

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ІЗ ЩЕБЕНЕВО-МАСТИКОВОГО АСФАЛЬТОБЕТОНУ

Баран С.А., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, baran_serg@ukr.net, orcid.org/0000-0002-3591-9880

Куцман О.М., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, kutsmans@ukr.net, orcid.org/0000-0002-6751-6592

Гринчак І.І., Національний транспортний університет, Київ, Україна, ilonaborovyk@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8382-3824

FORECASTING THE DURABILITY OF ROAD COVERING MADE OF STONE-MASTIC ASPHALT CONCRETE

Baran S.A., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, baran_serg@ukr.net, orcid.org/0000-0002-3591-9880

Kutsmans O.M., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine, kutsmans@ukr.net, orcid.org/0000-0002-6751-6592

Hrynychak I.I., National Transport University, Kyiv, Ukraine, ilonaborovyk@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8382-3824

Постановка проблеми. На даний час в Україні як і в усьому світі найпоширенішим покриттям доріг та вулиць є асфальтобетонне, завдяки своїм перевагам, що проявляються під час будівництва, експлуатації і ремонту. Асфальтобетон відноситься до універсальних композитів з досить широкою можливістю направленою регулювання властивостей. Такі покриття за даними Б.С. Радовського [1] складають близько 95% від загальної протяжності доріг з твердим покриттями капітального типу.

Над створенням асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності останні десятиліття працювали вчені багатьох країн отримавши ряд передових розробок. До таких розробок відноситься щебенево-мастиковий асфальтобетон (далі ЩМА) – один із сучасних прогресивних різновидів асфальтобетону, що найкраще відповідає вимогам до матеріалів покриття автомобільних доріг і вулиць з важким та інтенсивним рухом. Однак щебенево-мастикове асфальтобетонне покриття нерідко передчасно руйнується, що погіршує безпеку руху і призводить до значних витрат на ремонт. Це пояснюється відносно невеликим досвідом його застосування у вітчизняній практиці, що потребує (з більш детальним урахуванням кліматичних умов України) удосконалення методики розрахунку конструкцій дорожнього одягу, проектування складу щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші і контролю якості її виготовлення та застосування. Руйнування проявляються різною мірою в залежності від багатьох факторів (рецептурно-технологічні параметри, навантаження, час його дії, температура, та ін.). Тому актуальним питанням є прогнозування довговічності дорожнього покриття із щебенево-мастикового асфальтобетону на стадії проектування конструкції дорожнього одягу з урахуванням комплексу найбільш вагомих факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню довговічності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу присвячено значний перелік робіт багатьох відомих вчених. Було встановлено основні чинники та виявлено закономірності впливу складу асфальтобетону та властивостей компонентів, а також параметрів конструкції дорожнього одягу, що впливають на довговічність покриття. У цих дослідженнях, опираючись на основні положення механіки твердого деформованого тіла, розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану дорожніх одягів як багатошарового на півпростору, інженерні методики розрахунків, а також критерії граничного стану.

Щебенево-мастикові асфальтобетонні суміші були розроблені в Німеччині у 60-і роки прошлого століття, ґрунтуючись на результатах ключових досліджень Ж. Зіхнера і опирались, головним чином, на емпіричні підходи [3-4].

Щебенево-мастиковий асфальтобетон – характеризується підвищеною зносостійкістю, наявністю міцного щебеневого каркасу дозволяє влаштувати з нього шари покриття меншої товщини без зниження загального модуля пружності і, як правило, із збільшеним терміном служби покриття та поліпшеними експлуатаційними показниками.

Як свідчать літературні дані [2-4] щебенево-мастикові асфальтобетонні суміші набули великої популярності, що є наслідком їх високих експлуатаційних характеристик та надійності. Основними перевагами ЩМА є: шорстка текстура поверхні, що забезпечує достатнє зчеплення колеса з покриттям; висока зсувостійкість при високій літній температурі; висока зносостійкість покриття; тріщиностійкість при впливі коливань температури і транспортних навантажень за рахунок кращих деформативних і міцності властивостей; стійкість до старіння, морозостійкість, водостійкість, зниження ймовірності аквапланування та зменшення шуму. Щебенево-мастикове асфальтобетонне покриття нежорсткого дорожнього одягу влаштовують при необхідності стійкості покриття до виникнення пластичної колії із-за високих транспортних навантажень, а також при необхідності влаштування дорожніх покриттів з ЩМАС з різними специфікаціями по шарах для забезпечення різних функціональних і структурних умов руху транспорту по смугах руху.

В Україні за останні роки також проводились дослідження, направлені на підвищення технологічності та довговічності ЩМА, захищено ряд дисертаційних робіт, здійснюється моніторинг на державному рівні (ДерждорНДІ) за станом застосування нових матеріалів і технологій у тому числі і використання ЩМА.

Під час експлуатації на покриття впливає ряд несприятливих факторів, що діють як окремо так і спільно, їх умовно ділять на дві групи:

- циклічні тимчасові та довготривалі навантаження від транспорту, що викликають складний несприятливий напружено-деформований стан покриття;
- вплив факторів зумовлених атмосферними явищами (коливання температури, атмосферні опади, перемінне заморожування-відтавання води в порах і ушкоджених місцях, вплив агресивних середовищ в результаті потрапляння на покриття соляних розчинів, паливо-мастильних матеріалів та ін.).

На довговічність асфальтобетонного покриття значно суттєвий вплив чинить транспортне навантаження, про що свідчить аналіз експериментальних досліджень в роботах [5-7].

В ряді робіт відмічається вихід з ладу покриття із ЩМА на дорогах України що проявляється наступними видами руйнувань і деформацій поперечні і поздовжні тріщини, сітка тріщин, напливи, зсуви, хвилі, що зумовлені різними причинами [8-12].

Сучасні підходи до проектування дорожнього покриття ґрунтуються на двох основних складових. Спочатку виконується конструювання тобто вибираються різновиди матеріалів шарів та раціональне їх розміщення таким чином, щоб найкраще використати механічні і теплофізичні властивості матеріалів і забезпечити довговічність, технологічність та економічність як конструкції всього дорожнього одягу так і покриття [13]. На основі цього намічають декілька варіантів конструкцій для розрахунку. Після конструювання виконується розрахунок розроблених варіантів конструкцій асфальтобетонного покриття на міцність від дії транспорту [13]. з наступним вибором найбільш раціонального варіанту для даного об'єкту будівництва на основі техніко-економічного обґрунтування. Задача розрахунку полягає у визначенні товщини шарів дорожнього одягу у варіантах, намічених при конструюванні, або у виборі матеріалів з відповідними деформаційними характеристиками і характеристиками міцності шарів при заданих товщинах.

Розрахунок дорожнього одягу на міцність за існуючим нормативом заснований на наступних передумовах: а) напружено-деформований стан дорожнього одягу під дією навантаження описується рішеннями лінійної теорії пружності для шаруватого півпростору з урахуванням умов сполучення шарів на контактах; сили інерції через їх малість у розрахунку не враховуються (задача квазістатична); б) граничний стан дорожнього одягу характеризується показниками, які залежать від властивостей матеріалу кожного шару дорожнього одягу і ґрунту земляного полотна, а також від їхнього розміщення й умов роботи в конструкції.

Відповідно до [13, 14] розрахунок дорожніх одягів виконується за трьома критеріями граничного стану - пружному прогині дорожнього одягу під навантаженням, опорі згину монолітних шарів і опорі зсуву ґрунтів і шарів з мало зв'язних матеріалів.

Розробкою основ теорії розрахунку дорожнього одягу, та розв'язанням задач теорії пружності з визначення напружень і деформацій займалися Б.І. Коган, А.М. Кривіський, А.К. Приварніков, Ю.А. Шевляков, А.К. Біруля, В.Є. Вереженко, В.Г. Піскунов, О.О. Рассказов, Б.С. Радовський, В.В. Плевако, В.Й. Заворицький, А.Г. Булавко, К.С. Теренецький та ін. В основу методів визначенні напружено-деформованого стану покладені розрахункові схеми пружного ізотропного шаруватого напівпростору. Також слід відмітити, що в останні роки у багатьох дослідженнях значна увага приділена застосуванню методу скінченних елементів з використанням сучасних програмних комплексів. У сучасних дослідженнях приділяють велику увагу врахуванню термо-реологічних

властивостей асфальтобетону, що дозволяє точніше прогнозувати довговічність покриття, прогнозувати колійність та ін. [5, 6, 15, 17].

Аналіз особливостей поведінки дорожнього одягу та врахування в'язких властивостей матеріалів займалися такі вчені: А.А. Іноземцев, М.Б. Корсунський, В.В. Мозговий, О.Т. Батраков, С.І. Міхович, М.І. Волков, Л.Б. Гезенцвей, В.О. Золотарьов, А.В. Руденський, О.М. Богуславський, Г.К. Сюньї, А.О. Салль, та ін. досліджено зміну міцнісних і деформаційних властивостей характеристик матеріалу в залежності від температури на довговічність та на характер напружено-деформованого стану від зміни температури. У роботі [18] Б.С. Радовським отримано аналітичні рішення для розв'язку змішаної задачі теорії пружності і дискретного розподілення напружень, визначено напруження і деформації тришарової комбінованої конструкції в умовах плоскої задачі та в умовах вісесиметричної просторової задачі, вивчено вплив швидкості руху автомобіля на напруження в ґрунті земляного полотна, отримана залежність для визначення горизонтальних нормальних розтягуючих напружень і-го шару багатошарового в'язко-пружного напівпростору. В подальших дослідженнях Б.С. Радовського А.С. Супруна В.В. Мозгового та інших дослідників [16, 19, 20] була показана можливість застосування методу квазіпружної апроксимації, що дозволяє використовувати відомі рішення теорії пружності, наприклад, точне рішення А.К. Приварникова для шаруватого пружного напівпростору. У квазіпружному методі в'язкопружне рішення виходить із пружного рішення заміною всіх пружних характеристик матеріалу відповідними функціями релаксації і функціями повзучості. При цьому доцільно користуватися взаємозв'язком між функцією повзучості і релаксації, отриманим як на основі точного рішення. Ґрунтуючись на математичних аспектах цього методу, а також на результатах, отриманих Шепері при його застосуванні, можна вважати, що в більшості випадків точність методу цілком задовольняє звичайним інженерним вимогам. Тому в різних дослідженнях застосовувались використання точного рішення теорії пружності для багатошарового напівпростору отриманого проф. А.К. Приварниковим. Так в деяких дослідженнях [11] використовуючи даний метод, було досліджено напружено-деформований стан багатошарового напівпростору, були знайдені і апроксимовані функції для визначення горизонтальних нормальних розтягуючих напружень на підшві та на поверхні асфальтобетонного шару.

На основі проведених досліджень був створений потужний розрахунковий апарат, що дає можливість розраховувати напружено-деформований стан шаруватих систем, до яких відноситься і дорожній одяг. Однак незважаючи на широкомасштабні дослідження в даному напрямку до цього часу не розроблено, як методу, так і жодного нормативного документу стосовно розрахунку щebeneво-мастикового асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням комплексної дії впливових факторів.

Мета роботи – розроблення концепції прогнозування довговічності дорожнього покриття із щebeneво-мастикового асфальтобетону з урахуванням комплексної дії вагомих факторів.

Викладення основного матеріалу досліджень.

У дослідженнях прийнята робоча гіпотеза, яка полягає у наступному.

Довговічність покриття із ЩМА визначається, головним чином, його стійкістю до порушення суцільності у результаті негативної спільної дії найбільш впливових факторів: транспортне навантаження, усадка покриття від зниження температури при її коливанні, усадка покриття від «старіння» бітумного в'язучого (окислення, полімеризація, поліконденсація, випаровування та інфільтрація легких фракцій в'язучого в мікропори і макротріщини мінерального матеріалу), водоморозні впливи, розшарування асфальтобетонної суміші при порушенні рецептурно-технологічних параметрів, недостатнє зчеплення з нижнім шаром. При цьому допускається, що стійкість до розшарування асфальтобетонної суміші буде забезпечена при дотриманні вимог до рецептурно-технологічних параметрів чинних нормативних документів. Стійкість ЩМА до пластичних деформацій буде забезпечена дотриманням вимог чинних нормативних документів.

Прийнято, що найбільш вагомими факторами, які впливають на довговічність покриття із ЩМА, є горизонтальні нормальні розтягуючі напруження від дії транспорту, розтягуючі напруження від температурної усадки у результаті циклічних понижень температури та від усадки «старіння» бітумного в'язучого, пошкодження структурних зв'язків від водо-морозних впливів.

При цьому поставлену задачу вирішували в детермінованій постановці використовуючи феноменологічний підхід, щebeneво-мастиковий асфальтобетон розглядали як ізотропний квазіоднорідний матеріал. Запропоновано критерій граничного стану покриття із ЩМА з урахуванням термо-реологічних властивостей ЩМА, використовуючи положення кінетичної теорії міцності твердих тіл і базуючись на принципах Пальгрейна-Майнера та Бейлі про суперпозицію

пошкодженнь структури матеріалу протягом строку експлуатації як суму пошкодженостей структури при негативній спільній дії найбільш впливових факторів

$$M = M_{Tp} + M_{yT} + M_{yC} + M_{BMP3} \leq 1, \quad (1)$$

де M_{Tp} – міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від дії транспорту;

M_{yT} – міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від температурної усадки;

M_{yC} – міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від усадки «старіння» бітумного в'язучого;

M_{BMP3} – міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від водо-морозних впливів.

У даному випадку під пошкодженістю ЩМА, згідно існуючих загальних положень, приймається формальне кінетичне поняття незворотних розривів структурних зв'язків у матеріалі за часом при визначеному характері впливу факторів і оцінюється відносним параметром, який називають мірою пошкодженості, що за фізичною суттю є мірою вичерпування довговічності.

Дослідження довговічності ЩМА покриття проводили з урахуванням дії найбільш впливових факторів, що спричиняють появу розтягуючих напружень та їх розтріскування, а саме: горизонтальні нормальні напруження при дії транспортного навантаження та коливанні температури.

На щобеневі-мастикове асфальтобетонне покриття діє колісне навантаження, яке викликає поверхневі розтягуючі напруження, які разом з температурними напруженнями створюють загальний напружений стан.

Визначення напружень в шаруватому в'язкопружному напівпросторі при русі транспортних засобів для оцінки тріщиностійкості ЩМА є одним з основних факторів для оцінки його довговічності. Одним із перших, хто повністю вирішив задачу визначення тензора напружень шаруватого в'язкопружного напівпростору, був проф. Б.С. Радовський. Він розглянув задачу визначення напружень і переміщень в нежорсткому дорожньому одязі, як у шаруватому в'язкопружному безінерційному напівпросторі з довільним кінцевим числом ізотропних та однорідних шарів [18, 21].

В результаті були отримані залежності для визначення горизонтальних нормальних розтягуючих напружень i -го шару багат шарового в'язкопружного безінерційного напівпростору. Однак використання отриманих аналітичних залежностей для визначення розтягуючих нормальних напружень є досить проблематичним, зважаючи на велику громіздкість формули, і виключає можливість широкого використання її для інженерних розрахунків. Тому було запропоновано використання квазіпружного методу апроксимації при застосуванні точного рішення пружного напівпростору. В цьому випадку в'язкопружне рішення виходить із пружного рішення заміною всіх пружних характеристик матеріалу відповідними функціями релаксації та функціями повзучості. При цьому доцільно користуватися взаємозв'язком між функцією повзучості та релаксації, отриманим на основі точного рішення.

Грунтуючись на математичних аспектах цього методу, а також на результатах, отриманих Шепері і Сімсом при його застосуванні, можна вважати, що у більшості випадків точність методу цілком задовольняє інженерним вимогам.

У виразі (1) міру вичерпування довговічності покриття із ЩМА від дії транспорту (з урахуванням загальновідомого підходу при циклічній дії напружень) визначалася за виразом 2.

$$M_{TP} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\sum N_p(t, \sigma_n)}{[N_p(\sigma_n)]} + 2 \cdot \frac{\sum N_p(t, \sigma_n)}{[N_p(\sigma_n)]} \right), \quad (2)$$

де $\sum N_p(t, \sigma)$ – сумарна інтенсивність прикладання розрахункового навантаження в i -тий період року, на момент часу експлуатації t при дії відповідно розтягуючого горизонтального нормального напруження при згині у нижній частині покриття σ_n та розтягуючого горизонтального нормального напруження при згині у верхній частині покриття σ_n ;

$[N_p(t, \sigma)]$ – гранично допустима кількість прикладання розрахункового навантаження, що може витримати асфальтобетонне покриття в i -тий період року при дії відповідно розтягуючого горизонтального нормального напруження при згині у нижній частині покриття σ_n та розтягуючого

горизонтального нормального напруження при згині у верхній частині покриття σ_n (встановлюються на основі експериментальних даних);

m – кількість характерних i -тих періодів року з близькими кліматичними умовами.

При виборі розрахункової схеми роботи щебенево-мастикового асфальтобетонного шару нежорсткого дорожнього одягу з точки зору його тріщиностійкості виходили з найбільш несприятливих для нього умов появи горизонтальних нормальних розтягуючих температурних напружень при зміні температури та від впливу дії транспортних напружень і клавішного ефекту, які виникають у верхній і нижній частині шару.

Також, брали до уваги дані багатьох дослідників про те, що основною причиною утворення температурних тріщин в асфальтобетонному покритті є напруження від дії транспорту та температурні розтягуючі напруження, що виникають в результаті невірного скорочення розмірів покриття при його охолодженні.

Розтягуючі горизонтальні нормальні напруження при згині у нижній частині покриття σ_n та розтягуючі горизонтальні нормальні напруження при згині у верхній частині покриття σ_n визначаються на основі аналітичних розрахунків з урахуванням схеми роботи щебенево-мастикового асфальтобетонного покриття при дії транспортного навантаження згідно рисунку 1.

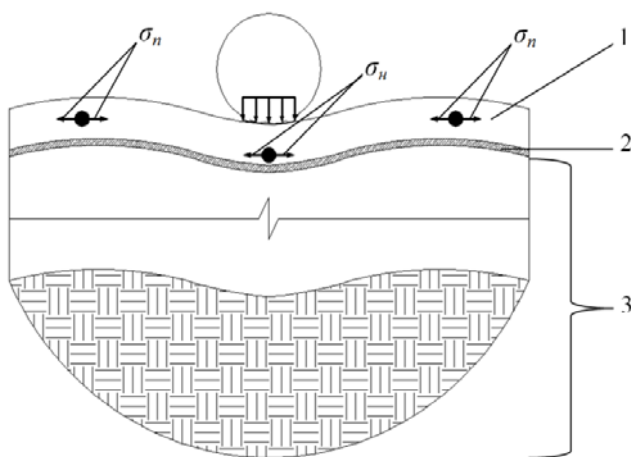


Рисунок 1 – Схема роботи щебенево-мастикового асфальтобетонного покриття при дії транспортного навантаження: 1 – щебенево-мастикове асфальтобетонне покриття; 2 – прошарок, що з'єднує щебенево-мастикове асфальтобетонне покриття з нижніми шарами; 3 – нижні шари конструкції дорожнього одягу та ґрунт земляного полотна

Figure 1 – Scheme of operation of stone-mastic asphalt concrete coating under the action of traffic load: 1 – stone-mastic asphalt concrete coating; 2 – a layer connecting the stone-mastic asphalt concrete coating with the lower layers; 3 – the lower layers of the road surface structure and subgrade soil

Міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від температурної усадки (M_{yT}) може бути визначена за аналітичними залежностями Радовського-Мозгового, що базуються на застосуванні критерію Бейлі, модифікованої функції довговічності Бартенева [16]:

$$M_{yT} = \int_0^t \frac{dt}{t^*(\sigma_T(t), T(t))}, \quad (3)$$

де t – момент часу експлуатації покриття;

$t^*(\sigma_T(t), T(t))$ – функція довговічності ЩМА;

$\sigma_T(t)$ – тепературні напруження;

$T(t)$ – температура покриття.

При визначенні температурних напружень були використані основні положення теорії термо-в'язко-пружності на базі вихідних співвідношень Больцмана-Вольтера, що зв'язують між собою напруження, деформацію, час і температуру на основі методології, розробленої в НТУ [16, 21]:

$$\sigma_T(t) = \int_0^t R(\xi(t) - \xi(\tau)) d\varepsilon_T(\tau), \quad (4)$$

$$\xi(t) = \int_0^t [a_T(T(t), Q)]^{-1} dt, \quad (5)$$

де: $\varepsilon_T(\tau) = (\varepsilon_T^1(\tau) + \varepsilon_T^2(\tau) + \varepsilon_y^1(\tau) + \varepsilon_y^2(\tau))$ – відносна деформація; R – функція релаксації; t – момент часу, для якого визначається напруження; τ – момент часу, що передує t ; ξ – час, наведений на підставі температурно-часової аналогії (ТВА) до тієї температури Q , при якій експериментально встановлюються параметри функції релаксації $R(t)$; a_T – функція ТВА; ε_T^1 – нереалізована температурна деформація покриття; ε_T^2 – деформація покриття, викликана температурними змінами довжини плит тріщинувато-блочної основи; ε_y^1 – нереалізована деформація покриття при його тривалій незворотній усадці; ε_y^2 – деформація покриття, викликана тривалою незворотною усадкою плит тріщинувато-блочної основи.

Асфальтобетонне покриття розглядалось як горизонтальний суцільний шар товщиною h , розташований на квазісуцільній основі, а матеріал покриття володіє в'язкопружними властивостями і є термореологічно простим тілом.

Визначальний зв'язок між поздовжніми напруженнями σ_T і деформаціями ε_T покриття як в'язкопружного термореологічно простого матеріалу описувався відомим в теорії термов'язкопружності [16, 21] інтегральним співвідношенням Больцмана-Вольтера:

$$\sigma_T(t) = \int_0^t R(\xi(t) - \xi(\tau)) d\varepsilon_T(\tau), \quad (6)$$

де R – функція релаксації; t – момент часу, для якого визначається напруження; τ – момент часу, що передує t ; $\xi(t)$ і $\xi(\tau)$ – наведений час відповідно для моментів t і τ , яке відповідно до принципу температурно-часової аналогії визначається виразом:

$$\xi(t) = \int_0^t \frac{dt}{a_T(T(t), Q)}, \quad \xi(\tau) = \int_0^\tau \frac{d\tau}{a_T(T(\tau), Q)}, \quad (7)$$

де $a(T, Q)$ – функція температурно-часового зсуву, що показує у скільки разів "прискорюється" хід часу для деформування при постійній базовій температурі Q в порівнянні з деформацією при постійній температурі T (якщо $Q > T$).

Завдання полягає у визначенні поздовжнього горизонтального нормального напруження $\sigma_T(t)$ в покритті в будь-який момент часу при різних закономірностях зміни його температури $T(t)$ з властивостями матеріалу покриття, що характеризується функцією релаксації $R(t)$.

Відповідно до закону температурного деформування зміни середньої по товщині покриття температури T від її початкового значення $T(\tau = 0)$ до значення $T(\tau)$ в певний момент τ відповідає нереалізована відносна деформація:

$$\varepsilon_T(\tau) = \alpha [T(\tau = 0) - T(\tau)], \quad (8)$$

що відповідає напруженню, яке визначається рівністю (6). Після диференціювання обох частин рівності (8) по τ і підстановки результатів в (6) можна записати для довільної безперервної закономірності температури $T(t)$ вираз для температурного напруження в момент t :

$$\sigma_T(t) = -\alpha \int_0^t R(\xi(t) - \xi(\tau)) \frac{dT(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (9)$$

причому розтягуюче напруження вважаємо позитивним.

На прикладі лінійної зміни температури в часі при її зниженні зі швидкістю K після перетворень вираз для температурних напружень при поданні $R(t)$ в формі модифікованого степеневого закону матиме вигляд:

$$\sigma_T = -\alpha H K t - \alpha K (B - H) \int_0^t \frac{d\tau}{[1 + \psi(t) - \psi(\tau)]^m}, \quad (10)$$

$$\text{де: } \psi(t) = \frac{1}{pKr} e^{p(T_0 - Q + Kt)}, \quad \psi(\tau) = \frac{1}{pKr} e^{p(T_0 - Q + K\tau)};$$

У цих формулах: r , m , B і H – параметри функції релаксації в формі модифікованого степеневого закону, причому останні два з них мають сенс відповідно миттєвого і тривалого модулів пружності.

При дослідженні довговічності асфальтобетонного покриття одним із впливових факторів ряд дослідників вважають негативний вплив від усадки «старіння» бітумного в'язучого. Так Літлфілд [22], вивчаючи температурні деформації асфальтобетонів при циклічному охолодженні – нагріванні виявив значну їх усадку, яку він пояснив випаровуванням легких фракцій з бітуму. Ю. Є. Нікольський також показав [23], що при циклічній зміні температури в асфальтобетоні проявляються залишкові деформації. Накопичення залишкових деформацій при низьких температурах Ю.Н. Нікольський і А.М. Большухін [24] пояснюють доущільненням асфальтобетону при охолодженні.

Усадка в асфальтобетонах, пов'язана з формуванням у бітумах надмолекулярних структур, викликає в покриттях, які не мають можливості вільно переміщатися, усадочні напруження. Так, при випробуванні в установці «УОНДА-1420» заземленого по кінцях зразка асфальтобетону на бітумі марки БНД 60/90 при його термоциклюванні в інтервалі температур від 5 до -20 °С було виявлено виникнення зростаючих усадочних напружень [29, 31].

Міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від усадки «старіння» бітумного в'язучого (M_{VC}) виразу (1) встановлюється за наступною розробленою методикою.

Напруження від усадки «старіння» бітумного в'язучого (M_{VC}) на момент часу експлуатації покриття t визначалися за виразом 11:

$$\sigma_{vc}(t) = \int_0^t R(t' - \tau') d\varepsilon_{vc}(t), \quad (11)$$

де $R(t' - \tau')$ – функція релаксації ЩМА;

(t', τ') – відповідно приведений (згідно з принципом температурно-часової аналогії) час спостереження та час, який передуює моменту спостереження;

$\varepsilon_{vc}(t)$ – відносна деформація ЩМА від усадки «старіння» бітумного в'язучого у часі, що встановлюється на основі експериментальних даних.

Лабораторні дослідження, проведені в БашНДІ НП [25, 26] дозволили встановити математичну залежність для розрахунку лінійної усадки асфальтобетону, яку запропоновано інтерпретувати у вигляді:

$$\varepsilon_{vc}(t) = \kappa \log_2(t+1) - 0,003 (t - 9)^3 + 0,0243, \quad (12)$$

де $\varepsilon_{vc}(t)$ – лінійна усадка асфальтобетону, %;

t – число циклів охолодження – нагрівання;

κ – коефіцієнт, що залежить від температурного інтервалу (встановлюється експериментально).

З урахуванням виразу (3) та зміни у часі температури покриття $T(t)$ визначається міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від усадки «старіння» бітумного в'язучого:

$$M_{VC} = \int_0^t \frac{dt}{t^*(\sigma_{vc}(t), T(t))}, \quad (13)$$

де $t^*(\sigma_{vc}(t), T(t))$ – функція довговічності ЩМА.

Міра вичерпування довговічності покриття із ЩМА від водоморозних впливів M_{BMP3} виразу (1) визначається за розробленою методикою, суть якої полягає у наступному.

На основі експериментально встановленої залежності міцності на розтяг ЩМА від кількості циклів водоморозних впливів $R_p=f(N_{BMP3})$ згідно з принципом лінійного підсумовування міри вичерпування довговічності значення $M(N_{BMP3})$ встановлюється за наступною залежністю:

$$M(N_{BMP3}) = 1 - M(\sigma(t)), \quad (14)$$

де $M(\sigma(t))$ – міра вичерпування довговічності ЩМА в експерименті при встановленні $R_p=f(N_{BMP3})$ для заданого режиму зміни розтягуючих напружень $\sigma(t)$.

Висновки.

Дослідженню довговічності асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу присвячено значний перелік робіт багатьох відомих вчених які встановили основні чинники та виявлено закономірності впливу складу асфальтобетону та властивостей компонентів, а також параметрів конструкції дорожнього одягу, що впливають на довговічність покриття. У цих дослідженнях, опираючись на основні положення механіки твердого деформівного тіла, розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану дорожніх одягів як багатошарового напівпростору, інженерні методики розрахунків, а також критерії граничного стану. У сучасних дослідженнях приділяють велику увагу врахуванню термо-реологічних властивостей асфальтобетону, що дозволяє точніше прогнозувати довговічність покриття.

Застосування ЩМА у вітчизняній практиці досить часто характеризується не достатньою довговічністю.

Існуючий вітчизняний нормативний метод проектування дорожніх одягів не достатньо повно враховує спільну дію транспортних засобів та коливання температури, а також дію інших впливових факторів на довговічність покриття.

Прийнята робоча гіпотеза: довговічність покриття із ЩМА визначається, головним чином, його стійкістю до порушення суцільності у результаті негативної спільної дії найбільш впливових факторів: транспортне навантаження, усадка покриття від зниження температури при її коливанні, усадка покриття від «старіння» бітумного в'язучого, водо-морозні впливи, розшарування асфальтобетонної суміші при порушенні рецептурно-технологічних параметрів, недостатнє зчеплення з нижнім шаром. Стійкість ЩМА до пластичних деформацій буде забезпечена дотриманням вимог чинних нормативних документів.

Розроблено критерій граничного стану покриття із ЩМА, який враховує термо-реологічні властивості ЩМА, із застосуванням положення кінетичної теорії міцності твердих тіл і базується на принципах Пальгрейна-Майнера та Бейлі про суперпозицію пошкоджень структури матеріалу протягом строку експлуатації при негативній спільній дії найбільш впливових факторів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Радовский Б.С. Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу Суперпейв // Дорожная техника. – 2007. – С. 28-41.
2. Ш. Шульц Технология щебеночно-мастичного асфальта, CFF GmbH & Co/ KG.
3. Юрген Хученройтер, Томас Вернер Щебеночно-мастичный асфальтобетон: основные понятия, структура, состав, свойства, опыт применения. Автомобильные дороги, №4, 2002, С. 40-42.
4. Krzystov Blazejowski. SMA. Teoria I praktyka. 2007.]

5. Онищенко А.М. Теоретичні основи розрахунку асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах та методи підвищення колієстійкості: Дис. докт. техн. наук: 05.22.11 – К., 2017.– 434 с.
6. Густелев О. О. Підвищення довговічності нежорсткого дорожнього одягу з поперечними тріщинами в асфальтобетонному покритті –Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. // дис... канд. техн. наук : 05.22.11 / Густелев Олександр Олександрович., Нац. транспортний ун-т.– Київ :, 2019.– 199 с.
7. Кузло М.Т., Бондар В.М., Підвищення стійкості щебенево-мастикового асфальтобетонного покриття до дії транспортних засобів на ухилах доріг і вулиць // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2019.
8. Баран С.А., Мозговий В.В., Ольховий Б.Ю. Підвищення однорідності щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. збірник. Київ. 2016. Вип. 96. С.33-42.
9. Гуляев В.І., Мозговий В.В., Гайдачук В.В., Густелев О.О., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатощарових дорожніх покриттів // Монографія – К. : НТУ, 2018. – 252 с.
10. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок.-Дис. докт. техн. наук.-Киев, 1983.- 552 с.
11. Бесараб О.М. Підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів з врахуванням часу дії навантаження: Дис. канд. техн. наук: 05.22.11 - К., 2003 – 142 с.
12. Печеный Б.Г. Долговечность битумных и битумо-минеральных покрытий.-М.: Стройиздат, 1981.-123 с.
13. Курс лекцій з навчальної дисципліни “Основи механіки земляного полотна і дорожнього одягу” за ред Б.С. Радовського, 1994.
14. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування.
15. Баран С.А., Шевчук Л.В., Вашіліна О.В., Лебедева І.В. Скінченно-елементний моніторинг напружено-деформованого стану дорожнього покриття з розшаруванням // Вісник КНУ ім. Т.Г. Шевченка. Серія: фіз.-мат. науки. Київ. 2018. № 2. С. 57 – 63.
16. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис. ... докт. техн. наук: 05.22.11 – К., 1996.– 406 с.
17. Гаркуша, М. В. Удосконалення методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії // дис... канд. техн. наук : 05.22.11 / Микола Васильович Гаркуша, Нац. транспортний ун-т.– Київ :, 2019.– 209 с.
18. Радовский Б.С. Напряженное состояние нежестких дорожных одежд с промежуточными слоями из слабосвязанных зернистых материалов // Ленинград, 1966. - 251с.
19. Супрун А. С. Расчет напряжений, перемещений и деформаций нежестких дорожных одежд при движении многоосных многоколесных транспортных средств: Дис. канд. техн. наук: 05.22.03. – К. – 1983. – С. 318.
20. Радовский Б.С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. – К.: ООО «ПолиграфКонсалтинг», 2003. – 240 с.
21. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок.-Дис. докт. техн. наук.-Киев, 1983.- 552 с.,
22. Littlefield. Warmdehneverhalten von Asphaltbeton in Utah.— Bitum., Teer., Asph., Pech. und verw. St., 1974, № 4, 25.
23. Никольский Ю. Е. Исследование трещиностойчивости асфальтобетонов при низких температурах. Труды/Союздор- НИИ. М., 1969, вып. 29.
24. Большухин А. М. Основные итоги исследования холодных асфальтобетонных смесей, укладываемых при низких температурах. Труды/УралНИИАКХ, Свердловск, 1958, вып.
25. Установа для определения внутренних напряжений и температур растрескивания материалов Б. Г. Печеный, В. В. Масленников, С. П. Андрюшенко, В. П. Лосев.— Заводская лаборатория, 1979, т. 45, № 2.
26. Печеный Б. Г., Вахитов Р. Р. Дилатометрия битумоминеральных систем, — В кн.: Исследование остаточный продуктов нефтепереработки. М., 1977.

REFERENCES

1. Radovskiy B.S. Proektirovanie sostava asfaltobetonnykh smesey v SShA po metodu Superpeyv // Dorozhnyaya tehnika. – 2007. – S. 28-41.
2. Sh. Shults Tehnologiya schebenochno-mastichnogo asfalta, CFF GmbH & Co/ KG.
3. Yurgen Huchenroyter, Tomas Verner Schebenochno-mastichnyiy asfaltobeton: osnovnyie ponyatiya, struktura, sostav, svoystva, opyt primeneniya. Avtomobilnyie dorogi, #4, 2002, S. 40-42.
4. Krzystov Blazejowski. SMA. Teoria I praktyka. 2007.]
5. Onyshchenko A.M. Teoretychni osnovy rozrakhunku asfaltobetonnoho pokryttia na avtodorozhnikh mostakh ta metody pidvyshchennia koliiestiikosti: Dys. dokt. tekhn. nauk: 05.22.11 – K., 2017.– 434 s.
6. Hustieliev O. O. Pidvyshchennia dovhovichnosti nezhorstkoho dorozhnoho odiahu z poperechnymy trishchynamy v asfaltobetonnomu pokrytti –Kvalifikatsiina naukova pratsia na pravakh rukopysu. // dys... kand. tekhn. nauk : 05.22.11 / Hustieliev Oleksandr Oleksandrovych., Nats. transportnyi un-t.– Kyiv :, 2019.– 199 s.
7. Kuzlo M.T., Bondar V.M., Pidvyshchennia stiikosti shchebenevo-mastykovoho asfaltobetonnoho pokryttia do dii transportnykh zasobiv na ukhylakh dorih i vulyts // Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo. 2019.
8. Baran S.A., Mozghovyi V.V., Olkhovyi B.Iu. Pidvyshchennia odnoridnosti shchebenevo-mastykovoii asfaltobetonnoi sumishi // Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo: nauk.-tekhn. zbirnyk. Kyiv. 2016. Vyp. 96. S.33-42.
9. Huliaiev V.I., Mozghovyi V.V., Haidachuk V.V., Hustieliev O.O., Zaiets Yu.O., Shevchuk L.V., Shliun N.V. Termopruznyi stan bahatosharovykh dorozhnikh pokryttiv // Monohrafiia – K. : NTU, 2018. – 252 s.
10. Radovskiy B.S. Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i rascheta nezhestkih dorozhnykh odezhd na vozdeystvie podvizhnykh nagruzok.-Dis. dokt. tehn. nauk.-Kiev, 1983.- 552 s.
11. Besarab O.M. Pidvyshchennia trishchynostiikosti asfaltobetonnykh shariv z vrakhuvanniam chasu dii navantazhennia: Dys. kand. tekhn. nauk: 05.22.11 - K., 2003 – 142 s.
12. Pechenyiy B.G. Dolgovechnost bitumnykh i bitumo-mineralnykh pokrytityi.-M.: Stroyizdat, 1981.- 123 s.
13. Kurs lektsii z navchalnoi dystsypliny “Osnovy mekhaniky zemlianoho polotna i dorozhnoho odiahu” za red B.S. Radovskoho, 1994.
14. HBN V.2.3-37641918-559:2019 Avtomobilni dorohy. Dorozhni odiah nezhorstkyyi. Proektuvannia.
15. Baran S.A., Shevchuk L.V., Vashchilina O.V., Lebedieva I.V. Skinchenno-elementnyi monitorynh napruzhenno-deformovanoho stanu dorozhnoho pokryttia z rozsharuvanniam // Visnyk KNU im. T.H. Shevchenka. Serii: fiz.-mat. nauky. Kyiv. 2018. № 2. S. 57 – 63.16. Mozgovoy V.V. Nauchnyie osnovy obespecheniya temperaturnoy treschinostoykosti asfaltobetonnykh pokrytityi: Dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.22.11 – K., 1996.– 406 s.
16. Harkusha, M. V. Udoskonalennia metodu otsinky stiikosti pokryttia nezhorstkoho dorozhnoho odiahu do utvorennia kolii // dys... kand. tekhn. nauk : 05.22.11 / Mykola Vasylovykh Harkusha, Nats. transportnyi un-t.– Kyiv :, 2019.– 209 s.
17. Radovskiy B.S. Napryazhennoe sostoyanie nezhestkih dorozhnykh odezhd s promezhutochnyimi sloyami iz slabosvyazannykh zernistykh materialov // Leningrad, 1966. - 251s.
18. Suprun A. S. Raschet napryazheniy, peremescheniy i deformatsiy nezhestkih dorozhnykh odezhd pri dvizhenii mnogoosnykh mnogokolesnykh transportnykh sredstv: Dis. kand. tehn. nauk: 05.22.03. – K. – 1983. – S. 318.
19. Radovskiy B.S. Problemy mekhaniki dorozhno-stroitelnykh materialov i dorozhnykh odezhd. – K.: OOO «PoligrafKonsalting», 2003. – 240 s.
20. Radovskiy B.S. Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i rascheta nezhestkih dorozhnykh odezhd na vozdeystvie podvizhnykh nagruzok.-Dis. dokt. tehn. nauk.-Kiev, 1983.- 552 s.,
21. Littlefield. Warmdehneverhalten von Asphaltbeton in Utah.— Bitum., Teer., Asph., Pech. und verw. St., 1974, № 4, 25.
22. Nikolskiy Yu. E. Issledovanie treschinoustoychivosti asfaltobetonov pri nizkikh temperaturah. Trudyi/Soyuzdor- NII. M., 1969, vyip. 29.
23. Bolshuhin A. M. Osnovnyie itogi issledovaniya holodnykh asfaltobetonnykh smesey, ukladyvaemykh pri nizkikh temperaturah. Grudyi/UralNIIAKH, Sverdlovsk, 1958, vyip.

24. Ustanovka dlya opredeleniya vnutrennih napryazhenii i temperatur rastreskivaniya materialov B. G. Pechenyiy, V. V. Maslennikov, S. P. Andryushenko, V. P. Losev.— Zavodskaya laboratoriya, 1979, t. 45, # 2.

25. Pechenyiy B. G., Vahitov R. R. Dilatometriya bitumomine- ralnyih sistem, — V kn.: Issledovanie ostatochniy produktov neftepererabotki. M., 1977.

РЕФЕРАТ

Баран С.А. Прогнозування довговічності дорожнього покриття із щебенево-мастикового асфальтобетону / С.А. Баран, О.М. Куцман, І.І. Гринчак // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 3 (53).

В статті запропоновано критерій граничного стану покриття із ЩМА, який враховує термо-реологічні властивості ЩМА, із застосуванням положення кінетичної теорії міцності твердих тіл і базується на принципах Пальгрейна-Майнера та Бейлі про суперпозицію пошкоджень структури матеріалу протягом строку експлуатації при негативній спільній дії найбільш впливових факторів.

Об'єкт дослідження – дорожнє покриття нежорсткого дорожнього одягу із щебенево-мастикового асфальтобетону.

Мета роботи – встановити аналітичні залежності для прогнозування порушення суцільності щебенево-мастикового асфальтобетонного покриття з урахуванням дії факторів, що на нього впливають.

Метод дослідження – експериментально-аналітичний.

На довговічність дорожнього покриття із щебенево-мастикового асфальтобетону найбільше впливають фактори, що спричиняють появу розтягуючих напружень та його розтріскування, а саме: горизонтальні нормальні напруження при дії транспортного навантаження та коливанні температури, крім того на щебенево-мастикове асфальтобетонне покриття діє колісне навантаження, яке викликає поверхневі розтягуючі напруження, які разом з температурними напруженнями створюють загальний напружений стан. Існуючий вітчизняний нормативний метод проектування дорожніх одягів не достатньо повно враховує спільну дію транспортних засобів та коливання температури, а також дію інших впливових факторів на довговічність покриття.

Відповідно до прийнятої робочої гіпотези: довговічність покриття із ЩМА визначається, головним чином, його стійкістю до порушення суцільності у результаті негативної спільної дії найбільш впливових факторів: транспортне навантаження, усадка покриття від зниження температури при її коливанні, усадка покриття від «старіння» бітумного в'язучого, водо-морозні впливи, розшарування асфальтобетонної суміші при порушенні рецептурно-технологічних параметрів, недостатнє зчеплення з нижнім шаром. Стійкість ЩМА до пластичних деформацій буде забезпечена дотриманням вимог чинних нормативних документів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АСФАЛЬТОБЕТОН ЩЕБЕНЕВО-МАСТИКОВИЙ, ДОВГОВІЧНІСТЬ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ, КРИТЕРІЙ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ПОКРИТТЯ, ТЕРМОРЕОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

ABSTRACT

Baran S.A., Kutsman O.M., Hrynychak I.I. Forecasting the durability of road covering made of stone-mastic asphalt concrete. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv. National Transport University, 2022. – Issue 3 (53).

The paper proposes a criterion for the limit state of a coating made of stone-mastic asphalt concrete, which takes into account the thermo-rheological properties of stone-mastic asphalt concrete, with the application of the provisions of the kinetic theory of the strength of solid bodies and is based on the principles of Palgrain-Miner and Bailey about the superposition of damage to the structure of the material during the service life under the negative joint action of the most influential factors .

Object of the study – a non-rigid road surface made of stone-mastic asphalt concrete.

Purpose of the study– to establish analytical dependencies for predicting the integrity violation of the stone – mastic asphalt concrete covering, taking into account the effects of the factors affecting it.

Method of the study – experimental and analytical.

The durability of a road surface made of stone -mastic asphalt concrete is most affected by the factors that cause the appearance of tensile stresses and its cracking, namely: horizontal normal stresses under the action of traffic load and temperature fluctuations, in addition, the stone-mastic asphalt concrete surface is affected by wheel load, which causes surface tensile stresses, which together with temperature stresses create a general stress state. The existing national regulatory method of road surface design does not fully take into

account the joint action of vehicles and temperature fluctuations, as well as the effect of other influencing factors on the durability of the pavement.

According to the accepted working hypothesis: the durability of the coating made of the stone-mastic asphalt concrete is determined mainly by its resistance to breaking integrity as a result of the negative joint action of the most influential factors: transport load, shrinkage of the coating from a decrease in temperature during its fluctuation, shrinkage of the coating from the "aging" of the bitumen in caustic, water and frost effects, delamination of the asphalt concrete mixture in case of violation of recipe and technological parameters, insufficient adhesion to the lower layer. The resistance of the stone-mastic asphalt concrete to plastic deformations will be ensured by compliance with the requirements of current regulatory documents.

KEY WORDS: STONE-MASTIC ASPHALT CONCRETE, ROAD SURVEY DURABILITY, CRITERION OF THE LIMIT STATE OF THE SURVEY, THERMOREOLOGICAL CHARACTERISTICS.

АВТОРИ:

Баран Сергій Анатолійович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, e-mail: baran_serg@ukr.net, тел. +380978806451, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0002-3591-9880

Куцман Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, e-mail: kutsmans@ukr.net, тел. +380672960871, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0002-6751-6592

Гринчак Ілона Іллівна, Національний транспортний університет, асистент кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, e-mail: ilonaborovyk@ukr.net, тел. +380672960871, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, orcid.org/0000-0002-8382-3824

AUTHOR:

Baran Serhii.A., Ph.D., National Transport University, Associate Professor Department of Road Building Materials and Chemistry, e-mail: baran_serg@ukr.net, tel. +380978806451, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka Str, 1, orcid.org/0000-0002-3591-9880

Kutsman Oleksandr.M., Ph.D., National Transport University, Associate Professor Department of Road Building Materials and Chemistry, e-mail: kutsmans@ukr.net, tel. +380672960871, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka Str, 1, orcid.org/0000-0002-6751-6592

Hrynchak I.I., National Transport University, Assistant Department of Road Building Materials and Chemistry, e-mail: ilonaborovyk@ukr.net, tel. +380969786226, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovycha-Pavlenka Str, 1, orcid.org/0000-0002-8382-3824

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Бубела А.В., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, в.о. декана факультету транспортного будівництва, Київ, Україна.

Дюжилова Н.О., кандидат технічних наук, Державна інспекція архітектури та містобудування України, заступник Голови, Київ, Україна.

REVIEWER:

Slavinska O.S., Ph.D., Engineering (Dr.), National Transport University, Acting Dean of the Faculty Transport Construction, Kyiv, Ukraine.

Diuzhylova N.O., Ph.D., Darzhavna Inspektsiia Arkitektury ta Mistobuduvannia Ukrayiny, Deputy Head, Kyiv, Ukraine.