Якщо температура розподіляється в плиті за законом однієї гілки параболи, що найбільш характерно [4], то:

$$\varepsilon_{цб}^B = \alpha_{цб} \cdot \left[\Delta t_{цб}^{cp*} + \frac{1}{3} \left(\Delta t_{цб}^B - \Delta t_{цб}^{cp*} \right) \right] \quad (7)$$

$$\Delta t_{цб}^{cp*} = \frac{\Delta t_{цб}^B + \Delta t_{цб}^H}{2} \quad (8)$$

де: $\Delta t_{цб}^B$ – температурний градієнт (зміна температури) верха цементобетонної плити, °С;

$\Delta t_{цб}^H$ – температурний градієнт (зміна температури) по низу цементобетонної плити, °С.

Це та відносна деформація, яка буде при вільному сковзанні плити по основі та без врахування напружень, що виникають при жолобленні плити.

При переміщенні нижньої поверхні плити по основі виникає сила тертя-зчеплення, яка заважає вільному подовженню плити (вільному температурному деформуванню плити). Середнє значення тертя в плиті [4]:

$$\tau = \rho \cdot f + 0,5 \cdot C \quad (9)$$

де: ρ – питомий тиск на підшві плиті, від ваги комбінованої плити та розрахункового автомобіля, МПа;

f – коефіцієнт тертя між цементобетонною плитою та основою;

C – коефіцієнт зчеплення цементобетонної плити та основи.

Ці сили стримують переміщення цементобетонних плит на величину [4]:

$$\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{тр}} = \frac{\tau \cdot (1 - \mu_{\text{цб}})}{E_{\text{цб}}} = \frac{(\rho \cdot f + 0,5 \cdot C) \cdot (1 - \mu_{\text{цб}})}{E_{\text{цб}}} \quad (10)$$

де: $\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{тр}}$ – величина відносної деформації цементобетонної плити, на яку затримається вільна деформація за рахунок сил тертя-зчеплення на підшві плити;

$\mu_{\text{цб}}$ – коефіцієнт Пуассона цементобетону;

$E_{\text{цб}}$ – модуль пружності цементобетону, МПа;

Від позacentрового прикладання навантаження тертя-зчеплення на підшві плит виникає напруга розтягування або стиснення в верхній площині цементобетонної плити (при підвищенні температури будуть напруження розтягування, при зниженні температури – стиснення). Ці напруження збільшують величину вільного температурного деформування поверхні цементобетонної плити (при нагрів конструкції збільшують деформації розтягу, при охолодженні збільшують деформації стиску).

Згідно з [4] напруження від позacentрового прикладання сил тертя-зчеплення на поверхні плити:

$$\sigma_{\text{цб}}^{\text{пц}} = \frac{2 \cdot P_{\text{опор}}}{B_{\text{цб}} \cdot h_{\text{цб}}} \quad (11)$$

$$P_{\text{опор}} = \frac{B \cdot L \cdot \tau}{2} \quad (12)$$

де: $P_{\text{опор}}$ – навантаження тертя-зчеплення, МПа;

$B_{\text{цб}}$ – ширина цементобетонної плити, м;

$h_{\text{цб}}$ – товщина цементобетонної плити, м;

τ – середнє значення тертя по низу цементобетонної плити, МПа;

L – довжина цементобетонної плити, м.

З урахуванням формули (11) та (12) знайдемо величину на яку збільшаться, відносні деформації верхньої площини цементобетонної плити від позacentрового прикладання сил тертя-зчеплення:

$$\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{пц}} = \frac{L \cdot (\rho \cdot f + 0,5 \cdot C) \cdot (1 - \mu_{\text{цб}})}{h_{\text{цб}} \cdot E_{\text{цб}}} \quad (13)$$

Перепад температури по товщині цементобетонної плити приводить до появи напружень жолоблення. Ці напруження також змінюють характер температурного деформування цементобетонної плити, оскільки на цементобетонну плиту діють додаткові об'ємні сили жолоблення плити. Дія цих об'ємних сил обумовлена температурним перепадом верха та низу плити та обмеженням жолоблення плити за рахунок власної ваги. Якщо температура верха цементобетонної плити більше температури низу, то у верхній зоні плити з'являється напруження стиску, за рахунок обмеження величини жолоблення від ваги плити. Якщо температура верха плити менше температури низу – навпаки напруження стиску. Ці напруження зменшать величину вільного температурного деформування поверхні цементобетонної плити (при нагрів конструкції зменшують деформації розтягу, при охолодженні зменшують деформації стиску).

Розподіл температури в плиті приймемо за законом однієї гілки параболі. В своїй роботі Л.І. Горєцький [4] отримав для плит наступні значення напружень на поверхні цементобетонної плити:

$$\sigma_{\text{цб}}^{\text{ж}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_{\text{цб}} \cdot E_{\text{цб}}}{(1 - \mu_{\text{цб}})} \cdot (t_{\text{цб}}^{\text{в}} - t_{\text{цб}}^{\text{н}}) \cdot m \quad (14)$$

де: $\alpha_{цб}$ – ТКЛР цементобетону, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 $E_{цб}$ – модуль пружності цементобетону, МПа;
 $\mu_{цб}$ – коефіцієнт Пуассона цементобетону;
 $t_{цб}^в$ – температура вверху цементобетонної плити, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{цб}^н$ – температура низу цементобетонної плити, $^{\circ}\text{C}$;
 m – коефіцієнт міри напруженості ($0 < m < 1$).

$$m = 117,5 \cdot \frac{L^2}{E_{цб} \cdot h_{цб} \cdot t_n} \quad (15)$$

де: L – довжина плити, см;
 $E_{цб}$ – модуль пружності цементобетону, МПа;
 $h_{цб}$ – товщина цементобетонної плити, см;
 t_n – температурний перепад, $^{\circ}\text{C}$.

Якщо за розрахунком $m > 1$, це свідчить про повну затримку деформації жолоблення (при $m > 1$ у формулу (14) необхідно підставляти $m = 1$).

Температурні напруження жолоблення позначаються на загальній величині відносних деформацій верхньої площини плити, які можна знайти згідно з [4]:

$$\varepsilon_{цб}^ж = \frac{2}{3} \cdot \alpha_{цб} \cdot (t_{цб}^в - t_{цб}^н) \cdot m \quad (16)$$

Підсумкове фактичне температурне деформування поверхні цементобетонної плити з врахуванням дії сил тертя-зчеплення по підшві плити та напружень жолоблення:

$$\varepsilon_{цб}^ф = \varepsilon_{цб}^в - \varepsilon_{цб}^{тр} + \varepsilon_{цб}^{пц} - \varepsilon_{цб}^ж \quad (17)$$

Температурні напруження в асфальтобетонному шарі на жорсткій основі, з врахуванням вище викладеного пропонується розраховувати за наступною формулою:

$$\sigma_{аб} = \frac{R_{аб}^t}{(1 - \mu_{аб}^t)} \cdot \left[\alpha_{аб} \cdot \left(\frac{\Delta t_{аб}^в + \Delta t_{аб}^н}{2} \right) - \left(\left(\alpha_{цб} \cdot \left[\Delta t_{цб}^{ср} + \frac{1}{3} (\Delta t_{цб}^в - \Delta t_{цб}^{ср}) \right] \right) - \left(\frac{(\rho \cdot f + 0,5 \cdot C) \cdot (1 - \mu_{цб})}{E_{цб}} \right) + \left(\frac{L \cdot (\rho \cdot f + 0,5 \cdot C) \cdot (1 - \mu_{цб})}{h_{цб} \cdot E_{цб}} \right) - \left(\frac{2}{3} \cdot \alpha_{цб} \cdot (t_{цб}^в - t_{цб}^н) \cdot m \right) \right] \quad (18)$$

Висновки

1. Температурні напруження в асфальтобетонних шарах на жорсткій основі виникають як при нагріві, так і при охолодженні конструкції, тож і оцінку міцності таких конструкцій варто виконувати для режиму нагріву та режиму охолодження.

2. Оскільки ТКЛР асфальтобетону відрізняється для режиму нагріву та охолодження [6], при розрахунку вільної температурної деформації асфальтобетону варто враховувати нагрівається чи охолоджується конструкція.

3. Дія сил тертя-зчеплення по підшві плити та напружень жолоблення змінюють вільне деформування цементобетонної плити, що позначається на температурному деформуванні асфальтобетонного шару і відповідних температурних напружень та варто враховувати при розрахунку.

1. ВБН В.2.3–218–532:2007 Влаштування тонкошарових покриттів на автомобільних дорогах державного значення.

2. Капітальний ремонт автомобільної дороги Харків-Красноград-Перещепине на ділянці км 11+000 – км 74+800: Робочий проект– 3418-3427. – Харків: Харківдіпрошлях, 2006.
3. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести дослідження та розробити конструкції дорожніх одягів з асфальтобетонними шарами армованими геосинтетичними сітками». Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна» (ДП «ДерждорНД») Київ 2013.
4. Горецкий Л.И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия / Л.И. Горецкий – М.: Транспорт, 1965. – 284 с.
5. Богуславский, А. М. О деформативной способности асфальтобетона при охлаждении Текст. / А. М. Богуславский // Труды ХАДИ, вып.26. -Харьков, 1961. – С. 81-90.
6. Ряпухін В.М., Дорожко Є.В. Експериментальне визначення чисельного значення температурного коефіцієнта лінійного розширення асфальтобетону. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, НТУ. – 2013. - №89. – С. 61-71.
7. ВСН 197-91 Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд / Минтрансстрой СССР. М., 1992 – 83 с.
8. ТКП 45-3.03-244-2011 (02250) Автомобильные дороги. Дорожные одежды жесткого типа. Минск 2012.
9. Афиногенов О.П. Проектирование жестких дорожных одежд / О.П. Афиногенов. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. – 227 с.
10. ВБН В.2.3-218-008-97 Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів.
11. Чернигов В.А., Субботина И.В. Расчет конструкций асфальтобетонных покрытий на бетонных основаниях по двум предельным состояниям. – Труды Союздорнии: Вып. 47. М., 1971. – С. 171-189.
12. Рекомендации по назначению толщины асфальтобетонных покрытий с добавками резиновой крошки на жестких основаниях. Научно-производственное объединение "Дорстройтехника". Минск 1990.
13. Гладких А.С. Снижение температурных напряжений в асфальтобетонных покрытиях жестких дорожных одежд за счет регулирования деформативных свойств материала основания: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / А.С. Гладких. – Москва, 2010. – 24 с.
14. Баловнева И.И. Повышение трещиностойкости асфальтобетона при усилении аэродромных покрытий/ И.И. Баловнева, Ю.П. Волков// Труды государственного проектно – изыскательского и научно – исследовательского института (Аэропроект). Выпуск №18.- Москва, 1975.- с.46.
15. Іщенко О. М. Розробка методики розрахунку на температурну тріщиностійкість асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.11 / Іщенко Олексій Максимович. – К., 2003.– 180 с.
16. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: дис.... доктора техн. наук: 05.22.11 / Мозговой Владимир Васильевич – К., 1986.– 330 с.
17. Богуславский А.М. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А.М. Богуславский. – М.: Высшая школа, 1972. – 199 с.
18. Мозговий В. В., Шевчук О.О. Залежність термо-в'язко-пружних характеристик асфальтобетону від його складу // Вісник транспортної академії України та Українського транспортного університету. – 1999.- №3.
19. Телтаев Б.Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов // Дорожная техника. 2010. – С. 130-137.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2014.