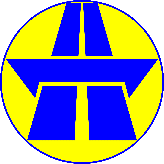
**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ (УКРАВТОДОР)**

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО**

**«ДЕРЖАВНИЙ ДОРОЖНІЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ**

**ІМЕНІ М.П. ШУЛЬГІНА» (ДП «ДЕРЖДОРНДІ»)**



**ДОРОГИ І МОСТИ**

**Збірник наукових праць**

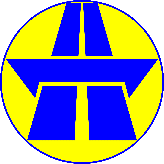
Заснований у 2003 р.

**Випуск 19**

Київ 2019

**STATE ROAD AGENCY OF UKRAINE**

**M.P. SHULGIN STATE ROAD RESEARCH INSTITUTE STATE ENTERPRISE – DERZHDORNDI SE**



**ROADS AND BRIDGES**

**Collection of scientific works**

Established in 2003

**Issue 19**

Kyiv 2019

**ISSN 2524-0994**

УДК 625.7/.8

Дороги і мости: Збірник наукових праць. Київ, 2019. Вип. 19. \_\_\_\_ с.

У збірнику публікуються результати наукових досліджень з питань проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг і транспортних споруд на них, розробки нових матеріалів, конструкцій і засобів механізації, впровадження прогресивних методів організації та технології дорожнього будівництва.

Для працівників науково-дослідних інститутів, проектних і будівельних організацій, викладачів, аспірантів і студентів автомобільно-дорожніх учбових закладів.

**Головний редактор:** канд. екон. наук Безуглий А. О.

**Заступник головного редактора:** канд. техн. наук, ст. наук. співробітник Вирожемський В. К.

**Відповідальний редактор:** д-р техн. наук, ст. наук. співробітник Бородіна Н. А.

**Літературний редактор:** д-р техн. наук, проф. Дехтяр А. С.

**Члени редколегії:** канд. техн. наук, ст. наук. співробітник Бабяк І. П.; д-р  техн. наук, доц. Батракова А. Г.; д-р техн. наук, проф. Белятинський А. О. д-р техн. наук, проф. Внукова Н. В.; д-р техн. наук, проф. Гамеляк І. П.; канд. техн. наук Головко С. К.; канд. екон. наук, доц. Іванченко В. О.; канд. техн. наук, проф. Коваль П. М.; канд. екон. наук, доц. Концева В. В.; канд. техн. наук Краюшкіна К. В.; канд. техн. наук, доц. Нагайчук В. М.; д-р екон. наук, ст. наук. співробітник Новікова А. М.; д-р техн. наук, доц. Лазаренко С. В.; д-р техн. наук, проф. Онищенко А. М.; д-р техн. наук, проф. Славінська О. С.; д-р техн. наук, доц. Хрутьба В. О.; д-р техн. наук, проф. Гаспар Ласло (Угорщина); канд. техн. наук Андре Самберг (Фінляндія); канд. техн. наук Шумчик В. К. (Республіка Білорусь), канд. техн. наук, доц. Шевчук Н.А.

**Технічний редактор:** Шевчук О.П.

**Адреса редакційної колегії:**

*03113, м. Київ, просп. Перемоги, 57, ДП «ДерждорНДІ»,* [www.dorogimosti.org.ua](http://www.dorogimosti.org.ua)

Збірник наукових праць «Дороги і мости» віднесено до категорії «В» в Реєстрі наукових фахових видань України.

Видається за рішенням Науково-технічної ради Державного підприємства «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (протокол від 26.06.2019 № 4).

|  |  |
| --- | --- |
| Номер свідоцтва про  державну реєстрацію збірника  Серія КВ № 8005 від 20.10.2003 р. | © Державне підприємство  «Державний дорожній  науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна», 2019 р. |

**ISSN 2524-0994**

UDK 625.7/.8

Roads and Bridges: Collection of scientific works. Kyiv, 2019. Issue 19. \_\_\_\_ p.

In this collection, the results of scientific research concerning the issues of design, construction and operation of highways and transport facilities; the development of new materials, structures and means of mechanization; introduction of up-to-date methods of organization and technologies of road building are published.

It is targeted at the researchers, the staff of the design and building organizations, lecturers, post-graduates and students of automobile and road educational institutions.

**Editor-in-Chief:** Candidate of Science (Economics) Bezuglyi A. O.

**Deputy Editor-in-Chief:** Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher Vyrozhemskyi V. K.

**Executive Editor:** Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher Borodina N. A.

**Literary Editor:** Doctor of Technical Sciences, Professor Dekhtiar A. S.

**Editorial board members:** *Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher* Babyak I. P.; *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor* Batrakova A. G.; *Doctor of Technical Sciences, Professor* Beliatynskyi A. O., *Doctor of Technical Sciences, Professor* Vnukova N. V.; *Doctor of Technical Sciences, Professor* Gameliak I. P.; *Candidate of Technical Sciences* Golovko S. K.; *Candidate of Science (Economics), Associate Professor* Ivanchenko V. O.; *Candidate of Technical Sciences, Professor* Koval P. M.; *Candidate of Science (Economics), Associate Professor* Kontseva V. V.; *Candidate of Technical Sciences* Krayushkina K. V.; *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor* Nagaychuk V. M.; *Doctor of Economic Sciences, Senior Researcher* Novikova A. M.; *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor* Lazarenko S. V.; *Doctor of Technical Sciences, Professor* Onishchenko A. M.; *Doctor of Technical Sciences, Professor* Slavinska O. S.; *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor* Khrutba V. O.; *Doctor of Technical Sciences, Professor* Gaspar Laszlo (Hungary); *Candidate of Technical Sciences* Andre Samberg (Finland); *Candidate of Technical Sciences* Shumchik V. K. (Republic of Belarus), *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor* Shevchuk N. A.

**Technical editor:** Shevchuk O. P.

**Address of Editorial board:**

*03113, Kyiv, Peremohy Ave., 57, DerzhdorNDI SE,* [www.dorogimosti.org.ua](http://www.dorogimosti.org.ua)

The Collection of scientific works "Roads and bridges" is classified in category "B" in the Register of scientific professional publications of Ukraine.

Issued by the decision of the Scientific and Technical Council of the M. P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE (Minutes on June 26, 2019 N 4).

|  |  |
| --- | --- |
| Certificate number of the  state registration of the collection  Series КВ N 8005 of 10/20/2003 | © M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, 2019 |

ЗМІСТ

**ЕКОНОМІКА. МЕНЕДЖМЕНТ. ПІДПРИЄМНИЦТВО, ТОРГІВЛЯ ТА БІРЖОВА ДІЯЛЬНІСТЬ**

[Безуглий А. О., Бібик Ю. М., Бубела А. В., Гресько І. Л., Славінська О. С., Харченко А. М. Особливості проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування 7](#_Toc13664854)

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Лучко Й. Й., Фордзюн Ю. І. [Багатофункціональний склад на основі природнього мінералу для профілактики ожеледиці 18](#_Toc13664863)

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖНЕРІЯ**

Albert Lantukh-Liashchenko [Markov models for assessments and prediction of structural elements 29](#_Toc13664870)

[Ihor Babiak, Nataliia Bidnenko, Valerii Vyrozhemskyi Modern european methods of non-destructive diagnostics of bridge structures 40](#_Toc13664871)

[Бабков О. В., Дехтяр А. С. Mетодика планування експлуатації будівельних конструкцій 56](#_Toc13664875)

[Гаркуша М. В., Онищенко А. М. Удосконалення методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії 63](#_Toc13664878)

[Зеленовський В. А., Копинець І. В., Онищенко А. М. Досвід застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах 80](#_Toc13664881)

[Желтобрюх А. Д., Малій П. Р., Одегова Т. С., Тимощук О. Ю. Використання асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму 96](#_Toc13664885)

[Копинець І. В., Соколова О. Б., Соколов О. В., Юнак А. Л. Вплив добавок на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів 109](#_Toc13664890)

[Ковальчук В. В., Кравець І. Б., Лучко Й. Й. Георадіолокація як неруйнівнийметод моніторингу земляного полотна 121](#_Toc13664895)

[Семененко В. С., Смірнова Н. В. Застосування технології укочуваного наджорсткого цементобетону для будівництва автомобільних доріг 142](#_Toc13664899)

**ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА**

[Карабин О. О., Тацій Р. М., Чмир О. Ю. Схема дослідження поздовжніх коливань стрижнЯ з чотирьох кусків кусково-сталого перерізу 151](#_Toc13664912)

[Міненко Є. В., Нагребельна Л. П. Недоліки в дорожніх умовах та їх вплив на виникнення дорожньо-транспортних пригод 167](#_Toc13664916)

CONTENTS

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  | | --- | | **ECONOMY. MANAGEMENT. ENTREPRENEURSHIP, TRADE AND EXCHANGE ACTIVITIES** | | |
| *Artem Bezuglyi, Yuliia Вibik, Andrii Bubela, Ihor Hresko, Olena Slavinska, Anna Kharchenko* Features of carrying out the cost evaluation of public roads…………………………......................... | 7 |
| |  | | --- | | **ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES** | | |
| *Yurii Forziun, Josef Luchko* Nulti-functional composition based on the natural mineral for icing prevention …………………………………………………………...................................................... | 18 |
| |  | | --- | | **CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING** | | |
| *Albert Lantukh-Liashchenko* Markov models for assessments and prediction of structural elements.................................................................................................................................................. | 29 |
| *Ihor Babiak, Nataliia Bidnenko, Valerii Vyrozhemskyi* Modern european methods of non-destructive diagnostics of bridge structures………………………………………............................... | 40 |
| *Oleksandr Babkov, Anatolii Diekhtiar* Planning method of building structures maintenance …….... | 56 |
| *Mykola Garkusha, Artur Onyshchenko* Improving the method of evaluation of the stability of non-rigid pavement against rutting.………………………………………………………………………... | 63 |
| *Vladimir Zelenovsky,**Ivan Kopinets, Arthur Onishchenko* Experience of application of epoxн asphalt concrete pavement on road bridges……………………………………………………….…. | 80 |
| *Anton Zheltobriukh, Pavlo Malii, Tetiana Odehova, OleksandrTymoshchuk* Using asphalt mixtures based on foamed bitumen …………………………………………………………………….….….. | 96 |
| *Іvan Kopynets, Оksana Sokolova, Оleksii Sokolov, Alina Yunak* Impact of additives based on synthetic waxes on the operational and processing characteristics of bitumen ………………….…... | 109 |
| *Vitalii Kovalchuk, Ivan Kravets, Josef Luchko* GPR method as a non-destructive method for subgrade monitoring…………………………………………………………………………….….… | 121 |
| *Vyacheslav Semenenko, Nataliya Smirnova* Rolled extra hard cement concrete application for road construction…………………………….………………………………………………………….…. | 142 |
| |  | | --- | | **CIVIL SECURITY** | | |
| *Oksana Karabyn, Roman Tatsii, Oksana Chmyr* The scheme for investigation for longitudinal oscillations of rod of a piecewise-constant section……………………….…………………..…....…. | 151 |
| *Liudmyla Nagrebelna, Evgen Minenko* Analysis of emergency and accident prevention events is step to reduce emergency…………………………………………………………………………..... | 167 |

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.7/.8

## *1*Безуглий А. О., *канд. екон. наук,* [*https://orcid.org/0000-0003-3883-7968*](https://orcid.org/0000-0003-3883-7968)

## *1*Бібик Ю. М., *<https://orcid.org/0000-0002-7197-8909>*

## *2*Бубела А. В., *канд. техн. наук,* [*https://orcid.org/0000-0002-5619-003X*](https://orcid.org/0000-0002-5619-003X)

## *1*Гресько І. Л., [*https://orcid.org/0000-0002-7175-7436*](https://orcid.org/0000-0002-7175-7436)

## *2*Славінська О. С., *д-р техн. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0002-9709-0078*](https://orcid.org/0000-0002-9709-0078)

## *2******Х*арченко А. М.,**** *канд. техн. наук,*[*https://orcid.org/0000-0001-8166-6389*](https://orcid.org/0000-0001-8166-6389)

*1Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

*2Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ВАРТІСНОЇ ОЦІНКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

***Анотація***

Вступ.Оцінка майна дорожнього господарства є водночас як складним, так і важливим питанням. Здійснення вартісної оцінки нерухомого майна в Україні ґрунтується на використанні нормативно-правових актів, положень національних стандартів з оцінки майна, нормативних актів Фонду державного майна.

Проблематика. Однією із передумов ефективного функціонування мережі автомобільних доріг України є перегляд та актуалізація нормативно-правових актів та стандартів з оцінки майна з урахуванням міжнародної практики з проведення вартісної оцінки активів дорожнього господарства, оскільки на сьогоднішній день не розроблено жодного нормативного документа або методики, які б враховували практичні підходи до проведення вартісної оцінки майна дорожнього господарства. Не менш важливим питанням, якому необхідно приділити увагу на сучасному етапі, є процедура здійснення вартісної оцінки автомобільних доріг та споруд на них, яка в сукупності із технічною експертизою дасть змогу отримати справедливу вартість оцінювання автомобільної дороги. Таким чином, виникла необхідність у розробленні методичних підходів, які з урахуванням сучасних тенденцій та зарубіжного досвіду забезпечать ефективне проведення оцінки майна дорожнього господарства.

Мета. Метою роботи є забезпечення найбільш об’єктивної та комплексної оцінки майна дорожнього господарства з урахуванням застосування різних оціночних методів.

Матеріали та методи. Оскільки автомобільні дороги можна віднести до спеціалізованого виду майна, що знаходиться в державній власності, то для його оцінення доцільно використовувати методи витратного підходу. Саме методичні підходи та механізми їх реалізації при проведенні вартісної оцінки майна дорожнього господарства є визначальними. В основу кожного із таких методів покладено комплекс процедур з оцінки, виконання яких у певній послідовності, дає можливість провести вартісну оцінку.

Результати. Результатом роботи є основні положення методичних підходів та практичних рекомендацій, які з урахуванням вимог чинних нормативно-правових актів [1-5] забезпечують достовірне проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них та дозволяють здійснювати експертну оцінку, для формування висновків про стан майна дорожнього господарства та його подальше використання.

Висновки. Запропонований комплекс методичних підходів та методів з проведення оцінювання майна включає в себе оціночні процедури, виконання яких у певній послідовності, надає можливість проводити вартісну оцінку майна дорожнього господарства, здійснювати експертну оцінку для формування висновків про стан майна дорожнього господарства та його подальше використання.

***Ключові слова:***інвентаризація майна, методи вартісної оцінки, об’єкти оцінки, автомобільні дороги, інформаційно-аналітична система.

**Вступ**

Визначення справедливої вартості майна дорожнього господарства в рамках здійснення його інвентаризації та проведення експертної грошової оцінки є необхідним питанням при проведенні заходів для реформування дорожнього господарства.

Вартісна оцінка автомобільної дороги є процесом розрахунку вартості дорожніх активів на дату оцінки за процедурою, встановленою нормативно-правовими актами та національними стандартами з оцінки майна [1-5].

При вартісній оцінці автомобільних доріг загального користування досягаються наступні цілі:

* встановлення наявності активів та їх елементів;
* визначення відповідності їх фізичного стану до оціненої вартості;
* визначення реальної поточної вартості автомобільних доріг.

Проведення вартісної оцінки здійснюється у відповідності до наступної процедури:

* визначення об’єктів і мети оцінки;
* встановлення принципів, основ і правил для оцінки активів;
* складання переліку активів та базових даних для розрахунку вартості активів;
* встановлення номенклатури показників якісного стану, аналіз та відбір найбільш істотних із них;
* складання моделі оцінки якісного стану об’єкта оцінки;
* визначення рівня якісного стану об’єкта оцінки;
* визначення вартості автомобільних доріг в залежності від цілей оцінки;
* складання звіту про вартісну оцінку.

Вартісна оцінка автомобільних доріг загального користування передбачає також проведення інвентаризації. Завданням інвентаризації є отримання даних про наявність та стан майна об’єктів, що знаходяться в управлінні балансоутримувача доріг, а також створення передумов для організації інформаційної системи з оперативного обліку наявності, стану та використання зазначеного майна. За результатами інвентаризації передбачається коригування існуючого паспорту автомобільної дороги або складання нового. Призначення інвентаризації та визначення справедливої вартості полягає у встановленні єдиних принципів підготовки технічної документації на об’єкти нерухомого майна дорожнього господарства.

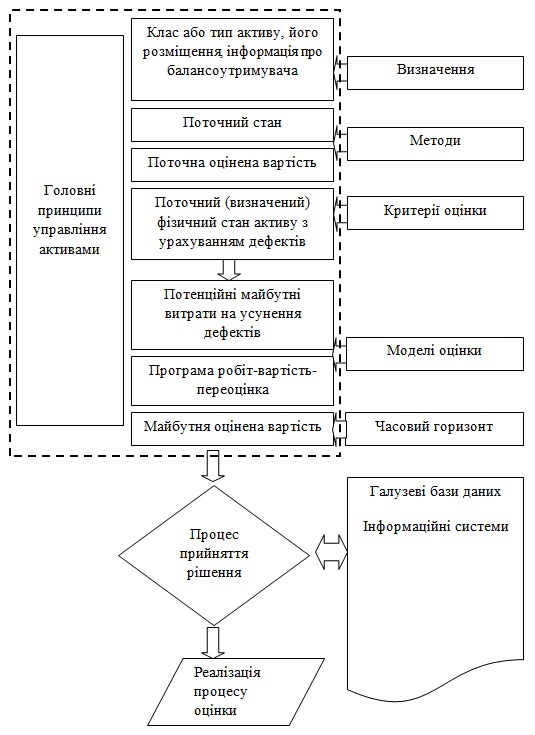
Нормативно-правовими актами та національними стандартами оцінки майна [1-5] не визначено конкретної процедури з проведення вартісної оцінки майна дорожнього господарства, тому постає необхідність у вирішенні ряду питань, а саме: адаптація існуючих форм та моделей з оцінки до специфіки автомобільних доріг як об’єктів оцінки, розроблення положень, що дозволять проводити вартісну оцінку майна дорожнього господарства, враховуючи специфіку майна.

**Основна частина**

Метою дослідження є розробка основних положень методичних підходів щодо виконання найбільш об’єктивної та комплексної оцінки майна дорожнього господарства з урахуванням їх специфічних особливостей та міжнародного досвіду.

Оцінку потрібно проводити за об’єктами дорожнього господарства. Об’єкти дорожнього господарства, які підлягають інвентаризації або вартісній оцінці, класифікуються наступним чином: автомобільні дороги, штучні споруди, технічні засоби та нерухоме майно, що необхідне для функціонування автомобільних доріг.

Схематично процес проведення вартісної оцінки автомобільних доріг наведено на рисунку 1.



***Рисунок 1* –** Схема процесу оцінки дорожнього активу [6]

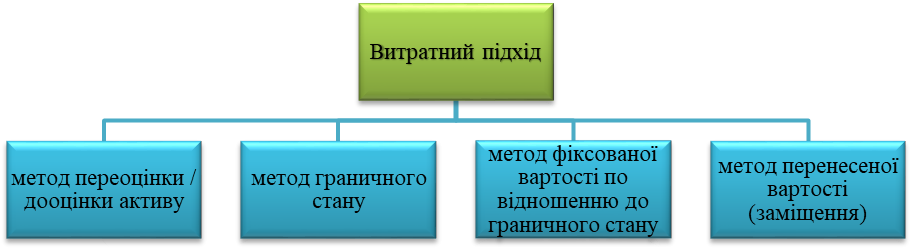
Ефективність оцінки майна дорожнього господарства залежить від методичних підходів, відповідно до яких вона буде здійснюватися. Побудова моделі оцінки доріг дозволяє дотримуватися сформованої методології до загальної оцінки автомобільних доріг, як на дату виконання оцінки, так і у майбутніх або прогнозованих періодів.

Процес оцінки дорожніх активів передбачає виконання ряду послідовних завдань:

* визначення об’єкта оцінки;
* визначення мети оцінки;
* визначення показників якісного стану об’єкта оцінки;
* вибір методу, відповідно до якого буде здійснюватися вартісна оцінка.

До методів, відповідно до [6-8] (рисунок 2), які використовуються для проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування відносять наступні:

* + метод переоцінки / дооцінки активу;
  + метод граничного стану;
  + метод фіксованої вартості по відношенню до граничного стану;
  + метод перенесеної вартості (заміщення).



***Рисунок 2*** – Методи, основані на витратному підході, що визначають вартість автомобільної дороги

Метод переоцінки / дооцінки активу полягає у тому, що вартість активу розраховують як добуток його первісної (початкової) вартості будівництва і співвідношення якісного стану активу або його елемента, скоригованої на індекс інфляції. Умовою є відношення поточного якісного стану активу або його елемента до кращого стану. Вартість активів у рік t визначають згідно з [6] за формулою (1):

де Vr.t*–* базисна вартість активів за методом переоцінки / дооцінки у рік t, грошових одиниць;

HC – первісна (фактична) вартість будівництва згідно зі зведеним кошторисним розрахунком, грошових одиниць;

Kk t– рівень якісного стану активу у момент часу t, у вигляді коефіцієнта або %;

Kk best – найкращий рівень якісного стану активу, зафіксований за період його життєвого циклу, у вигляді коефіцієнта або %.

Відповідно до [6] оціночну вартість дорожнього активу за методом переоцінки / дооцінки на дату оцінки отримують коригуванням базисної вартості на інфляцію за формулою (2):

, (2)

деVr.r.t*–* оціночна вартість дорожнього активу за методом переоцінки / дооцінки у рік t, грошових одиниць;

CPIt – індекс ціни будівництва в рік t;

CPI0 – індекс ціни будівництва у рік, коли об’єкт був побудований.

Метод граничних витрат використовує поточні і минулі дані для визначення вартості активів. Для розрахунку вартості активів згідно з [6] використовують формулу (3):

(3)

де  Vm.c.t*–* базисна вартість активів за методом граничних витрат у рік t, грошових одиниць;

– найгірший рівень якісного стану активу, зафіксований за період його життєвого циклу, у вигляді коефіцієнту або %.

Згідно із [6] оціночну вартість дорожнього активу за методом граничних витрат на дату оцінки отримують коригуванням базисної вартості на інфляцію за формулою (4):

, (4)

деVr.m.t*–* оціночна вартість дорожнього активу за методом граничних витрат у рік t, грошових одиниць.

Метод фіксованої вартості по відношенню до граничного стану полягає у приведенні стану активу або його елементу до рівня, який послідовно перевищує мінімальний поріг продуктивності, встановлений для даного активу. Вартість активів виражають через постійну величину протягом терміну служби активів до тих пір, поки рівень якісного стану активу вище певного граничного значення, коли рівень якісного стану падає нижче встановленого граничного значення (у такому випадку розглядається питання про оновлення активу або його ліквідацію).

Щорічно проводять розрахунок стану активу в момент часуt (Kk t). Величину зносу ( ділянки автомобільної дороги відповідно до [6] визначають за формулою (5):

(5)

Інструментарій з оцінки величини зносу описано у [7], [8].

При Kk t > Kk m.t оціночну вартість дорожнього активу визначають на основі коригування вартості заміщення (або відтворення) за кошторисом станом на дату оцінки на індекс інфляції.

де Kk m.t – граничне значення активу, яке встановлюється експертами дорожньої організації.

Відповідно до [6] оціночну вартість дорожнього активу за методом фіксованої вартості по відношенню до граничного стану та згідно формули (5) визначають за формулою (6):

,(6)

деVr.f.t*–* оціночна вартість дорожнього активу за методом фіксованої вартості по відношенню до граничного стану у рік t, грошових одиниць;

RCt – вартість заміщення (або відтворення) активу в рік t, грошових одиниць;

– вартість ремонтно-відновлювальних робіт активу в рік t,

, грошових одиниць.

Відповідно до [6] вартість заміщення (або відтворення) активу визначають за формулою (7):

, (7)

де *–* кошторисна вартість і-го елементу ділянки автомобільної дороги, яка відтворена в поточних цінах на дійсну дату оцінки з використанням таких же архітектурних рішень, будівельних конструкцій і матеріалів, а також з тією ж якістю будівельно-монтажних робіт, що й об’єкта оцінки (вартість відтворення) або з використанням сучасних матеріалів і відповідно до нових стандартів і планувальних рішень (вартість заміщення);

n – кількість елементів ділянки автомобільної дороги.

Остаточну оціночну вартість дорожнього активу згідно з [6] визначають формулою (8):

, (8)

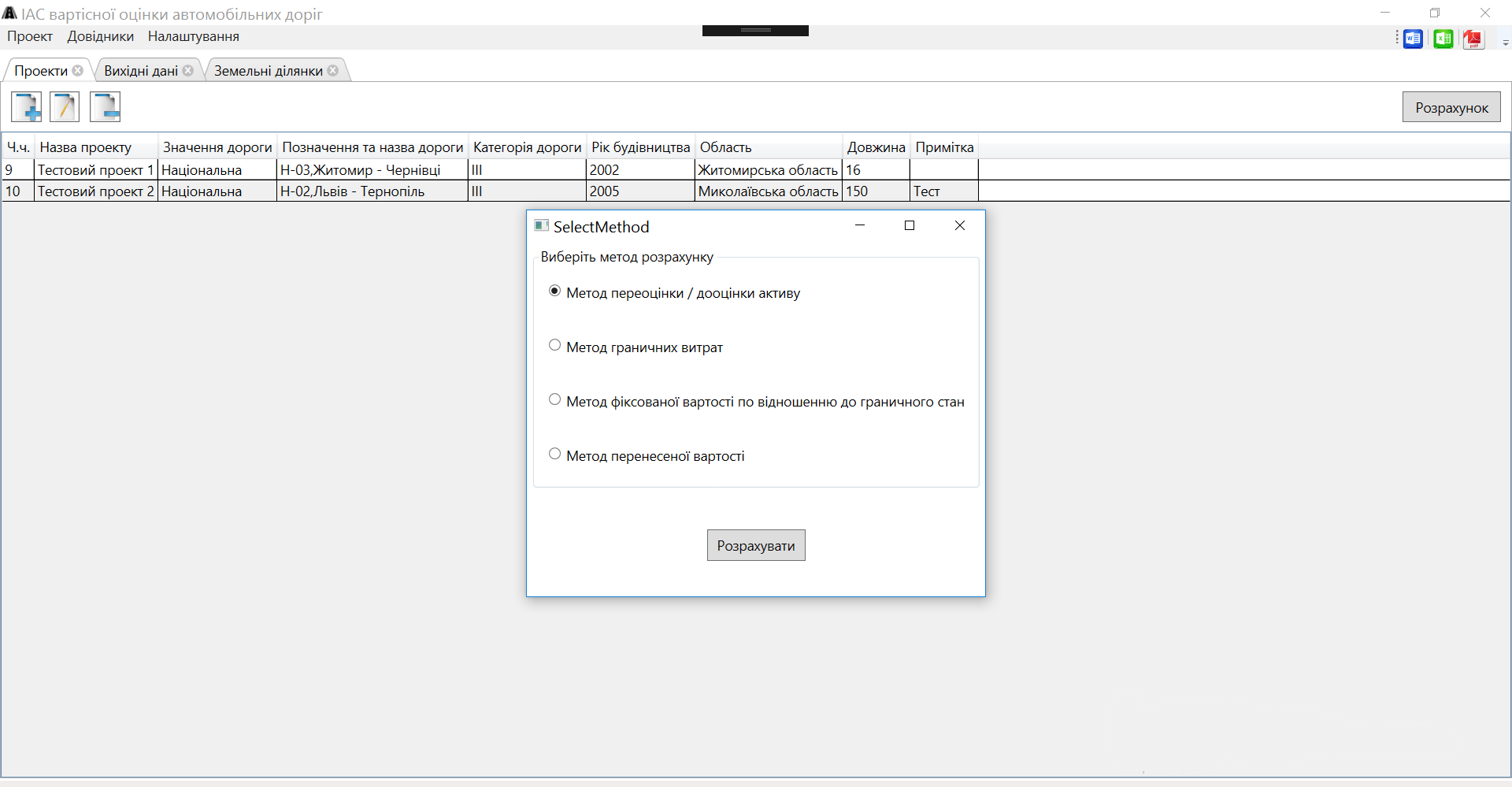
де – оціночна вартість ділянки автомобільної дороги, грошових одиниць;

– вартість земельної ділянки (детальну методику оцінки вартості земельної ділянки наведено у [6]), грошових одиниць;

– оціночна вартість дорожнього активу визначена за одним із методів, наведених на рисунку 2, грошових одиниць.

Аналіз методів, які використовуються для проведення оцінки майна дорожнього господарства, дозволив розробити інформаційно-аналітичну систему, алгоритми якої є зручними у використанні та забезпечують автоматизацію проведення розрахунків (рисунок 3) вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування. Інформаційно-аналітична система є програмою з визначеною структурою, інтерфейсом та параметрами, які забезпечують:

* вибір необхідного методу для проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування;
* реалізацію алгоритмів проведення оцінки дорожніх активів;
* доступ до бази даних, необхідної для здійснення розрахунків;
* централізоване зберігання зібраних даних для їх подальшого використання організаціями з оцінки майна дорожнього господарства;
* наповнення бази даних автомобільними дорогами, на які необхідно провести вартісну оцінку;
* доступ до нормативно-довідкової бази коефіцієнтів, необхідних для здійснення розрахунків;
* проведення аналізу результатів вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування з метою планування та прийняття ефективних рішень.



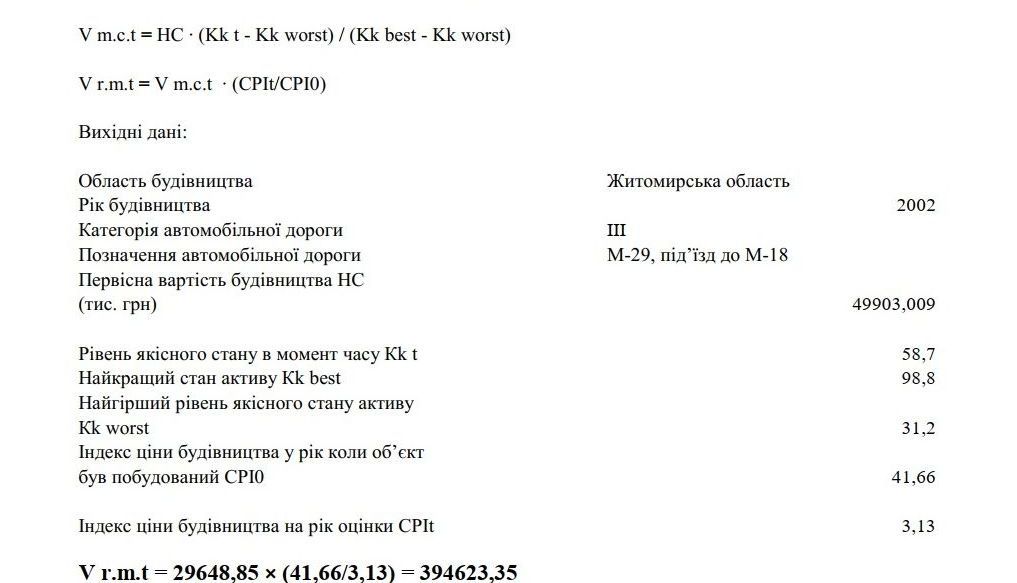
***Рисунок 3*** – Проведення розрахунків в інформаційно-аналітичній системі

Кінцевим результатом проведення вартісної оцінки є формування звіту про оцінку майна, який відповідно до [3] повинен містити наступні відомості:

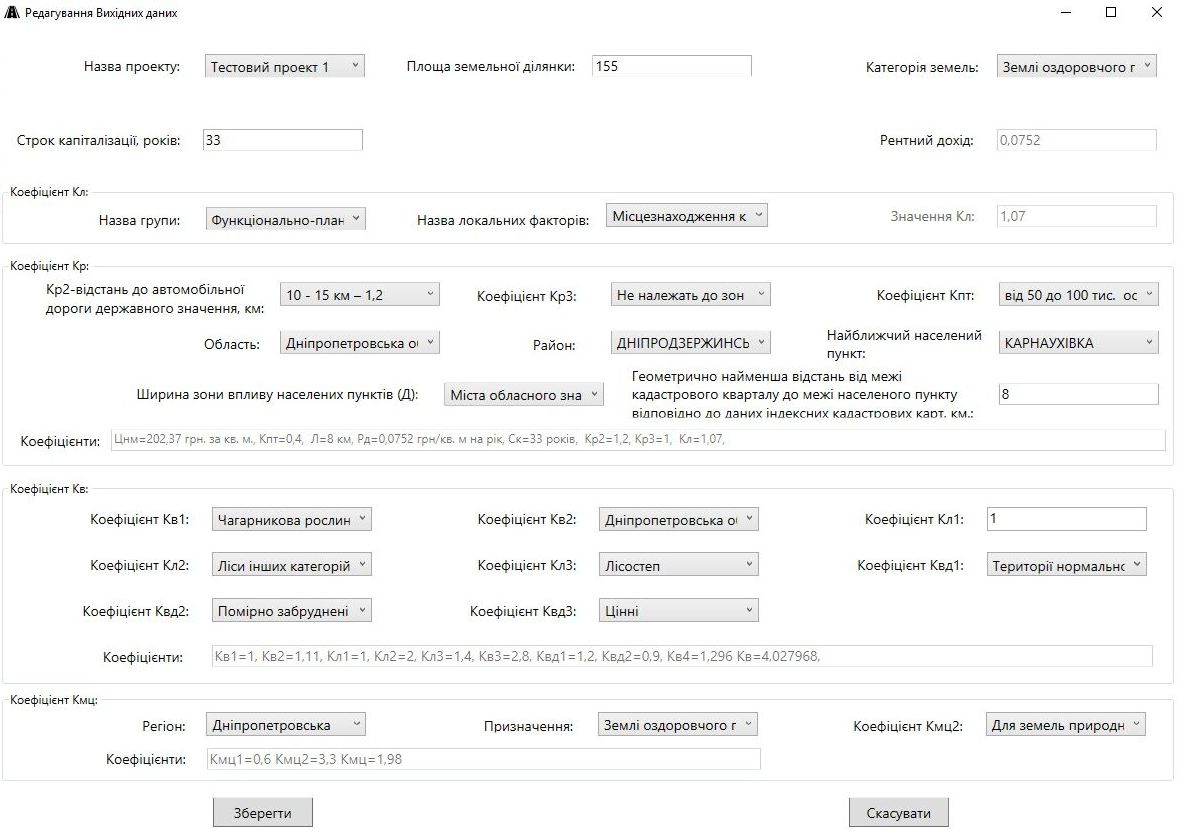
* + опис об’єкта оцінки майна, який дає змогу його ідентифікувати;
  + дату оцінки та дату завершення складання звіту, а у разі потреби – строк дії звіту та висновку про вартість майна відповідно до вимог законодавства;
  + мету проведення оцінки та обґрунтування вибору відповідної бази його оцінки;
  + перелік нормативно-правових актів, відповідно до яких проводиться оцінка;
  + перелік обмежень щодо застосування результатів оцінки;
  + виклад усіх припущень, у межах яких проводилася оцінка;
  + опис та аналіз зібраних і використаних вихідних даних та іншої інформації під час проведення оцінки;
  + висновки щодо аналізу існуючого об’єкта оцінки та його найбільш ефективного використання;
  + виклад змісту застосованих методичних підходів, методів та оціночних процедур, а також відповідних розрахунків, за допомогою яких підготовлено висновок про вартість майна;
  + письмову заяву оцінювача про якість використаних вихідних даних та іншої інформації, особистий огляд об'єкта оцінки (у разі неможливості особистого огляду – відповідні пояснення та обґрунтування застережень і припущень щодо використання результатів оцінки), дотримання національних стандартів оцінки майна та інших нормативно-правових актів з оцінки майна під час її проведення, інші заяви, що є важливими для підтвердження достовірності та об’єктивності оцінки майна і висновку про його вартість;
  + висновок про вартість майна;
  + додатки з копіями всіх вихідних даних, а також у разі потреби - інші інформаційні джерела, які роз’яснюють і підтверджують припущення та розрахунки.

Проведення вартісної оцінки з допомогою інформаційно-аналітичної системи дозволяє вирішувати наступні задачі:

* + приймати ефективні управлінські рішення;
  + в залежності від права балансоутримувача проводити оціночну вартість земельних ділянок;
  + оцінювати та враховувати всі фактори, що впливають на кінцевий результат вартісної оцінки;
  + вибирати локальні показники та визначати зони їх впливу (рисунок 4);
  + виконувати вартісну оцінку земельної ділянки під автомобільною дорогою, яка знаходиться на території населеного пункту;
  + виконувати оцінку земельної ділянки під автомобільною дорогою, яка знаходиться поза територією населеного пункту;
  + зводити розрахунки вартостей окремих земельних ділянок під автомобільними дорогами, які знаходяться у населеному пункті та поза населеним пунктом;
  + експортувати виконані розрахунки у програму Microsoft Excel;
  + проводити розрахунок вартості ділянок автомобільних доріг в залежності від обраного методу (рисунок 5).



***Рисунок 4*** –Внесення вихідних даних для визначення вартості земельної ділянки в інформаційно-аналітичній системі



***Рисунок 5*** –Розрахунок оціночної вартості ділянки автомобільної дороги відповідно до обраного методу

Розроблена інформаційно-аналітична система, маючи актуальну та достовірну базу даних та показників, може бути використана експертами-оцінювачами та фахівцями дорожньої галузі при проведенні комплексної вартісної оцінки майна дорожнього господарства.

**Висновки**

1. Проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування має важливе значення, оскільки вирішує ряд важливих питань, необхідних для прийняття обґрунтованих рішень в процесі управління майном дорожнього господарства. До них слід віднести: встановлення наявності активів, визначення відповідності їх фізичного стану оціненій вартості, визначення реальної поточної вартості активів.
2. Методи вартісної оцінки дають можливість проводити вартісну оцінку майна дорожнього господарства з урахуванням його специфічних особливостей.
3. Практичний підхід до вирішення питання вартісної оцінки майна є підґрунтям для проведення комплексної інвентаризації та вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування, що в подальшому дозволить застосовувати її у якості одного із ключових механізмів для усвідомлення фінансового стану дорожнього господарства.
4. Використання інформаційно-аналітичної системи дозволить використовувати базу показників та коефіцієнтів для проведення розрахунків з визначення вартості майна дорожнього господарства.
5. Відповідно до результатів розрахунків можна робити висновки про стан майна, які сприятимуть прийняттю обґрунтованих управлінських рішень щодо подальшого використання дорожніх активів.

**Список літератури**

1. Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні: Закон  від 12.07.2001 N 2658-III. База даних Законодавство України. ВР України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2658-14/ed20010712> (дата звернення: 15.10.2018).
2. Про оцінку земель: Закон від 11.12.2003 N 1378-IV. База даних Законодавство України. ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1378-15/ed20031211> (дата звернення: 15.10.2018).
3. Національний стандарт N 1 «Загальні засади оцінки майна і майнових прав»: Постанова Кабінету Міністрів України від 10.09.2003 N 1440. База даних Законодавство України. Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-п> (дата  звернення: 15.10.2018).
4. Національний стандарт N 2 «Оцінка нерухомого майна»: Постанова Кабінету Міністрів України від 28.10.2004 N 1442. База даних Законодавство України. Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1442-2004-п> (дата звернення: 15.08.2018).
5. Про методику нормативної грошової оцінки земель населених пунктів: Постанова Кабінету Міністрів України від 23.05.1995 N 213. База даних Законодавство України. Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213-95-п> (дата звернення: 15.08.2018).
6. МР Д 1.2-37641918-884:2017 Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них. Київ, 2017. 92 с. (Інформація та документація).
7. Оlena Slavinska, Vyacheslav Savenko, Anna Kharchenko, Andrey Bubela. Development of mathematical model of valuation of road transport assets as a composition information and management system. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. N 4 (90). Kharkiv, 2017. P. 45-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798>

8. Оlena Slavinska, Vitalii Stozhka, Anna Kharchenko, Andrey Bubela, Alina Kvatadze. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1. N 3 (97). Kharkiv, 2019. P. 46-59. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>

**REFERENCES**

1. Pro otsinku mina, minovikh prav ta profesiinu otsinochnu diiulnist v Ukraini: Law of Ukraine of 26.07.2001 N 2658-III. Database Legislation of Ukraine. Verkhovna Rada of Ukraine. URL <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2658-14/ed20010712> (Last accessed: 10.15.2018) [in Ukrainian].
2. Pro otsinku zemel: Law of Ukraine of 11.12.2003 N 1378-IV. Database Legislation of Ukraine. Verkhovna Rada of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1378-15/ed20031211> (Last accessed: 10.15.2018) [in Ukrainian].
3. Natsionalnyi standart N 1 «Zagalni zasady otsinky maina i mainovykh prav»: Decree  of  Cabinet of Ministers of Ukraine of 10.09.2003 N 1440. Database of Legislation of Ukraine. Cabinet of Ministers of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-п> (Last  accessed: 15.10.2018) [in Ukrainian].
4. Natsionalnyi standart N 2 «Otsinka nerukhomogo maina»: Decree of Cabinet of Ministers of Ukraine of 28.10.2004 N 1442. Database of Legislation of Ukraine. Cabinet of Ministers of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1442-2004-п> (Last accessed: 15.10.2018) [in Ukrainian].
5. Pro metodyku normatyvnoi groshovoi otsinky zemel naselenykh punktiv: Decree of Cabinet of Ministers of Ukraine of 23.05.1995 N 213. Database of Legislation of Ukraine. Cabinet of Ministers of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213-95-п> (Last accessed: 15.10.2018) [in Ukrainian].
6. Metopdychni rekomendatsii (MR D 1.2-37641918-884:2017) Metopdychni rekomendatsii z provedennia vartisnoi otsinky avtomobilnykh dorig i sporud na nykh. Kyiv, 2017. 92 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. Olena Slavinska, Vyacheslav Savenko, Anna Kharchenko, Andrey Bubela. Development of mathematical model of valuation of road transport assets as a composition information and management system. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. N 4 (90). Kharkiv, 2017. P. 45-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798> [in English].
8. Olena Slavinska, Vitalii Stozhka, Anna Kharchenko, Andrey Bubela, Alina Kvatadze. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1. N 3 (97). Kharkiv, 2019. P. 46-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519> [in English].

*1***Artem Bezuglyi**, *Ph.D in Economics,* [*https:*//*orcid.org/0000-0003-3883-7968*](https://orcid.org/0000-0003-3883-7968)

*1***Yuliia Вibik**, [*https://orcid.org/0000-0002-7197-8909*](https://orcid.org/0000-0002-7197-8909)

*2***Andrii Bubela**,*Ph.D,* [*https://orcid.org/0000-0002-5619-003X*](https://orcid.org/0000-0002-5619-003X)

*1***Ihor Hresko**,[*https://orcid.org/0000-0003-2504-6577*](https://orcid.org/0000-0003-2504-6577)

*2* **Olena Slavinska**, *D.Sс, Professor,* [*https://orcid.org/0000-0002-9709-0078*](https://orcid.org/0000-0002-9709-0078)

*2***Anna Kharchenko**, *Ph.D,* [*https://orcid.org/0000-0001-8166-6389*](https://orcid.org/0000-0001-8166-6389)

*1M. P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – «DerzhdorNDI» SE, Kyiv, Ukraine*

*2National Transport University, Kyiv, Ukraine*

**FEATURES OF CARRYING OUT THE COST EVALUATION OF PUBLIC ROADS**

***Abstract***

Introduction. The evaluation of the property of road economy is a complex and important issue. The implementation of the cost evaluation of real estate in Ukraine is based on the use of regulations, provisions of national standards of property evaluation and regulations of the State Property Fund.

Problem Statement. One of the prerequisites for the effective operation of the road network of Ukraine is the revision and updating of the regulations and property evaluation standards taking into account international practice on cost evaluation of road assets, because today there is no regulations or methodology that would consider practical approaches to the cost evaluation of the property of economy. An equally important issue that needs to be addressed at the present stage is the procedure for cost evaluation of roads and facilities on them which together with technical expertise will allow obtaining a fair cost of the evaluation of road. Thus, it is necessary to develop methodological approaches which will ensure the effective implementation of the evaluation of the property of road economy taking into account current trends and international experience.

Purpose. The purpose of the work is to provide the most objective and comprehensive evaluation of the property of road economy taking into account the use of various evaluation approaches.

Materials and methods. Since highways can be attributed to a specialized type of property of state-owned property, it is advisable to use methods of cost approach to evaluate it. The methodological approaches and mechanisms for their implementation when carrying out the evaluation of the property of the road economy are decisive. The basis of each of these methods is a set of evaluation procedures, the implementation of which in a certain sequence makes it possible to carry out the cost evaluation.

Results. The result of the work are the main provisions of the methodological approaches and guidelines that taking into account the requirements of the current regulations [1-5] ensure reliable cost evaluation of roads and facilities on them and allow carrying out the expert evaluation for formation of conclusions about the state of the road infrastructure property and its further use.

Conclusions. The proposed methodological approaches and methods for carrying out the property evaluation includes evaluation procedures the implementation of which in a certain sequence allows carrying out the cost evaluation of the property of the road economy, carrying out the expert evaluation for formation of conclusions about the state of the property of the road economy and its further use.

***Key words****:* inventory of property, cost evaluation methods, evaluation objects, highways, information and analytical system.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 502/504

## *1*Лучко Й. Й., *д-р техн. наук, професор*, [*https://orcid.org/0000-0002-3675-0503*](https://orcid.org/0000-0002-3675-0503)

## *2*Фордзюн Ю. І., *канд. техн. наук,* [*https://orcid.org/0000-0001-6709-9525*](https://orcid.org/0000-0001-6709-9525)

*1Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна*

*2Мукачівський державний університет, м. Мукачево, Україна*

## БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СКЛАД НА ОСНОВІ ПРИРОДНЬОГО МІНЕРАЛУ ДЛЯ ПРОФІЛАКТИКИ ОЖЕЛЕДИЦІ

***Анотація***

Вступ. У вступі охарактеризовано стан автомобільних доріг в Україні та її вигідне географічне розташування на шляху до євроінтеграції. Обгрунтовано доцільність заходів щодо профілактики ожеледиці на автомобільних дорогах, що покращить якість автомобільних перевезень особливо в зимовий період та загалом сприятиме зниженню витрат на утримання в належному стані всієї транспортної інфраструктури.

Проблематика. Проведено аналіз останніх досліджень і публікацій за тематикою дослідження, проаналізовано основні способи боротьби з ожеледицею: механічний, фрикційний, хімічний і комбінований. Систематизовано переваги і недоліки відомих способів та рецептур, що використовуються для профілактики ожеледі на автомобільних дорогах.

Мета. У формулюванні цілей статті наведено мету даної роботи – це заміна традиційних піщано-гравійних сумішей (відсівів) твердих монолітних порід, що використовуються для профілактики ожеледиці, на пористі в комбінації з хімічними добавками. Об’єкт дослідження – природний, мікропористий мінерал-цеоліт. Мікропориста природа цеоліту забезпечує його високі сорбційні властивості, відповідно, розширює можливості використання інгредієнту в поєднанні з традиційними хімічними реагентами (солями) для профілактики ожеледиці. Така рецептура (склад) є більш технологічною, зменшить використання хімічними реагентів і, відповідно, забезпечуватиме менше екологічне навантаження на транспортні шляхи та прилеглу територію, завдяки високим сорбційним властивостям тощо.

Матеріали і методи. За допомогою системного підходу досліджено механізм взаємодії солі з льодом та снігом, розраховано кріоскопічну сталу для води. Проаналізовано механізм розчинення, який є фізико-хімічним, адже сольватація іонів солі (хімічного компоненту) супроводжується тепловими явищами. Показано також, що для сильно розведених розчинів моляльна концентрація збігається з мольною концентрацією.

Результати. Наведено повну характеристику мінералу цеоліт, встановлено його основні фізичні властивості, які демонструють очевидні переваги цеоліту в порівнянні з традиційними піщано-гравійними сумішами. Представлено термодинамічні характеристики, концентраційні фактори (довідникові дані для різних солей), які дозволять добрати більш оптимальний хімічний реагент (сіль чи їхню суміш), з врахуванням робочих температур, екологічності, доступності тощо.

Висновки. Дослідження середовищ на основі природнього мінералу цеоліт з добавкою традиційних компонентів солей, в якості суміші для профілактики ожеледиці автомобільних доріг, у тому числі мостів, шляхопроводів, тротуарів, показало перспективність використання протиожеледних матеріалів запропонованого складу та визначило необхідність подальших їх досліджень.

***Ключові слова***:автомобільні дороги, ожеледиця, сніг, цеоліт, сіль.

**Вступ**

Індекс якості автомобільних доріг в Україні один з найгірших, не дивлячись на вигідне географічне розташування держави на шляху основних транзитних потоків між Європою і Азією та наявність розгалуженої мережі автомобільних доріг і відповідної транспортної інфраструктури. Ці обставини стримують розвиток галузі, зменшуються обсяги транзиту вантажів через територію України. В Законі України «Про автомобільні дороги» анонсовано будівництво, функціонування, реконструкцію, ремонт та утримання автомобільних доріг в інтересах держави і користувачів автомобільних доріг [1].

На шляху до євроінтеграції України транспортна галузь держави є одною з проблемних, якість дорожніх сполучень як і якість автомобільних перевезень не відповідають вимогам часу, актуальним залишається питання як фінансування, так і ефективного використання коштів. Однак, в цих умовах альтернативними заходами для розвитку транспортної галузі є поступова модернізація галузі, комплексний підхід до вирішення нагальних потреб та цільове фінансування, наприклад, на сезонну профілактику ожеледиці автомобільних доріг (транспортних шляхів). Ожеледь на автомобільних дорогах України погіршує перепускну здатність автомобільних доріг, різко збільшує кількість дорожньо-транспортних пригод тощо.

Ожеледь – шар льоду, що може виникнути на твердій поверхні дороги (суходолу) в зимовий період при похолоданні (мінусових температурах чи температурах близьких до 0°С). Ожеледь суттєво погіршує зчеплення коліс транспортного засобу з покриттям дороги, носить сезонний характер, є наслідком фізичних процесів при охолодженні: кондесація водяної пари, намерзання крапель переохолодженого дощу чи мряки, а також характеризується циклічністю, обумовленою добовим коливанням температури вдень та вночі. Ожеледь, зазвичай, з'являється при підвищеній вологості повітря (понад 90 %) на ділянках, що межують з річкою, каналами, озерами або іншими водоймами.

Проблема ожеледиці транспортних магістралей найбільш відчутна в зимовий період, який, не дивлячись на помірний клімат України, є досить тривалим. Значними є також наслідки зимового періоду, пов’язані з суттєвим збільшенням дорожньо-транспортних пригод, так і з необхідністю проведення профілактичних заходів, наступним ремонтом доріг, і особливо це стосується ремонту мостів, які найбільше серед дорожніх об’єктів потерпають в процесі експлуатації.

Доречно зауважити, що інтенсивність обледенніння поверхні суходолу мостів значно більша за одинакових погодніх умов в порівнянні з автомобільною дорогою, що пояснюється швидким промерзанням дорожного покриття мосту при загальному похолоданні.

Дану проблему потрібно розглядати значно ширше, адже в зимовий період необхідно забезпечити рух транспорту та безпеку на дорогах для власників транспортних засобів і для пішоходів на тротуарах. Проблематика ожеледиці охоплює не тільки автомобільну дорогу загального користування у межах смуги відведення (земляне полотно; проїздна частина; дорожнє покриття; смуга руху; споруди дорожнього водовідводу та водоочисні споруди; інші інженерні облаштування: снігозахисні споруди, протилавинні і протиселеві споруди; уловлювальні з’їзди; нагірні канави; випарні басейни; відкриті та закриті дренажні системи…), а також пішохідні проходи, тротуари та інші відповідні елементи дорожньої інфраструктури.

Тому проблема ожеледиці, очищення снігу є відчутною для великих міст, що обумовлено великою концентрацією транспорту, наявністю комунікацій будинків, пішоходів, тощо, що загалом ускладнює проведення профілактичних заходів.

***Аналіз останніх досліджень і публікацій*.** Як показує аналіз інформації за тематикою досліджень [2, 3] найбільш поширеними способами боротьби з ожеледицею є механічний, посипання доріг піском, пісчано-гравійною сумішшю (гранітною крихтою) та солевими складами на основі піщано-гравійних сумішей (далі – ПГС). За іншою класифікацією [4, 5] розрізняють механічний, фрикційний, хімічний способи і їх комбінації. Доцільно розмежовувати способи проведення профілактичних засобів та склади (суміш компонентів) для виконання поставлених завдань.

Кожен з цих способів, як і рецептури компонентів, мають свої сфери застосування, характеризуються техніко-економічними показниками щодо доцільності їх використання, мають свої переваги та недоліки, а тому питання розробки нових рецептур є актуальним завданням та матиме перспективи щодо практичного використання [6].

Механічний спосіб є давнім надійним, однак, є самим витратним, тривалим і неефективним, якщо виконується нерегулярно. Навіть часткова механізація даного способу може призводити до пошкодження дорожнього покриття, бордюрів, тротуарної плитки, бруківки, що може знижувати їх термін служби в 2 і більше разів [4, 5].

Фрикційний спосіб передбачає використання піску, відсіву, гранітної крихти, сприяє збільшенню сили тертя. Спосіб використання сипких матеріалів, не дивлячись на значну економію коштів від використання доступних та дешевих сипких матеріалів, носить виключно миттєву вигоду. Абразивний матеріал різної природи та походження дисперсністю до 5 мм, посипаний на проїзній частині дороги, здатний підвищити коефіцієнт зчеплення до 0,3. Тривалість такої профілактики умовно складає не більше 0,5 години, матеріал не затримується на проїзній частині, розсіюється до обочини дороги. Цей спосіб найбільш ефективний при відсутності атмосферних опадів на підйомах, спусках автомобільних шляхів, де швидкість транспортних засобів обмежено. Недоліком методу в умовах значної урбанізації міст є додаткові  витрати на прибирання відповідних територій, утилізацію отриманих продуктів, брудної каші особливо в період відлиги, зумовленої сезонним весняним потеплінням. Використання абразивних матеріалів типу гранітного відсіву призводить до засмічення систем водостоку [3, 5,6].

Хімічний спосіб більш ефективний завдяки використанню добавок солей, які зумовлюють танення снігу, льоду. Він позволяє знизити норму витрат сипких матеріалів відповідно від 700 до 200-300 гр./кв. метр. Технічна сіль відноситься до найбільш доступних засобів боротьби з ожеледицею. На безпечних ділянках доріг норми витрати піщано-сольових сумішей становлять  від 100 гр./кв. метр до 400 гр./кв. метр, або 0,1-0,2 м3 на 1000 м2 покриття, а на небезпечних 0,3-0,4 м3. Але ропа, що утворюється в результаті танення снігу та льоду, є одним з найбільш агресивних розчинів і завдає істотної шкоди. Це – активна корозія металів і контактувальних поверхонь мостів, комунікації та відповідна інфраструктура, не менший за обсягами є руйнівний вплив солей на взуття, кузов автомобіля, тощо; виділення хлору в атмосферу, в тому числі при утилізації негативно впливає на людину, природу та довкілля. Ці фактори в деяких країнах та великих мегаполісах призвели до заборони використання хлориду натрію [3, 6].

Комбінований спосіб є найбільш оптимальним і інноваційним для профілактики ожеледиці завдяки використанню більш ефективних в порівнянні з хлоридом натрію противоожеледних матеріалів ПОМ на основі хлориду кальцію і хлориду магнію, в тому числі у вигляді розчинів, що забезпечує більш низькі норми витрат в середньому 70 гр./ кв. метр, тоді як ПСС 300 гр./кв. метр, Як показує аналіз літературних джерел, патентів, та нормативних регламентів, використання ПОМ на основі хлоридів калію, кальцію, магнію, а також їхніх сумішей зумовлює дещо менші проблеми в порівнянні з традиційною сіллю - хлоридом натрію [3-6].

Напрацьований досвід [8] дозволяє обґрунтувати рекомендації щодо вибору оптимальних засобів боротьби з ожеледицею на основі техніко-економічних номенклатурних показників  якості, з врахуванням показників безпеки та екологічності для навколишнього середовища [9-11], а саме:

* хімічні компоненти засобів повинні гарантувати мінімальний вплив на корозію мостів, дорожньої інфраструктури та транспортних засобів;
* шкідливі компоненти складу повинні гарантувати мінімальний вплив на забруднення грунтів прилеглих до автомобільних доріг, територій і ґрунтових вод хлоридами, що спостерігається в період інтенсивного танення снігу;
* кількість внесених реагентів для профілактичних робіт повинна бути мінімальною, адже вона прямо пропорційна загальній витраті противоожеледних матеріалів;
* хлориди частково накопичуються в ґрунті, а частково по геохімічним ланцюгах вимиваються в ґрунтові води(ґрунтів, поверхневих і підземних вод).

По цій причині доцільним є розробка та впровадження граничних норм витрат противоожеледних матеріалів з екологічної точки зору, що дозволить удосконалити діючі нормативні документи в Україні до вищого рівня європейських стандартів, які будуть повністю відповідати вимогам безпеки дорожнього руху та забезпечать баланс в системі «Дорога - навколишнє середовище» [9].

***Формулювання цілей статті*.** Державним комітетом України по житлово-комунальному господарству затверджено «Технічні правила по ремонту міських вулиць і доріг» (№ 010-94 від 27.12.1994 р. Зокрема, п. 3.9. зазначених Правил передбачає виконання робіт сезонного характеру, що забезпечують належну чистоту доріг і нормальні умови експлуатації. П. 4.5 обумовлює необхідність регулярного очищення дорожнього покриття від забруднення, ліквідацію зимової ожеледі, своєчасне збирання сніжних валів, тощо. Правила регламентують два процеси – профілактичну обробку і безпосередньо чищення дорожнього покриття. Відповідно до п. 7.27 профілактику потрібно проводити за 1-2 години до виникнення ожеледиці, прогнозованої метеоспостереженнями. Чищення відбувається в два етапи: спочатку лід обробляють сіллю, а через 3-5 годин сколюють спеціальним устаткуванням.

У відповідності до стандарту ДСТУ 3587 «Технічне обслуговування доріг, ремонт доріг, сезонне утримання доріг» профілактика ожеледиці відноситься до виду робіт під загальною назвою «утримання доріг» – комплекс робіт, в результаті яких підтримується транспортно-експлуатаційний стан дороги, дорожніх споруд, смуги відведення, елементів облаштування дороги, організації та безпеки руху [4, 9].

По цій причині розробка нового складу для профілактики ожеледиці повинна базуватись на використанні наявних нормативів, існуючих засобів та техніки для проведення вказаних робіт. Аналіз літератури за тематикою дослідження [4, 6, 11] показав, що детально досліджені хімічні добавки до піщано-гравійних сумішей (ПГС) для профілактики ожеледиці, їхній асортимент є широким, доступним, і представлений вагомим спектром реагентів, також детально вивчений механізм їхньої фізико-хімічної дії.

Тому більший науковий та практичний інтерес представляє дослідження інших «нових» матеріалів в якості базового матеріалу взамін традиційного – відсіву мінералів, що мають пористу кристалічну будову та структуру. Таким мінералом є цеоліт (рис. 1, *a*, *b*), мінерал доступний, промислово видобувається та має широкий спектр використання, в тому числі в будівництві. Доцільність використання природнього мінералу цеоліту Хустського цеолітового заводу, з добавкою кам'яної солі для профілактики ожеледиці вже визначена [8]. Беззаперечно, використання хлориду натрію повинно бути поступово обмежене та замінене на реагенти більш екологічно безпечні та менш агресивні щодо конструктивних матеріалів.

***Мета*** даної роботи – є дослідження середовищ на основі природнього мінералу цеоліту з добавкою традиційних компонентів солей в якості суміші для профілактики ожеледиці транспортних шляхів, шляхопроводів, тротуарів. В результаті очікується: зменшення кількості реагентів хлоридів натрію, кальцію, магнію; забезпечення більшої тривалості використання середовищ; зменшення екологічного навантаження на довкілля в зонах прилеглих до мостів і шляхопроводів.

Мета роботи досягається дослідженням технологічних властивостей запропонованих складів протиожеледних матеріалів, що дасть змогу розробити їх відповідні рецептури з врахуванням відповідності основним експлуатаційним показникам та знизити вплив на довкілля. Наступним кроком є визначення техніко-експлуатаційної ефективності.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

Для визначення основних експлуатаційних, технологічних показників реагентів для профілактики ожеледиці необхідно вивчити механізм взаємодії хімічного реагенту (солі) з льодом та снігом (твердим агрегатним станом води). Це наглядно можна розглянути на прикладі технічної кам’яної солі – традиційного компонента для профілактики ожеледиці [8]. Експериментально було встановлено, що кристали сухого хлориду натрію, поміщені на тверду поверхню льоду (снігу), розчиняються дуже повільно і з поглинанням теплоти, з утворенням на поверхні кристалу водяної плівки. Початковий розчин активізує подальше розчинення залишків солі. Під дією власної вологи і при відносно малій швидкості розчинення окремі частинки хлористого натрію проникають через шар льоду на поверхню дорожнього покриття, що в результаті послаблює зв'язок між дорожнім полотном і шаром льоду. Після того, як кристал розчиниться, він продовжує накопичувати теплову енергію. Швидкість танення залежить від швидкості розчинення солей і евтектичної температури розчинів (температури початку кристалізації).

Даний механізм розчинення є фізико-хімічний, так як супроводжується електролітичною дисоціацією солей за рівнянням

NaCl + вода ---> Na + Cl.

Сольватація іонів супроводжуються тепловими явищами і протікає до настання динамічної рівноваги при даній температурі. Тобто сам процес профілактики ожеледиці базується на явищі кріоскопії – зниження температури замерзання розчину пропорційно числу часток розчиненої речовини, що описується законом Рауля. Роль хімічного реагенту очевидна – сіль плавить лід, а піщано-гравійна суміш зменщує ковзкість. Одночасно має місце механічне «розбивання» ожеледі колесами транспортних засобів. При потраплянні реагента на поверхню льоду його частки спочатку повинні розчинитися з утворенням розчину, який має температуру замерзання нижче температури замерзання води. Безперечно, що при понижених температурах в реальних зимових умовах кількість реагента необхідно збільшувати пропорційно градієнту температури навколишнього середовища. Саме розчин солі, поки його концентрація така, що температура замерзання нижче температури плавлення льоду, розтоплює лід. Тому швидкість танення льоду і снігу залежить від швидкості розчинення солей і евтектичною температури розчинів.

Зниження температури замерзання розчину тим значніше, чим вище концентрація розчиненої речовини *m*:

*t*зам = *Кm.*

У цій формулі *К* – коефіцієнт пропорційності, називаний кріоскопічною сталою, де *m*– моляльна концентрацією**,** що дорівнює числу молів розчиненої речовини в 1000 м3 розчинника.

При плавленні льоду розчини хлоридів розбавляються, їх концентрація падає. Розбавлені розчини мають температуру замерзання вище, ніж концентровані і можуть замерзнути, викликаючи додаткову слизькість, що особливо характерно при застосуванні хлористого натрію і піщано-сольових сумішей на його основі [6].

Для сильно розведених розчинів моляльна концентрація збігається з мольною концентрацією, і обидві вони пропорційні мольній частці розчиненої речовини. Пораховано кріоскопічну сталу, для води:

К = *t*зам/*m* = (0 – (–0,186)/0,1 = 1,86.

У розчині хлориду натрію концентрація часток дорівнює не 1 моль/л, а 2 моль/л, тобто хлорид натрію у водяному розчині знаходиться в дисоційованому стані:

NaCl = Na+ + Cl–,

і містить в два рази більше часток іонів - кріоскопічна стала дорівнює – 3,72.

|  |  |
| --- | --- |
|  | **Ceoliti_prerodni.ai** |
| *а* | *b* |

***Рисунок 1*** – Цеоліт: *a* – відсів, фракція 6 мм; *b* – проекція фрагменту пористої кристалічної структури цеоліту

Розбавлені розчини мають температуру замерзання вище, ніж концентровані, і можуть замерзнути при понижених температурах, тобто бути неефективними. На практиці використовують показник робочої температури. Встановлено основні експлуатаційні – термодинамічні характеристики хімічних реагентів для профілактики ожеледеці (таблиця 1).

***Таблиця 1***

***Термодинамічні характеристики реагентів для профілактики ожеледиці***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Реагент | Температура, °С | | Теплота pозчинення, ккал/моль, | |
| евтектична | робоча | екзотермічна | ендотермічна |
| Хлорид кальцію | -51 | -34 | -51,4 |  |
| Хлорид натрію | -21,2 | -9...-12 | - | 1,18 |
| Хлорид калію | -10 | -4 | - | 4,28 |

Основними з них є плавляча здатність – здатність ефективно плавити лід, тобто кількість льоду в грамах, яку здатний розплавити один грам реагенту. Враховуючи, що молекулярна маса NaCl 58,5, молекулярна маса CaCl2 111, простий розрахунок показує, що дві молекули NaCl рівнозначні по витраті реагенту одній молекулі CaCl2, тому хлористий кальцій при низьких температурах більш ніж в два рази ефективніше хлористого натрію.

При виборі реагенту потрібно враховувати його екологічні характеристики (таблиця 2).

***Таблиця 2***

***Гранично допустимі концентрації, орієнтовні безпечні рівні діяння забруднювальних речовин в атмосферному повітрі населених місць***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Речовина | Клас шкідливості | ОБРД  мг/м3 | ГДК  Середньодобова мг/дм3 | Примітка |
| Натрію хлорид | 3 | 0,15 | 0,15 | [4] |
| Кальцію хлорид | 3 | 0,1 | 0,05 | [4, 11] |

Згідно даних довідкової літератури хлорид кальцію, його розчини є більш безпечними в порівнянні з традиційною кам’яною сіллю (3 клас шкідливості).

Проведено роботи з вивчення середовищ на основі природнього мінералу цеоліту Хустського цеолітового заводу, з добавкою кам’яної солі, хлориду натрію Солотвинських солекопалень, (інших солей) на кріоскопію та навколишнє середовище.

Цеоліт в вигляді порошку або гранул різного дисперсного складу отримують шляхом подрібнення природнього мінералу-цеоліту на заводі в м. Хуст. Основні характеристики  Сокирницького клиноптилоліту, який використовували у дослідженнях, відповідали ТУ У 14.5-00292540.001-2001. У експериментах використовували гранульовану фракцію з діаметром частинок 0,25…6 мм. Основні характеристики цеолітів див. таблицю 3. Висока пористість 34 %, мікропористість в широкому діапазоні 2-50 Å, іонообмінна ємність 1,5 mg.eq/g демонструють очевидні переваги цеоліту в порівнянні з традиційними монолітними піщано-гравієвими сумішами.

***Таблиця 3***

***Фізичні властивості цеолітів***

|  |  |
| --- | --- |
| Адсорбційна ємність по воді | 34-38% |
| Ефективний діаметр пор | 2-50Å |
| Пористість | 34% |
| Густина | 1900-2800 кг/м3 |
| Площа поверхні | 413 m2/g |
| Іонообмінна ємність | 1,5mg.eq/g |
| Вологість | 6 – 8% |
| Термічна стійкість | 700ºС |
| Межа міцності при стисканні — | 8–15 МПа; |
| Питома теплоємність | 0,83–1 кДж/(кг·К), |
| Теплопровідність — 0,14 Вт/(м·ч·К). | 0,14 Вт/(м·ч·К) |
| Твердість (мінералогічна шкала) | 5–5,5 |

Цеоліти – це пористі кристали, мінерал вулканічно-осадового походження, має каркасну структуру, що складається з алюмосилікатів лужних та лужноземельних металів. Для алюмосилікатних цеолітів важливою характеристикою є відносний вміст Si та Al у каркасах. Зі зростанням частки алюмінію в цеолітному каркасі збільшується об’ємна ємність. Катіони і молекули води слабо пов'язані з каркасом і можуть бути частково або повністю заміщені (видалені) шляхом іонного обміну і дегідратації, причому можна зупинити, без руйнування каркаса цеоліту.

Експериментально було встановлено, що цеоліт здатен швидко капілярно поглинати 20-30 % (мас.) води, та соленої води (пересичений розчин) в такій же кількості. Чим дрібніша фракція цеоліту тим більшу кількість водяної фази він здатний поглинати – до 40 %. Рисунок 2.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| *а)* | *b)* |

***Рисунок 2*** – Технологічні властивості цеоліту: *a)* – дрібна фракція цеоліту 0,025 мм. (суха та  з водою); *b)* – груба фракція цеоліту 6 мм. (з  перенасиченим водяним розчином NaCl, насиченим водяним розчином NaCl, вихідний матеріал)

Позбавлений води цеоліт являє собою мікропористу кристалічну «губку», обсяг пор в якій становить до 50% обсягу каркасу цеоліту. Така «губка», що має діаметр вхідних отворів від 0,3 до 1 мм (в залежності від виду цеоліту) є високоактивним сорбентом. Саме завдяки цій властивості цеоліт використовується як сорбент. Явищем адсорбції – поглинання, концентрування речовини з газової фази на поверхні твердого тіла (адсорбенту) або в внутрішній структурі пор утворених системою порожнин і каналів, в яких розташовані лужні, лужноземельні катіоні та молекули води. Ми прогнозуємо подальшу локалізувальну здатність цеолітів щодо всіх гетерогенних викидів органічної та неорганічної природи в зонах, прилеглих до автомобільної дороги, в тому числі і шкідливих солей , що зменшує їх викиди в ґрунтові води.

Цеоліт володіє адсорбційними, іонообмінними, каталітичними, детоксикаційними, бактерицидними та іншими цінними властивостям. Кожна частинка цеолітової порошинки має безліч наскрізних отворів діаметром 2-10 ангстрем. Хімічна природа поверхні цеоліту здатна адсорбувати як молекули води, так і СО2, Н2S, NH3 , NaCl інших неорганічних речовин; органічних речовин нафтопродукти, масла, жири. Він є хорошим сорбентом як з рідкої, так газоподібної фази. Особливістю цеоліту є те, що він здатен утримувати в своїх порах речовини, які туди потрапили, розміри молекул яких не перевищують розміри пор, тому цеоліти називають молекулярними ситами, прості речовини він пропускає, а більші утримує в тому числі і солі як кріоскопічні добавки, що благотворно впливає на екологічну ситуацію прилеглих до автошляхів ділянок Таблиця 4.

***Таблиця 4***

***Критичні діаметри деяких молекул [7]***

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Молекула | H2 | O2 | N2 | H2O | NH3 | CH4 | С2H4 |
| dкр, | 2,4 | 3,4 | 3,7 | 2,7 | 3,6 | 3,8 | 4,07 |

Цеоліт є відносно нетвердим матеріалом, не комкується, тому може бути застосований  для  посипання доріг, має відносно невисоку вартість, ринкова ціна знаходиться в межах 50 євро за тону.

**Висновки**

Дослідження середовищ на основі природнього мінералу цеоліту з добавкою традиційних компонентів солей в якості суміші для профілактики ожеледиці транспортних шляхів, шляхопроводів, тротуарів показало перспективність використання таких протиожеледних матеріалів та визначило необхідність подальших їх досліджень.

Вигоди від застосування протиожеледних реагентів очевидні:

* + простота в експлуатації;
  + простота в приготуванні;
  + висока ефективність дії;
  + швидка швидкість впливу. Ефект від застосування помітний вже протягом 10 хвилин;
  + мінімальні витрати на зберігання та логістику;
  + екологічність.

Запропонований склад є багато функціональний. Не містить солей. Не надає корозійного впливу на сталь, пластмасу, гуму. При потраплянні на грунт виступає сорбентом для шкідливих реагентів.

Очікується зменшення кількості реагентів хлоридів натрію, кальцію, магнію, забезпечується більша тривалість використання середовищ, зменшується екологічне навантаження на довкілля в зонах прилеглих до шляхопроводів. Регламентоване використання більш прогресивного з екологічної точки зору складу для профілактики ожеледиці сприятиме зниженню витрат на утримання в належному стані всієї транспортної інфраструктури та покращить якість автомобільних перевезень, особливо в зимовий період.

**Список літератури**

1. Закон України Про дорожній рух (зі змінами до 2004) м. Київ, 30 червня 1993 року, N 3353-XII. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12> (дата звернення: 07.11.2018).
2. Бородіна Н. А., Вирожемський В. К. Оцінка впливу хлористих протиожеледних матеріалів на навколишнє середовище при зимовому утриманні автомобільних доріг. *Дороги і мости*. Київ, 2004. N 2. С. 14-17.
3. Вирожемський В., Бородіна Н. А., Трух М. Екологічні наслідки зимового утримання автомобільних доріг. *Автошляховик України*. Київ, 2006. N 2 (190). С. 35-38.
4. Лефельд К. Г. Зимнее содержание дорог (перевод с немецкого). Москва, 1977. 173 с.
5. Корецкий В. Е. Зарубежный опыт зимнего содержания дорожных покрытий. *Проекты развития инфраструктуры города*. Москва, 2002. Вып. 2. С. 108-116.
6. Корецкий В., Павлов Н. Зимняя уборка магистралей города. Москва, 2002. С. 86-97.
7. Неймарк Н. Е. Адсорбенты и катализаторы. Киев, 1978. 145 с.
8. Лучко Й. Й., Фордзюн Ю. І. Використання природнього мінералу цеоліту в якості добавки для профілактики ожеледиці транспортних шляхів доріх та тротуарів. *Дороги і мости*. Київ, 2006. Вип. 6. С. 313-321. URL: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2006_6_31>
9. ДСТУ 3587-97 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. Київ, 1997. 23 с. (Інформація та документація).
10. Корецкий В. Е. Геоэкологические основы теории и практики инженерной защиты водной системы северного мегаполиса в зимний период: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2007. 36 с.
11. Гутаревич Ю. Ф., Зеркалов Д. В., Говорун А. Г., Корпач А. О. Екологія автомобільного транспорту: навч. посіб. Київ, 2002. 312 с.

**REFERENCES**

1. Law of Ukraine on Road Traffic (with amendments to 2004) Kyiv, June 30, 1993, N 3353-XII.URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12> (Last accessed: 07.11.2018) [in Ukrainian].
2. Borodina N. A., Vyrozhemskyi V. K. Otsinka vplyvu khlorystykh protyozhelednykh materialiv na navkolyshnie seredovyshche pry zymovomu utrymanni avtomobilnykh dorih. *Dorogi і mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2014. 2. P. 14-17 [in Ukrainian].
3. Vyrozhemskyi V., Borodina N. A., Trukh M. Ekolohichni naslidky zymovoho utrymannia avtomobilnykh dorih. *Avtošlâhovik Ukraïni*. Kyiv, 2006. N 2. P. 35-38 [in Ukrainian].
4. Lefeld K. G. Zimnee soderzhanie dorog (translated from German). Moscow, 1977. 173 p. [in Russian].
5. Koretskiy V. Ye. Zarubezhnyy opyt zimnego soderzhaniya dorozhnykh pokrytiy. *Proekty razvitiya infrastruktury goroda.* Moscow (2002). Vol. 2. P. 108-116 [in Russian].
6. Koretskiy V., Pavlov N. Zimnyaya uborka magistraley goroda. Moscow, 2002. P. 86-97 [in Russian].
7. Neymark N. Ye. Adsorbenty i katalizatory. Kyiv, 1978. 145 p. [in Russian].
8. Luchko Y. Y., Fordzyun Yu. I. Vykorystannya pryrodnʹoho mineralu tseolitu v yakosti dobavky dlya profilaktyky ozheledytsi transportnykh shlyakhiv dorikh ta trotuariv. *Dorogi і mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2006. 6. P. 313-321. URL: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2006_6_31> [in Ukrainian].
9. State Standard of Ukraine (DSTU 3587-97). Bezpeka dorozhnjogho rukhu. Avtomobiljni doroghy, vulyci ta zaliznychni perejizdy. Vymoghy do ekspluatacijnogho stanu. Kyiv, 1997. 23 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
10. Koretskiy V. Ye. Geoekologicheskie osnovy teorii i praktiki inzhenernoy zashchity vodnoy sistemy severnogo megapolisa v zimniy period. (Doctoral dissertation). Moscow, 2007. State University of Civil Engineering [in Russian].
11. Ghutarevych, Ju. F., Zerkalov, D. V., Ghovorun, A. Gh., Korpach, A. O. Ekologhija avtomobiljnogho transport: Tutorial. Kyiv, 2002. 312 p. [in Ukrainian].

*1***Josef Luchko**, *D.Sс, Professor,* [*https://orcid.org/0000-0002-3675-0503*](https://orcid.org/0000-0002-3675-0503)

*2***Yurii Forziun**, *Ph.D,* [*https://orcid.org/0000-0001-6709-9525*](https://orcid.org/0000-0001-6709-9525)

*1Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine*

*2*[*Mukachevo State University*](http://msu.edu.ua/en/)*, Mukachevo, Ukraine*

**MULTI-FUNCTIONAL COMPOSITION BASED ON THE**

**NATURAL MINERAL FOR ICING PREVENTION**

***Abstract***

Introduction. The introduction briefly describes the state of roads in Ukraine and its favorable geographical location on the way to European integration. The expediency of measures for prevention of icing on roads which will improve the quality of road transportations especially during the winter period and, in general, will contribute to the reduction of the cost of maintenance in the proper condition the whole transport infrastructure was justified.

Problem Statement. The analysis of recent researches and publications was carried out; the main methods of icing combat were analyzed: mechanical, frictional, chemical and combined. The advantages and disadvantages of known methods and compounding used for prevention of icing on highways are systematized.

Purpose. The purpose of this article is the replacement of traditional sand-gravel mixtures (siftings) of solid rocks used for icing prevention on porous materials in combination with chemical additives. The object of research is natural, microporous mineral - zeolite. Microporous nature of zeolite  provides its high sorption properties, respectively, expands the possibilities of using the ingredient in combination with traditional chemical reagents (salts) for icing prevention. Such compounding (composition) is more technological, reducing the use of chemical reagents and, accordingly, providing  less environmental impact on the transport routes and roadside territory due to high sorption properties, etc.

Materials and methods. By systematic approach the mechanism of interaction of salt with ice and snow was studied, cryoscopic constant value for water was determined. It was analyzed that mechanism of dissolution which is physico-chemical because salt ions solvation (chemical component) is accompanied by thermal phenomena. It is also shown that for high diluted solutions, the molar concentration is corresponded the mole concentration.

Results. The full characteristic of the mineral zeolite is given, its basic physical properties are established which are shown the obvious advantages of zeolite in comparison with traditional sand-gravel mixtures. The thermodynamic characteristics, concentration factors (reference data for various salts) which will allow choosing more optimal chemical reagent (salt or their mixture) taking into account working temperatures, environment, availability, etc. are presented.

Conclusion. Research of environments based on natural mineral zeolite with adding the traditional salt components as a mixture for icing prevention of highways, including bridges, overpasses, sidewalks, is shown the prospect of the use of de-icing materials of the proposed composition and determined the need for their further research.

***Key words:*** highways, icing, snow, zeolite, salt.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

UDK 624.21.1

## Albert Lantukh-Liashchenko, *D.Sc., Professor, https://orcid.org/*[*0000-0002-6642-2359*](http://orcid.org/0000-0002-6642-2359)

*National Transport University, Kiev, Ukraine*

## MARKOV MODELS FOR ASSESSMENTS AND PREDICTION OF STRUCTURAL ELEMENTS

***Abstract***

Purpose. The purpose of the work is to develop a universal model for assessing the technical condition of the structure in the function of the time of operation. The theoretical basis for the development of a stochastic model for the technical condition of a structure during operation is the Markov theory of random processes. Phenomenological models of cumulative accumulation of damaged due to the natural degradation of elements during the life cycle of operation are considered. The wear of the structure element is described by a Markov discrete process with continuous time. The Markov process, whose evolution over time depends only on a fixed modern state, has found wide application in the system of operation of road bridges. Degradation of elements during operation is considered as a stream of failures that are physically a manifestation of damage to the elements of a structure under the influence of loads and the environment. The degradation of bridge elements is interpreted as a stationary simplest flow of Poissian type. A mathematical model of a random process with continuous time and discrete states is described by the well-known Kolmogorov – Chapman equations.

The technique. Theoretical study of the processes of degradation of elements of bridges made in the framework of probability theory and mathematical statistics.

Results. The model for assessment and prediction of a technical state of structural elements which is based on the Markov theory of random processes is received.. Markov stochastic models of damage accumulation as a result of natural deterioration, considered herein, are universal. They are well proved theoretically and have a practical orientation. These models may be applied as an effective tool for technical state assessments and prediction of structural residual resource. A key aspect of this approach is the special procedure for evaluating the transition intensity parameter. The main lack of the model is that the basis of the elementary flow with parameter λ = const is accepted. However, the parameter λ is determined for each given element, and every time after a subsequent inspection it can be specified, so the accuracy of the model should increase.

Scientific novelty. The study is pioneering. For the first time in the system of operation of structural elements, a stochastic assessment of the technical condition of the structure is proposed.

Practical value. The resulting model is a practical tool for managing the reliability and resource of structural elements.

***Key words*:** deterioration process; intensity of failures; Markov model of a random process; matrix of transitions; reliability function, structural elements.

**Introduction**

This research dedicated the problem of stochastic modelling to describe damages accumulated in structural elements. Classic scientific a priori formulation of structure lifecycle will obtain here a rigorous scientific substantiation in resource terms – structures find corresponding universal models describing  phenomenological processes of destruction with application of Markovian random functions.  The basic scientific idea of this approach lies in *new paradigm of structural theory – connection between limit state equations and service life duration*, so-called ‘stochastic’ ‘time-dependent’ random variables problem and the related failure probability calculations. The problem has its own weight as a risk management tool.

There have been multiple attempts to develop analytical models representing the degradation of bridge structures by knowing the deterioration process of materials. These models are typically very complex, as they attempt to represent physical and chemical processes using specific models for each different degradation cause. Moreover, they have to account that the actual condition of a bridge is the consequence of many concurring degradation processes. For these reasons, obtaining an effective and reliable mathematical degradation model is a very difficult task.

A different approach allows for evaluating the degradation a reliability-based models, using historical bridge conditional al data. This allows an appropriate degradation curve to be determined for each bridge reflecting all specific factors that have caused its degradation.

Despite classic, basic research in the reliability theory and practical algorithms of estimation and prediction of structural condition states are insufficiently developed [1, 2. 3, 8, 12, 13, 14].

The classic models of reliability are based on the basic mechanics of material destruction, consequently the structural reliability theory has not had wide practical application. The main limitation is that the classic reliability models require precise information based on a load history, which is expressed in the number of loading – unloading cycles [2]. Such data, for the majority of structural elements, have never been obtained and it is not expected to be done so in the foreseeable future. Therefore, when modelling uncertain processes of structural deterioration, one needs a model focused on incompleteness of the initial information. This limitation can be overcame by using a phenomenological stochastic model.

The phenomenological stochastic model, which is described as the accumulation of damages in the process where the evolution of time is defined by probabilistic laws, has become a powerful alternative for a deterministic model during the last 30-40 years. Now, many researchers are inclined to believe that the *Markov stochastic model* are the integrated universal for describe the cumulative damage of structural elements.

The objective of this paper is to present this universal approach for evaluation stochastic deterioration of the structural elements under maintenance.

**Markovian models of random processes**

Theoretical basis of the research is Markovian mathematical model for estimation and prediction of structure element service life prediction within its operational cycle. This model is one whose evolution in time depends only of fixed current state.

The modelling by the Markov process means that for any time *t0* the probability of stay in  an  element, in each state in the future (*t* > *t*0) depends only upon its state in the present (*t = t0*). It is a so-called memory-less process with discrete states (1, 2 … *n*) in continuous time *t*. It is a «memory-less» process because each discrete state is independent of the previous state. In other words, the distribution of the Markov process at the moment of time, *t*, can be expressed through the distribution of the previous moment of time independently of the process history.

At the same time the Markov discrete process is not completely independent from the past. The small amount of the philosophical formulation of this dependence is: for the Markov discrete process a future and its correlation depend on the past only through the present. Hence, it is not complete independence of a future from the past, because the starting, present state (*t* = *t0*) depends from the past deterioration stochastic process.

Here we shall formulate discrete models which meander on discrete states that transit in one direction only - from a state with a smaller number to a state with the greatest number. In terms of the Markov process, the task is to find unconditional probabilities for stay system **S** on any step *k* in a state *Sі*:

*pi*(*k*) = Prob[*S*(*k*) = *St*]; *k* = 1, 2, …*n*; *i* = 0, 1, …*n* – 1 (1)

The probabilities *pi*(*k*) are expressed through conditional probabilities of transition of system **S** on a step *k* in a state *Sj*, provided that on a step *k* -1 the system is able to *Sі*:

*pij*(*k*) = Prob[*S*(*k*) = *Sj* │*S*(*k*-1) = *Si*] *і, j* = 0, 1,…, *n* – 1 (2)

It is apparent that the transition probabilities (2) form a square matrix of transitions with the size *n*·*n*, where *n* is the number of discrete states considered. Let us denote the transitions matrix as **Р**(*i,t*). On the main diagonal of the matrix, **Р**(*i,t*) stands for the probabilities of a system delay in that given state, where *Sі* is on a step *k*; on lateral diagonals, a transition probability of the system transition is from the state *Sі* to the state *Sj*- *pij*(*k*).

In the search of transition probabilities, which are contained in the stochastic matrix **Р**(*i,t*), a major central point in the development of a deterioration model for structure elements are described by the Markov discrete process [5, 6]. When the matrix, **Р**(*i,t*), of a conditional transition probability is found, the unconditional probabilities *Pj*of that system stay in a state *S*i are turned out by the recurrent formula:

, *k* = 1, 2,…, *n*; *i* = 1, 2,…, *n,*  (3)

where *i* is number of current state; *n* is number of discrete states in the course of element lifecycle;  *p*kis *absolute probability* of element remaining in *k*-th discrete stateі; *p*іk(*t*)is transient probability of *k*-th discrete state.

Required probabilities of the Markov chain *p1*(*t*), *p2*(*t*),…, *pn*(*t*) are functions of time. They are determined from a system of ordinary differential equations. It is known as the forward Chapman - Kolmogorov equation, which describes the evolution of the Markov discrete process with continuous time. In the matrix form, the differential equations are:

, (4)

where **P**(*i, t*) is a transition probability matrix and **E** is a transition intensity matrix. In addition to the equation (4) we have the initial conditions:

at *t* = 0 *p1*(*t*)=1; *p2*(*t*) = *p3*(*t*)= *p4*(*t*) = 0 (5)

The elements of **P**(*i,t*) should meet the followings normalization condition

 (6)

for all *i* (row sum). This condition is due to the fact that Markov chain events are incompatible and form a complete group.

From known elements of transition matrix **Р** and vector of initial probabilities **р0** (formula (3)) are determined *absolute probabilities* of system states in time function after a fixed number of transition steps.

**Application**

Markovian random process models as described in 2. are universal. Random process described by *the model is invariant as regards the type of structure, its material, operational environment*. Degradation properties of structure elements are described by two parameters: *degradation criterion* and parameter *failures intensity* (mean rate of events occurrence)

The criterion of degradation may be adopted any factor of the stress-strain state: reliability, internal effort, deformation. In our case, the criterion of degradation assumes *the reliability of the element*, as the most common factor of the stress-strain state.

As regards failure intensity parameter, it requires special investigation in phenomenological model of failures accumulation, and its determination in our model is described below.

***Problem formulation.***

We set a task to build a phenomenological probabilistic model of object element degradation in the process of operation. Element degradation model is aimed to establish reliability law in time function and, thus, to install tool for its technical condition prediction [9, 10]. Our developed model has two components: phenomenological classification tables of discrete states and reliability function. The following four assumptions form theoretical basis of the models proposed are shown below.

A. As criterion an element state condition a numerical reliability parameter for integrated quantitative estimation of condition assessment and prediction is assumed. The reliability of an element is defined in the classical meaning [13] as the probability that the safety limit state will be violated:

*p*f = Prob [*r*(*R*) – *s*(*S*) ≤ 0], (7)

where *r*(*R*) and *s*(S) are functions of random variables associated with resistance and loading effects respectively

B. Lifecycle of the structures is divided into 5 discrete states. Each state is characterized by a set of quantitative and informal qualitative degradation indices which describe hierarchy of element failures.

C. Element degradation process within its lifecycle is described by a discrete Markovian random process with continuous time.

D. Transition from one discrete state to another is described as Poisson’s process with discrete states and continuous time.

***Discrete states of element.***

We will formulate the Markovian process for models in which wandering in discrete states is carried out in only one direction: from a state smaller, to a state with a larger number. Transition is possible not only to adjacent state but with overshooting to subsequent states as well. In terms of discrete Markovian process the problem comes down to search of unconditional probabilities of system **S** being at a random step *k* in state *Sі* We shall treat system of failures due to object element worn-out as a flow of random discrete Markov chain events. «Random system discrete state» acts as random value.

Let us introduce 5 discrete states within element operation lifecycle which form a cortege **S**= {*S1, S2, …, S5*}. Discrete states are described by a set of quantitative and qualitative informal indices which characterize hierarchy of element failures [7, 11]. A generalized description of states representing accumulation of failures as hierarchy of successive element failures is specified in Table 1.

***Table 1***

***General characteristics of states***

|  |  |
| --- | --- |
| State | Characteristic of state |
| *S*1 | Element meets all project requirements |
| *S*2 | Element does not meet all project requirements, but the requirements of both first and second groups of boundary states are not violated |
| *S*3 | Element does not meet all project requirements, but the requirements of the first group of boundary states are not violated. Requirements of the second groups of boundary states may be partially violated, if this is not limiting normal structure functioning |
| *S*4 | Element has signs of violation of requirements of the first group of boundary states, whereas requirements of the second group of boundary states are seriously violated |
| S*5* | Element has serious violations of requirements of the first group of boundary states, impossibility of their prevention is proven and its operation must be stopped |

In terms of discrete Markovian process the problem comes down to search of *unconditional probabilities* of system **S** being at a random step *k* in state *Sі* , that is, to obtaining transient probability matrix.

Let us assume that an element is to be consistently in state *S1, S2..., Sn*, and the transitions from one discrete condition state to another are carried out at the moment of time *t1, t2..., tn-1*. The global aim of this model is to establish the change reliability law in the function of time and the time prediction of stay in each subsequent discrete state. This is a discrete stochastic process with continuous time and regular distributed time intervals between states. The graph of the process represents a linear sequence of events, i.e. a transition from any state to next (fig. 1).

Рис 1

***Figure 1*** *–* Graph of the deterioration process

We determine matrix **Р**(*i, t*) and matrix **Е** by Chapman-Kolmogorov equations (equation (4)). We slightly amend matrix elements form to simplify recording. The state flow intensities independent from step and time

 (8)

Equation (5) in this case is simplified and written as:

 (9)

By integrating system of equations (11) we obtain transition probability matrix **P:**

 (10)

We assume initial unconditional probability *p*k = 0.9998 (β = 3,8. Here β is safety characteristic, numerical parameter connected to reliability by relation: *P*t = Ф(-), where Ф is standard normal distribution function), which corresponds to minimum normalized value of design reliability in State 1. From equation (3) we obtain the vector of unconditional probabilities of staying in the state *j*:

 (11)

By known vector of remaining in state *j* = 1, 2, …, 5unconditional probabilities we determine degradation curves, that is, family of stochastic process implementations, each of them at given value of failure intensity parameter  gives *predicted transition time* from state *j* to state *j +* 1 [7,11].

***Reliability function.***

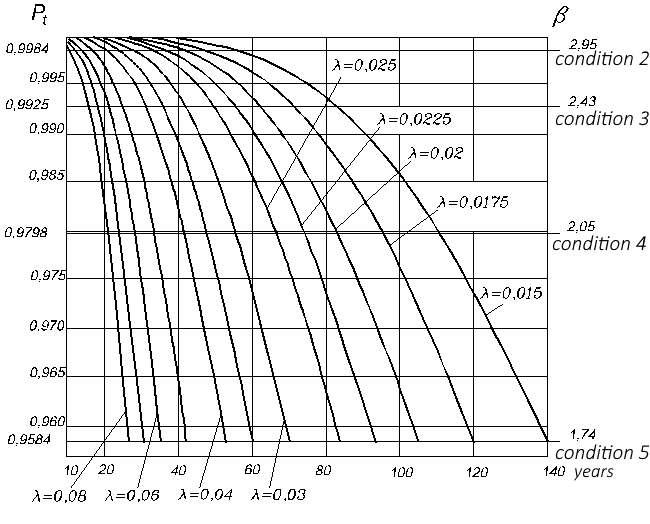
Reliability function describes element degradation process within its lifecycle, that is, connection is established between element reliability and operation time. It is postulated that degradation rate is described by a single parameter – failure intensity index. This parameter is admitted as constant, time-independent = *(t)*.

We admit Poisson’s distribution law as reliability function under hypothesis D. At *k = 5* function has the form

 (12)

where *Pt* – probability of element transition to state *k* within time *t < Tk* , is probability function of service life in other terms.

Thus, at given failure intensity *λ*, equation (12) founds connection between element reliability *Pt*  in *і*-th state and time *t*, which passed from beginning of operation to state *і=2,*...*5.* Element degradation curves under equation (12) see Fig. 2.



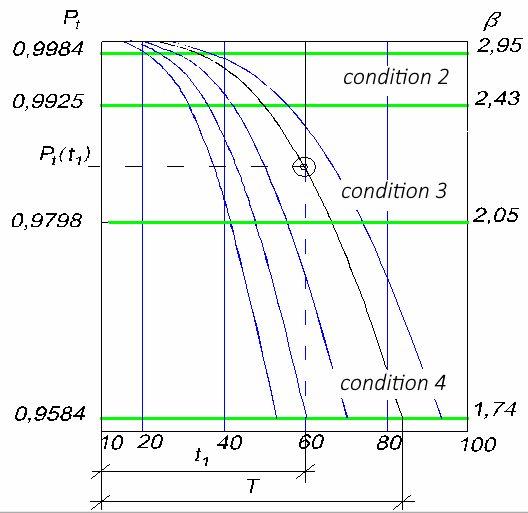
***Figure 2* –** Element degradation curves

***Determination of flow******intensity parameter.***

Determination of flow intensity parameter is a keystone of structure element failure accumulation under Markov phenomenological model. As seen from equation (12), a single lifecycle management parameter is the flow intensity *λ*. In the model under study the parameter *λ* is determined by solution of equation (12) with initial conditions for a particular element obtained from inspection results. The procedure of parameter *λ* determination was first proposed in 1999 in [152]. It consists in specific determination of initial conditions for equation (12) relative to unknown parameter *λ*:

* reliability *Pt,i* - corresponding to determined *і*-th lifetime condition. This value becomes known as soon as by inspection data element discrete state is classified;
* and also *tі -* time that passed from beginning of element operation to state *і*. Time *tі* is known from bridge technical documentation.

Graphic interpretation of parameter determination procedure see Fig.3.



***Figure 3* –** Graphic interpretation of flow intensity parameter *λ* determination procedure

***Element residual life prediction.***

Residual life prediction is also determined by solution of the degradation equation (12). Initial  data for equation solution now become reliability *Pt,5* – boundary value of reliability in operational  condition 5 and flow intensity parameter determined at previous step from equation (12). The time *T*5 obtained under such initial conditions that is time passing from element current state to fifth operational state, just is its residual life.

Algorithm of evaluation and prediction of structure element technical condition under Markovian phenomenological model of failure accumulation is specified in Table 2 – an example of operation system rules of road bridges [7].

***Table 2***

***Algorithm of structure element lifetime condition evaluation and prediction***

|  |  |
| --- | --- |
| Step | Operation |
| 1 | *Conventional assessment.* The procedure for classifying the operating status of bridges according to the survey results of inspection and/or testing and comparison characteristic defects and damage, other signs of degradation with signs specified in the classification tables. |
| 2 | *Performance assessments.* Classification of bridge element lifetime condition from results of actual load capacity. Load capacity is determined on the basis of actual structure element dimensions, mechanical characteristics of materials and description of defects revealed in the course of inspection. |
| 3 | *Detail assessments.* Classification of bridge element lifetime condition from results of analytical calculation of their safety index actual as per moment of inspection. Initial data for safety index are inspection data with material mechanical characteristics determined for the element and quantitative degradation features of its cross-section, characteristic values of generalized resistance and load at the ultimate limit state load. |
| 4 | *Lifetime prediction.* Initial data for determination of residual life are element reliability *Pі*, time that passed from beginning of operation to current condition, and failure intensity flow intensity parameter . |

**Discussion**

The proposed model is integral. It does not contain an explicit theoretical apparatus of an element sensitive to the material, its static scheme, construction technology, environmental conditions, and many other aspects. On the other hand, all of these factors, are taken into account in the model at a time when element state is specified by the tables of classification containing physical and mechanical signs of degradation

It is evident that the proposed technique for determining the value of the parameter *λ*, which manages operation lifecycle model «from present», that is, from *i*-th discrete state, gives full information about the loading history of the load «in the past». Flow intensity parameter *λ* determined in this procedure contains a lot of other information relating to object operation, such as environment characteristics, level of loading effects, features of the design and the like. As parameter *λ* is determined for each particular element and must be finalized after each consecutive inspection, the model becomes more accurate.

This is clear from the above formulation that the model is strictly substantiated in theory. However, as the model is phenomenological, deep penetration into physical essence of described process is necessary, as not only each of discrete states must be adequately described, but also parameter variation within one state should be correctly established, whereas the modeled process is a continuous one.

The solution on number of discrete states representing element lifecycle is quite arbitrary. It is evidently that the more discrete states, will be the more accurate description of continuous damage accumulation process. From the other side, description of a large number of discrete states requires substantial expansion of valid natural data base. Model developer shall find a reasonable compromise between these contradictory requirements.

An important theoretical aspect of model is element degradation process graph. Model graph, which depends on the number of discrete states and the relationships between them will always be the subject of special attention from the researcher, will always reflect his subjective idea of the essence and patterns of the process.

**Conclusions**

Markov stochastic models of damage accumulation as a result of natural deterioration, considered herein, are universal. They are well proved theoretically and have a practical orientation. These models may be applied as an effective tool for technical state assessments and prediction of structural residual resource.

A key aspect of this approach is the special procedure for evaluating the transition intensity parameter. The main lack of the model is that the basis of the elementary flow with parameter *λ* = const is accepted. Actually, the parameter of failure rate is described by the stochastic function of time. However, the parameter is determined for each given element, and every time after a subsequent inspection it can be specified, so the accuracy of the model will be raised.

**Список літератури**

1. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. Москва, 1989. 344 с.
2. Bogdanoff J. L. A New cumulative damage model - Part 1. *Journal of Applied Mechanics*. 1978. Vol. 45 (2). P. 246-250. DOI: 10.1115/1.3424282
3. Bogdanoff J. L., Krieger W. A new cumulative damage model: Part 2. *Journal of Applied Mechanics*. 1978.. Vol. 45. P. 251-257. DOI: 10.1115/1.3424283
4. Lyndhurst Collins. An introduction to Markov chain analysis. *Concepts and Techniques  in  Modern Geography (*CATMOG). London, 1972. N 1. P. 1-36. URL: <https://alexsingleton.files.wordpress.com/2014/09/1-intro-markov-chain-analysis.pdf> (Last accessed: 17.06.2019) [in English].
5. Collins L. Estimating Markov Transition Probabilities from Micro-Unit Data. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1974. Vol. 23. P. 355-371.
6. Paul D. DeStefano, Dimitri A. Grivas. Method for Estimating Transition Probability in Bridge Deterioration Models. *Journal of Infrastructure Systems*. 1998. Vol. 4. Issue 2. P. 56-62. URL: <https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(1998)4:2(56)>
7. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2012. 116 с. (Інформація та документація).
8. JCSS course on Structural Reliability and Probabilistic Model Code & Risk Informed Decision Making and Decision Analysis, 29 June to 4 July 2019. URL: <http://www.jcss.ethz.ch/> (дата  звернення: 17.06.2019).
9. Lantoukh-Liashchenko A. Markov chain models for the residual service life prediction of bridges. 4-th International Conference FOOTBRIDGE 2011: Wroclaw, Poland, 2011. p.1386-1393.
10. Лантух-Лященко А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 1999. Вип. 57. С. 183-188.
11. Лантух-Лященко А. І. Марковские модели накопления повреждений. Наука и искусство*. Промислове будівництво та інженерні споруди.* Київ, 2009. N 2. С. 22-25.
12. Lawrence M. Leemis. Reliability: probabilistic models and statistical methods. Englewood Cliffs, New York State, 1995. 319 р. URL: <https://searchworks.stanford.edu/view/2967879> (дата звернення: 17.06.2019).
13. Melchers R. E. Structural reliability analyssis and prediction: Ellis Horwood, Chichester, 1987. 398 p. URL: <https://doi.org/10.1002/qre.4680040317>
14. Вентцель Е. С. Исследование операций. Москва, 1972. 552 с.

**REFERENCES**

1. Bohdanoff Dzh., Kozyn F. Vieroiatnostnyie modeli nakopleniia povriezhdienii. Moscow, 1989. 344 p. [in Russian].
2. Bogdanoff J. L. A New cumulative damage model - Part 1. *Journal of Applied Mechanics*. 1978. Vol. 45 (2). P. 246-250. DOI: 10.1115/1.3424282 [in English].
3. Bogdanoff J. L., Krieger W. A new cumulative damage model: Part 2. *Journal of Applied Mechanics*. 1978.. Vol. 45. P. 251-257. DOI: 10.1115/1.3424283 [in English].
4. Lyndhurst Collins. An introduction to Markov chain analysis. *Concepts and Techniques  in  Modern Geography (*CATMOG). London, 1972. N 1. P. 1-36. URL: <https://alexsingleton.files.wordpress.com/2014/09/1-intro-markov-chain-analysis.pdf> (Last accessed: 17.06.2019) [in English].
5. Collins L. Estimating Markov Transition Probabilities from Micro-Unit Data. *Journal of the Royal Statistical Society*. Series C (Applied Statistics). 1974. Vol. 23. P. 355-371 [in English].
6. Paul D. DeStefano, Dimitri A. Grivas. Method for Estimating Transition Probability in Bridge Deterioration Models. *Journal of Infrastructure Systems*. 1998. Vol. 4. Issue 2. P. 56-62. URL:  <https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(1998)4:2(56)> [in English].
7. State Standard of Ukraine (DSTU-N B.V.2.3-23:2012) Sporudy transportu. Nastanova z otsinyuvannya i prohnozuvannya tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv. Kyiv, 2012. 116 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
8. JCSS course on Structural Reliability and Probabilistic Model Code & Risk Informed Decision Making and Decision Analysis, 29 June to 4 July 2019. URL: <http://www.jcss.ethz.ch/> (Last accessed: 17.06.2019) [in English].
9. Lantoukh-Liashchenko A. Markov chain models for the residual service life prediction of bridges. 4-th International Conference FOOTBRIDGE 2011: Wroclaw, Poland, 2011. p.1386-1393 [in English].
10. Lantukh-Lyashchenko A. I. Otsinka nadiynosti sporudy za modellyu markovsʹkoho vypadkovoho protsesu z dyskretnymy stanamy. Avtomobìlʹnì dorogi ì dorožnê budìvnictvo. Kyiv, 1999. 57. P. 183-188 [in Ukrainian].
11. Lantukh-Lyashchenko A. Y. Markovskye modely nakoplenyya povrezhdenyy. Nauka y yskusstvo. Promislove budìvnictvo ta ìnženernì sporudni. Kyiv, 2009. N 2. P. 22-25.
12. Lawrence M. Leemis. Reliability: probabilistic models and statistical methods. Englewood Cliffs, New York State, 1995. 319 p. URL: <https://searchworks.stanford.edu/view/2967879> (Last accessed: 17.06.2019) [in English].
13. Melchers R. E. Structural reliability analyssis and prediction: Ellis Horwood, Chichester, 1987. 398 p. URL: <https://doi.org/10.1002/qre.4680040317> [in English].
14. Vienttsiel E. S. Issledovanie opieratsii. Moscow, 1972. 552 p. [in Russian].

**Лантух-Лященко А. І.**, *д-р техн. наук, професор, https://orcid.org/*[*0000-0002-6642-2359*](http://orcid.org/0000-0002-6642-2359)

*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

**МАРКОВСЬКА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ І ПРОГНОЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

***Анотація***

Мета. Мета роботи полягає в розробці універсальної моделі оцінки технічного стану споруди в функції часу експлуатації. Теоретичним базисом розробки моделі стохастичної оцінки технічного стану споруди в процесі експлуатації, є марковська теорія випадкових процесів. Розглядаються феноменологічні моделі кумулятивного накопичення пошкодженого внаслідок природньої деградації елементів в процесі життєвого циклу експлуатації. Знос елемента споруди описується марковським дискретним процесом з неперервним часом.

Деградація елементів в процесі експлуатації розглядається як потік відмов, що фізично є проявом пошкоджень елементів споруди під впливом навантажень і оточуючого середовища. Деградація елементів моста трактується як стаціонарний простійний потік пуассовського типу. Математична модель випадкового процесу з безперервним часом і дискретними станами описується відомими рівняннями Колмогорова=Чепмена. Методика. Теоретичне дослідження процесів деградації елементів мостів виконане в рамках теорії ймовірностей і математичної статистики.

Результати. Отримана модель оцінки і прогнозу технічного стану будівельних конструкцій яка базується на марковській теорії випадкових процесів. Стохастичні моделі накопичення пошкоджень внаслідок природного погіршення, розглянуті в даному документі, є універсальними. Вони теоретично обґрунтовані і мають практичну спрямованість. Ці моделі можуть бути застосовані як ефективний інструмент для оцінки і прогнозування технічного стану та оцінки залишкового ресурсу.

Ключовим аспектом цього підходу є спеціальна процедура оцінки параметра інтенсивності  відмов. Основним недоліком моделі є те, що прийнята основа елементарного потоку з параметром *λ* = const. В нашому випадку, параметр визначається для кожного даного елемента, і кожен раз після наступного обстеження *λ* отримує нове значення, тому точність моделі буде підвищуватися.

Наукова новизна. Виконане дослідження є піонерним. Вперше в системі експлуатації автодорожніх мостів пропонується стохастична оцінка технічного будівельних конструкцій.

Практичне значення. Отримана модель є практичним інструментом управління надійністю і ресурсом будівельних конструкцій.

***Ключові слова:***будівельні конструкції; інтенсивність відмов; марковська модель випадкового процесу, матриця переходів; процес деградації; функція надійності

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

UDK 624.21:625.745.1

## Ihor Babiak, *Ph.D,* [*https://orcid.org/0000-0002-3732-2439*](https://orcid.org/0000-0002-3732-2439)

## Nataliia Bidnenko, [*https://orcid.org/0000-0003-3978-1193*](https://orcid.org/0000-0003-3978-1193)

## Valerii Vyrozhemskyi, *Ph.D,* [*https://orcid.org/0000-0003-2010-1004*](https://orcid.org/0000-0003-2010-1004)

*M. P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – «DerzhdorNDI» SE, Kyiv, Ukraine*

## MODERN EUROPEAN METHODS OF NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSTICS OF BRIDGE STRUCTURES

***Abstract***

Introduction. Various existing methods of non-destructive diagnostics, in particular for diagnostics of bridge structures are analyzed. However, nowadays in different countries of the world the researches are under way on the search for the most informative methods of non-destructive diagnostics of building structures, facilities, in particular bridge structures, which would enable to receive reliable data on the processes occurring in the structures under the influence of various factors.

Problem Statement. Existing methods of non-destructive diagnostics which are used for the diagnostics of bridge structures basically consist in periodic placement of sensors on structures. Having gathered information, the sensors are dismantled. Such actions are repeated as the time of the next inspection comes. In addition, measurements are fulfilled only at the discrete points, as the most devices and equipment have a limited operating range of measurements. The small amount of data received and the long interval between their acquisitions cannot provide signaling about the inevitable disaster that may be caused by various impact factors.

Purpose. The ultimate goal of the international scientific organization FEHRL, within the framework of which the SENSKIN Consortium works, is to develop a system for monitoring bridge structures in the framework of the international research project «SENSKIN» – «Sensing Skin for monitoring-based maintenance on the transport infrastructure».

Conclusions. Participants of the project «SENSKIN», including «DerzhorNDI» SE as a Consortium member, developed the sensors that will collect information on bridges, power supplies, data  transmission and processing modules, software and other components of the bridge structure  monitoring system. At this stage, the prototype of the monitoring system has been tested on the  full-scale objects. Current information on the monitoring system can be found on the website of the  SENSKIN Consortium <http://www.senskin.eu>.

For more reliable operation of non-standard bridges (the bridges which parameters exceed the limit values according to the adopted classification of bridges) in Ukraine, it is necessary to plan the transition to monitoring of bridge structures using the systems that would enable the acquisition of the necessary information about the state of structures in the event of catastrophic situations that will allow avoiding, in particular, the death of people.

***Key words*:** automatic monitoring and management systems, sensor, methods of non-destructive diagnostics, non-standard bridges, monitoring system of bridge structures «SENSKIN».

**Introduction**

At present there are various methods of non-destructive diagnostics, in particular for the diagnostics of bridge structures [1]. However, the studies of the most informative methods of non-destructive diagnostics of building structures, facilities, in particular of bridge structures [2-6] are currently being conducted in different countries of the world. Non-destructive diagnostic methods should provide reliable data on the processes occurring in structures under the influence of various impact factors. These data should be sufficiently precise, and the expected errors should not exceed the permissible values. The received data during the diagnostics of bridge structures should be of sufficient volume for making correct decisions regarding the technical condition of bridge structures. The equipment and devices used to diagnose bridge structures should work reliably in different climatic conditions in which the bridge structures are found throughout their life cycle.

**Monitoring of the structural state of bridges**

***Monitoring of the structural state of civil engineering infrastructure of Ukraine.***

Monitoring of the structural state of civil engineering infrastructure of Ukraine, in particular of bridges is carried out in accordance with state building regulations (DBN). The main document in Ukraine on this issue is DBN B.1.2-14-2009 [7]. It establishes general principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, facilities, building structures and foundations on the basis of the regulation of the reliability of their constituent parts during all stages of the life cycle of a construction object.

In order to achieve and maintain the necessary level of reliability and safety, in accordance with the DBN, it is necessary to effectively monitor and control the structural state of civil infrastructure objects at all stages of the life cycle of structures, buildings and facilities.

The purpose of the monitoring is to verify the compliance of the actual characteristics of the object with the requirements established for it.

The process of creation and use of the object and the results of the implementation of these processes are subject to monitoring, namely:

* execution of surveying works;
* project development;
* manufacture of materials and products;
* construction of a building object;
* technical operation, repairs, reconstruction.

The results of the control are used to make decisions about the possibility of completing the process or using its results or eliminating the detected non-conformity.

In the period of the construction and operation of the facility for the prevention of accidents, timely detection of damage and other defects, as well as for improvement of operating conditions, it is necessary to provide continuous inspection (monitoring) of the state of the object and adjacent territory.

The objects which destruction can lead to catastrophic consequences are equipped with automatic monitoring and control systems (ASMU). The ASMU must include a system of technical diagnostics of building structures which includes the following devices protected from damage:

* + primary devices for obtaining information regarding the change of position (displacement) and state (deformation, temperature, etc.) of the inspected object;
  + secondary devices for the processing of the received information (for example, computer system of the analysis of the state of the object, containing control standards and rules of decision-making);
  + signaling devices;
  + lines of communication between equipment and devices.

The necessity of applying such systems and requirements to them should be established by the design norms or rules of operation of the relevant objects.

Currently, such monitoring systems have not been used for bridges.

***Analysis of the need for monitoring of bridge structures using non-destructive diagnostics on an example of real objects.***

In Ukraine, in accordance with current norms, the technical status of bridges is monitored during their life cycle [7, 8, 9].

Monitoring of the technical condition of bridges is carried out by the survey experts.

The survey expert, at the initial monitoring stage, periodically examines the bridge structures. The nature of the damage to the bridge structures is determined. In the case of detecting defects, the expert may decide on the need for a survey or test of the bridge using the devices and equipment.

The objects which failure (deterioration can lead to catastrophic consequences include, in particular, bridges, tunnels located on the main streets in the cities, since the failure of such an object can lead, for example, to the transport collapse of the entire neighborhood unit of the city. Below are the examples of such monitored objects.

For example, Figure 1 shows photos of bridge structures after a fire, as in the case of an overpass  near the Shuliavska metro station in Kyiv. Here, in the course of the initial inspection, the defects of the concrete of the protective layer, of the fittings of the girders and the beams of the spans were detected [10].

|  |  |
| --- | --- |
| PICT0039 | PICT0037 |
| *a* | *b* |

***Figure 1*** *–* Overpass structures near the Shulyavskaya metro station in Kyiv after a fire

The overpass consists of 17 spans of the split system.

Subsequently, the employees of the «DerzhdorNDI» State Enterprise carried out a special inspection of the overpass which was exposed to the fire. A special survey was carried out due to the deterioration of the technical condition of the three supports and three spans.

According to the results of research carried out on the construction of an overpass I was found  out that in the spans 8 – 9, 9 – 10, 10 – 11 the greatest damage from the fire impact structures in the 8 – 9, 9 – 10 spans had undergone, and less damage was caused by the spans 10 – 11.

The duration of the fire, in accordance with the technical concclusion on the study of the causes of the fire, was of 78 – 85 minutes. At the same time, the data when the traffic on the overpass was blocked is not given in the report.

Specimens of concrete (corse) were taken to assess the impact of the fire on the strength of the structures of the overpass. The samples were taken from the body of the supports that were damaged and not damaged by the fire, in order to compare the characteristics of the concrete. Also, the samples were taken from the transverse beams’ diaphragms .

Measurements of the deflections (vertical displacements) of the lower beams’ booms in the 8 – 9 – 10 – 11 spans and the measurements in the spans that were not damaged by the fire were made to determine their possible increase and compliance with the admissible values.

In order to evaluate the influence of defects on the bearing capacity of the overpass structures, the static and dynamic tests were conducted.

During static tests the following was measured:

* deflections (vertical displacements) by mechanical devices (scale spacing was 0,01 mm) and an optical-digital leveler (scale spacing of the leveling rod was 1,0 mm);
* deformations (mechanical strain gauges) (price of the leveling rod was 0.004 mm);
* acoustic emission signals (software-technical complex «AKEM» on the basis of a personal computer).

Acoustic emission converters were installed on the concrete surfaces of beams of the spans structures that were damaged and, for comparison, not damaged by the fire in the middle of the span and on the console of the 9 th girder of the support.

During the dynamic tests the following was measured:

* mechanical vibrations on the surface of the bridge decking in the middle of the span over one of the beams using (software and hardware complex «FREQS»).

As a result of the fulfilled work, the conclusions were obtained, some of which are presented below:

* as a result of the visual inspection and the results of dynamic tests, it was found out that 8 – 9, 9 – 10 spans were the most damaged by the fire, the spans 10 – 11 were less damaged;
* the limiting load on the damaged spans of the overpass is as follows: for a motor vehicle load in a column is 10 ton-force, the permissible load on the axle of the car is 7 ton-force;
* the results of the survey of the overpass indicate that at the stated load levels due to changes in the characteristics of materials under the influence of high temperatures the initiation and development of the chanses on the macro level will occur;
* the overpass needs reconstruction including replacing and strengthening the supports of the spans 8, 9, 10 and the beams of the spans 8 – 9, 9 – 10, 10 – 11, according to a specially designed project.

For further temporary operation of the facility, the following preventive measures were taken to strengthen the structures damaged by the fire in order to avoid an emergency:

* urgent measures to be taken for traffic management in order to comply with the operating conditions of the structure in accordance with the established restrictions on the load for trafffic;
* after that, the structures for the reinforcement of the supports 8, 9, 10 and the beams of the spans 8 – 9, 9 – 10, 10 – 11 were installed according to a specially designed project;
* to strengthen the supports and the beams, at least once a week, the check tests of the state of damaged bearing structures should be carried out;
* after the construction of the reinforcement structures in 2007, the restrictions on the dimensions of the bridge decking and load capacity were removed;
* during the operation of the overpass with a temporary reinforcement in order to ensure its trouble-free operation, once a month, the check tests are carried out.

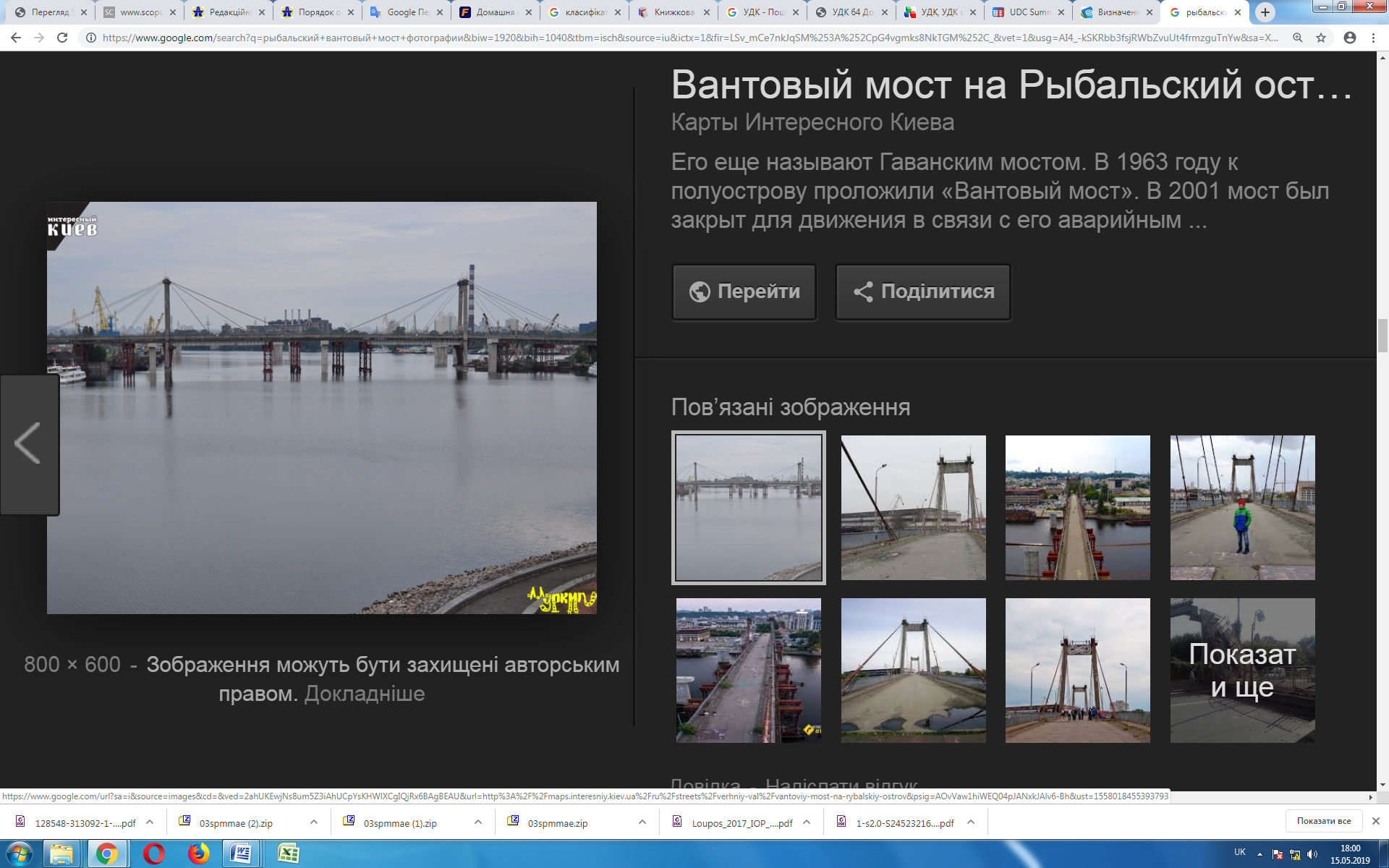
As noted above, in the presence of equipment and highly qualified specialists, «DerzhdorNDI» State Enterprise managed to carry out a special inspection of the fire superstructure and to develop preventive measures to strengthen the structures damaged by the fire in order to avoid an emergency. In this case, in particular, the deflections of bearing structures were determined; it was found out which of the structures of the spans were the most damaged; in what structures and how much the carrying capacity and stiffness decreased. To do this, instrumental measurements were carried out on both, damaged and non-damaged structures. It should be noted that the survey work was carried out extremely quickly (immediately after the fire), since the closed bridge virtually paralyzed the traffic in the whole microdistrict of the city. At the same time, although the works were carried out with the observance occupational safety, it was necessary to work on the remnants of fire, where there was still fumigation, including at night.

Another example of the collapse of the bridge which considerably complicated the pedestrian connection of the neighborhoods of the city's districts is the collapse of the bridge across the Dnipro Harbor in Kyiv (Figure 2).

Here, the damage to the bridge structures arose as a result of prolonged operation. For example, after prolonged operation, the defects in the structures, in particular, the cable stays of the bridge over the Harbor of the Dnipro River in Kyiv (Figure 2), were found.

Unfortunately, due to various reasons, the survey of the bridge structures was not carried out timely. Accordingly, the repair works were not performed in time. As a result, the propagation of defects occurred which led to the gradual weakening of the bridge and its failure.

In the case of a monitoring system availability (monitoring system which would provide the data on, for example, cable stays deformation) of the structures of this object prior to the occurrence of irreversible deformation of the cable stays, it would be possible to receive timely information on the damaged cable stays. Subsequently, if required, to perform a special survey, repair (or replacement) of the cable stays, thereby extending the bridge operation term.



*а*

**

*b*

***Figure 2*** – Damage of the bridge structures over the harbor of the Dnipro River in Kyiv due to prolonged operation

Taking into account the above, one can note the advantages of having a monitoring system on the objects of transport facilities:

* in case of a fire, it is possible to react quickly to the situation, in particular, with regard to limiting or closing the traffic on the bridge, which will protect people's life and health. In addition, often an expert can not access all necessary parts of the facility to obtain the necessary information;
* in the event of failure of defining (bearing) structures, it is possible to quickly obtain information on which structures have been out of order;
* during monitoring it is possible to receive notification about the critical values of deformations caused by damage or deterioration of structures. In this case, the monitoring experts are at a safe distance from the monitoredg facility;
* it is possible to obtain data on the deformations of the defining elements during operation and to establish their conformity with the admissible values without closing the traffic for the time of inspection or testing;
* the possibility of prolonged operation of the monitoring system's sensors and their stable operation, including under the influence of repeatedly deformations, allows receiving a considerable amount of information about the state of the structure with relatively low costs on the sensor.

**Methods of diagnosing the technical state of the bridges**

It is possible to use equipment that measures deformations in structures. These are various strain gauge complexes and mechanical devices.

Other type of equipment is the equipment, the work principle of which is based on the measurement of acoustic emission signals (AE). Acoustic emission (AE) is a phenomenon which is based on the emission of elastic waves in solids due to the local and dynamic rearrangement of the internal structure of the material. Block scheme of registration of AE signals is shown in Figure 3.

|  |
| --- |
|  |
| ***Figure 3*** – Block scheme of registration of AE signals: 1 – the studied element (structure) which is under the influence of F; 2 – wave conductor; 3 – АЕ sensor; 4 – amplifier; 5 – computer connection port; 6 – PC |

Such equipment records the formation and development of defects, in particular, the occurrence and propagation of cracks.

The employees of the State Enterprise «DerzhdorNDI» developed methods for determining the characteristics of building products and structures using the AKEM equipment which allow the determining of micro- and macro cracks formation in metal material or in the reinforced concrete structures.

Figure 4 shows the general view of the software and hardware complex «AKEM».

|  |
| --- |
| 1 |
| ***Figure 4*** − General view of the software and technical complex «AKEM» |

Tests within the monitoring can be performed both during the day and at night depending on the object of the monitoring.

Several parameters are used to analyze the signals. One of these parameters is the coefficient Kp of AE signals.

Figure 5 shows a graph of changes in the coefficient Kp of AE signals that were recorded during  testing the bridge span. The temporary load on the bridge span according to the loading scheme is one car.

|  |
| --- |
|  |
| ***Figure 5*** − Graph of changes in the coefficient Kp of AE signals that were recorded during testing the bridge span |

In this case, according to the results of the conducted researches using the AE method, it is established that the temporary load on the bridge span created during static tests causes the formation of micro and macro cracks in the metal structure. A limit for structure loading was determined, the excess of which can create dangerous propagation of defects which were available in structures that could lead to an emergency situation.

Also, other parameter that can signal on the presence and propagation of defects can be the parameter «accumulation of energy of signals of acoustic emission» (Figure 6).

|  |
| --- |
|  |
| ***Figure 6*** – Graph of changes in the parameter «accumulation of energy of signals of acoustic emission» depending on the values of the applied load which were recorded during the test of the bridge span |

Changing the value of this parameter reflects the technical state of the structure. For example, during the analysis of this parameter it was established that the values of the energy of the acoustic emission signals recorded in the material of the structures of the bridge span before the reinforcement of structures significantly exceeds the energy of the acoustic emission signals after reinforcement.

The AE method is one of the methods for diagnosing the bridges state. Diagnostic methods developed based on it can be effectively used for monitoring the technical state of the bridges.

**Modern European methods of non-destructive diagnostic of bridge structures**

***Project «SENSKIN».***

The international scientific organization FEHRL have been developing a system for monitoring the bridge structures in the framework of the international research project «SENSKIN» – «Sensing Skin for monitoring-based maintenance on the transport infrastructure» within the European Commission Program HORIZON 2020.

SENSKIN is an EC co-funded project that operates in the framework of EC-FP7-Transport (MG-8.1a-2014 - Smarter design, construction and maintenance). SENSKIN includes a consortium with all the expertise needed in the lifecycle from research to innovation, as well as real-life end-users that can provide solid feedback on the project results. The list of partners of the consortium has been presented below:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Partner Name | Short Name | Country |
| Institute of Communication and Computer Systems | ICCS | Greece |
| University of Potsdam, Applied Condensed-Matter Physics Group | UP | Germany |
| Egnatia Odos A.E. | EOAE | Greece |
| RISA Sicherheitsanalysen GmbH | RISA | Germany |
| TECNIC S.p.A. | TECNIC | Italy |
| Democritus University of Thrace | DUTH | Greece |
| Mistras Group Hellas A.B.E.E. | MGH | Greece |
| University of Stuttgart | USTUTT | Germany |
| TRL Limited, Transport Research Laboratory | TRL | UK |
| State Enterprise State Road Scientific Research Institute | DNDI | Uktraine |
| Forum Des Laboratoires Nationaux Europeens De Recherche Routiere | FEHRL | Belgium |
| Teletronic Rossendorf GmbH | TTRONIC | Germany |
| Turkish General Directorate of Highways | KGM | Turkey |

The participants of the project, a member of which is also the DerzhdorNDI SE, at different stages of the project solve different tasks such as development of the requirements for the method of non-destructive diagnostics of bridge structures. It included collecting and analyzing the data on existing approaches for monitoring the bridge structures state in different countries by the project participants: which devices, equipment, monitoring methods are used in this case; who carries out monitoring of bridge structures in different countries and with what difficulties, in this case, performers of works face. The  result of this data collection and analysis was the work tasks for further development of the monitoring system for bridge structures approved by the project participants.

At the next stages, the project participants developed a sensor that will collect information on bridge structures, power supplies, data modules, software and other components. Particular attention was paid to the development of sensors because the task was to develop quite universal sensors which can be used for monitoring the concrete, reinforced concrete and metal structures of bridges. For this purpose, a multilevel method of checking the characteristics of the sensors was used: the mechanical properties of the sensors were determined in the laboratory. The further studies were carried out on the location of the sensors on the samples that simulated the bridge structures. At the final stage, the study of the sensors on the full scale structures was carried out.

At the current stage, a prototype of the monitoring system which was approbated on full scale objects was manufactured. Relative information on the monitoring system can be found on the website of the SENSKIN Consortium <http://www.senskin.eu>.

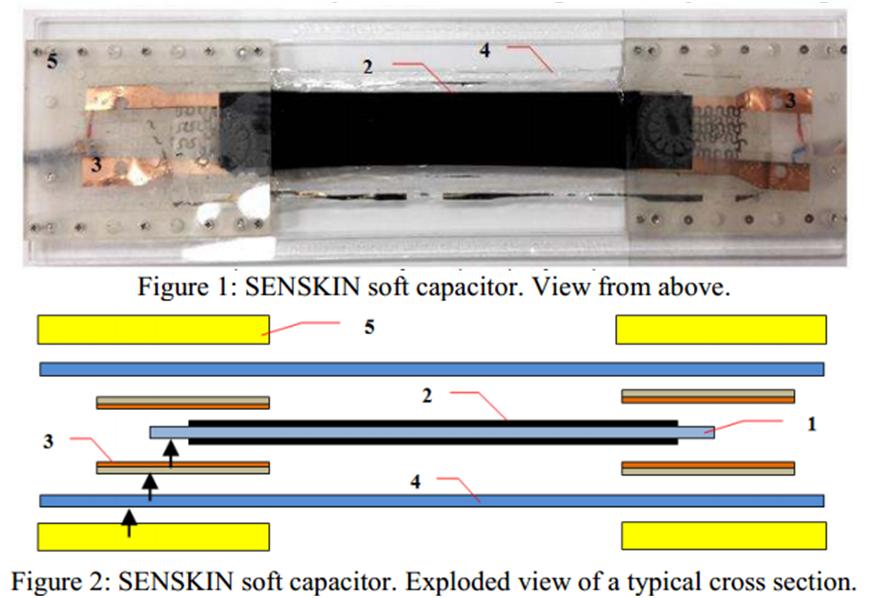
***«SENSKIN» sensor.***

The SENSKIN system consists of a sensor similar to dielectric elastomers and microelectronics based on the use of a large expandable membrane with a sensitive capacity. The sensor ensures spatial measurement of the strains exceeding the values of 10%, it has several advantages in comparison with the similar sensors such as: needs low power for operation, easy to install, has a comparable or less cost than conventional strain sensors, allows simple signal processing, has the opportunity of independent monitoring and reporting. The system supports the network technology which ensures that received stresses measurements reach the base station even under extreme conditions where communication can fail. The SENSKIN project also develops a decision support system (DSS) for proactive structural interventions based on conventional operational conditions and response emergency measures in case of accident. Assessing the potential rehabilitation options, DSS will use the data provided by SENSKIN sensors along with extended models of structural analysis taking into account the economic, social and environmental impacts of the lifecycle.

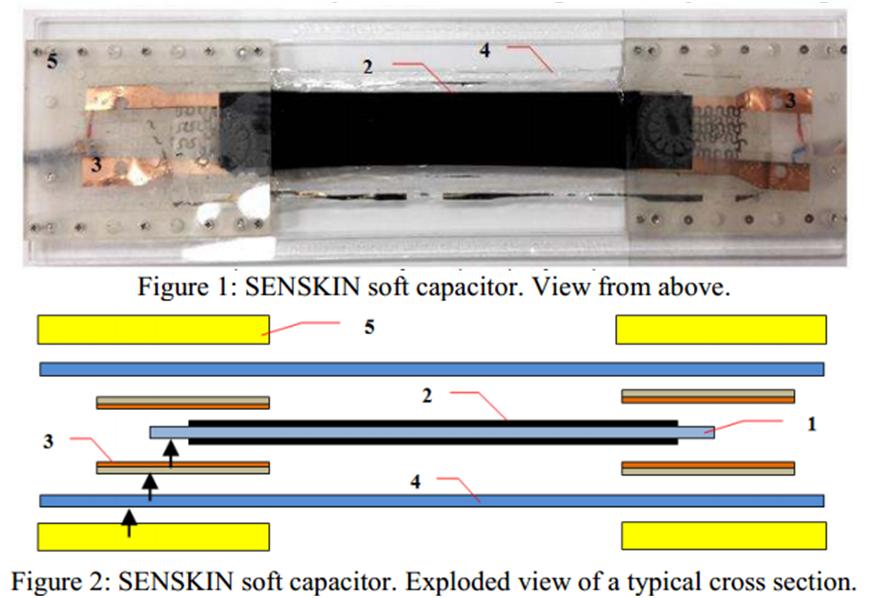
The principle of work of a skin-like sensor is based on the periodic measurement (monitoring) of changes in capacity caused by the strain of the sensor. It is well known that capacity C of a parallel plate capacitor can be presented as follows:

C = εε0 A / d (1)

where A is the area of the capacitor, d is its thickness, and ε and ε0 are the relative dielectric penetration of the material of the sensor (i.e., the capacitor dielectric) and the vacuum dielectric penetration in the SI system, respectively. If any of the above parameters changes, the capacity will also change. Thus, if the capacitor is attached to any substrate, the strain of the substrate leads to a change in the capacity of the sensor. For recording the large strains of the substrate, the capacitor must be fairly soft, that is, it should be able to change its linear dimensions within the elastic strain, and the electrodes must also remain conductive throughout the designed or expected range of movement. In order to meet these requirements, a soft capacitive sensor which is manufactured from silicone rubber films with corresponding electrodes was developed. Since the elastomeric material is essentially incompressible, an increase in the area A in equation (1) will necessarily be associated with a decrease in thickness d. Both combined processes lead to a linear increase in capacity when the sensor is stretched, for example, in length or width. The view of the capacitive sensor and its design can be seen in Figure 7.

****

*a)*

**

*b)*

***Figure 7*** – *a)*: SENSKIN sensor (top view); *b)*: SENSKIN sensor (design scheme): 1 – silicone film; 2 – conductive layer (with a type electrical resistance of 0.1 – 10 kOm per 15 cm in length); 3 – electrical contacts connected to the conductive layer; 4 – silicone protective layer which seals the sensor; 5 – external frames used for mounting the sensor in the test device

**Sensor parameters:** Active electrode area is 15x3 cm2. The capacity without pretension is from 2.3 to 2.5 nF. Typically, the sensitivity is from 2 to 2.5 fF / micro strain. The resistance of the electrodes varies within 0,02-0,07 Om / micro strain. Being made from soft elastomeric materials, sensitive capacitors can withstand mechanical stresses that exceed 300 % without losing their integrity. It is proved that the electric characteristics of the sensor perform well within 100 % of its strain.

***Data collection system.***

The challenge for data collection is the measurement of relatively small changes in capacities caused by stretching compared to the large basic capacity of the sensitive element of the SENSKIN sensor. The limitation for the data collection system is the relatively high contact resistance of the sensor which varies from 100 Om to 10 kOm. Thus, for data collection there is a need in capacity for digital convector (CDC) with a high resolution and a huge dynamic range. The data collection system module consists of an analog part and the next digital signal processor (DSP). The DSP module provides processing of the low-level signals as average value and supports the adaptation of sensor parameters, as well as the requirements for measuring technology by programming at the assembler level. The time of discharge of the internal circuit resistor and the unknown capacity of the sensor, on the one hand, and the control capacitor, on the other hand are measured from the analog part. The sensor capacity is determined by comparing the discharge cycles. The disadvantage of this measurement principle is the resistances of the tensile electrode of a sensitive capacitor which significantly impacts on the measurement result. Therefore, the system that includes the sensor must be calibrated and the calibration results must be recorded in the DSP. The data collection system is located on the investigated structure, at a certain distance from the sensor.

***Communication system of SENSKIN.***

SENSKIN communication system is based exclusively on wireless telecommunication technologies.

SENSKIN communication system consists of three different elements:

1. SENSKIN nodes. These are SENSKIN devices located at different places of the bridge (bridge parts). Each SENSKIN device is equipped with a communication module.
2. SENSKIN gateways. They are a platform for intermediate software for the interconnection of the deployed SENSKIN network with a remote administration tool.
3. SENSKIN security nodes. Their main difference is that they are mobile.

***Control system in SENSKIN.***

At this stage, the work is underway to improve the control system in SENSKIN which includes the calculation modules, the formation of the SENSKIN database structure, the development of the end-user interface, the module of measurement data processing obtained from the sensors. All of these modules are initerlinked through a control module. The control module provides efficient and accurate data exchange between individual applications.

The SENSKIN database, as the central repository of information, provides relevant input data and obtains output from calculation or information modules (e.g., sensor data, environmental and economic profiles, status states for various bridge elements, etc.).

The user interface serves to graphically visualize the results.

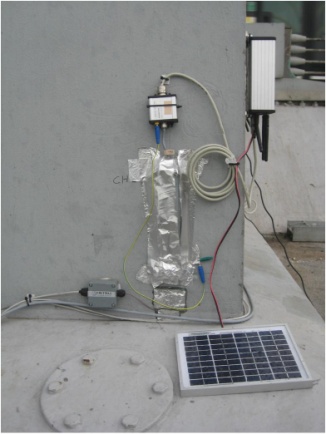
**Approbation of the measuring equipment for monitoring the technical state of the bridges «SENSKIN» (Sensing Skin) on the bridge over the Bosporus (Istanbul, Turkey)**

In May 2018, approbation of the measuring equipment for monitoring the technical state of the bridges was carried out. Approbation was performed on the cable bridge over the Bosporus (Figure 8).



***Figure 8*** – General view of the bridge over Strait of the Bosporus

The sensors and other elements of measuring equipment were located on the bridge structures over the Bosporus (Figure 9).



***Figure 9*** – «SENSKIN» sensor, solar cell, data modules are placed on the surface of the bridge  pylon

The «ENSKIN» sensors were placed both on the opposite sides of the bridge footing and on the lateral part of the bridge footing. The expert's workplace was equipped in the middle of the bridge pylon bearing.

The results of the measurements of the «SENSKIN» sensors were displayed on the monitor in the form of graphs (Figure 10, a) and data tables (Figure 10, b) by using specially designed software.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| *а)* | *b)* |

***Figure 10*** − The results of the measurements of the «SENSKIN» sensors on the monitor:  *а)*graphs; *b)* data tables

Conventional strain sensors were placed alongside the SENSKIN sensors to perform parallel measurements that were forwarded to the central SENSKIN database and were used to evaluate and compare the technical characteristics of the SENSKIN sensors. The sensor was evaluated in comparison with the conventional tensor strain gauges in terms of the quality of measurements: accuracy, sensitivity, noise threshold; useful measuring range; the sensor’s response on the changes in temperature and humidity; strength, durability and lifecycle of the sensor during cyclic loading and weather conditions. The technical and operational performance of the whole SENSKIN system which consists of SENSKIN sensors, data acquisition system modules, communication elements and data transmission, was assessed. Ease of use of the entire system, interpretation of the source data of the system to support engineering assessment and the ability to self-control and self-assessment of hardware and software malfunctions was also assessed.

By the use of «SENSKIN» equipment, the data on the operation of the bridge structure elements  were obtained. Further, the obtained data will be analyzed by the specialists involved in the SENSKIN project.

**Conclusions**

1. The international scientific organization FEHRL have been developing a system for monitoring the bridge structures in the framework of the international research project «SENSKIN» – «Sensing Skin for monitoring-based maintenance on the transport infrastructure» within the European Commission Program HORIZON 2020.
2. The participants of the project, a member of which is also the DerzhdorNDI SE, developed a sensor that will collect information on bridge structures, power supplies, data modules, software and other components of monitoring system of the bridge structures.
3. At the current stage, a prototype of the monitoring system which was approbated on full scale objects was manufactured. Relative information on the monitoring system can be found on the website of the SENSKIN Consortium <http://www.senskin.eu>
4. For more reliable operation of non-standard bridges (the bridges which parameters exceed the limit values according to the adopted classification of bridges) in Ukraine, it is necessary to plan the transition to monitoring of bridge structures using the systems that would enable the acquisition of the necessary information about the state of structures in the event of catastrophic situations that will allow avoiding, in particular, the death of people.

For carrying out the monitoring in addition to the necessary equipment the following issues need to be solved:

* providing the arrangement of stationary monitoring systems on the non-stzndard bridges that  would inform on the emergency situations (eg critical deformation of structures, the rise of water  level, etc.);
* improvement of regulations on the order of data provision according to the monitoring results (clarification of the passport of the bridge which contains information on existing defects and their volume). It is needed for further planning of bridges repairs.

**Список літератури**

1. Коваль П. М. Вдосконалення системи утримання автодорожніх мостів України. *Дороги і мости*. Київ, 2009. Вип. 11. С. 133-145. URI: <http://dorogimosti.org.ua/ua/vdoskonalennya-sistemi-utrimannya-avtodoroghnih-mostiv-ukrayini> (дата звернення: 31.07.2019).
2. [Panetsos Panagiotis,](https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/browse?type=author&value=Panetsos%2C+Panagiotis) [Ntotsios, Evangelos,](https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/browse?type=author&value=Ntotsios%2C+Evangelos) [Liokos, Nikolaos-Aggelos,](https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/browse?type=author&value=Liokos%2C+Nikolaos-Aggelos) [Papadimitriou, Costas.](https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/browse?type=author&value=Papadimitriou%2C+Costas) Identification of dynamic models of Metsovo (Greece) Bridge using ambient vibration measurements. 2nd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering - COMPDYN 2009 (22-24 June, Rhodes, Greece). Rhodes, 2009. P. 456-468. URI: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10771>(дата звернення: 14.05.2019).
3. Konstantinos Loupos, Angelos Amditis, Athanasia Tsertou, Yannis Damigos, Reimund  Gerhard, Dmitry Rychkov, Werner Wirges, Vassilis Kalidromitis, Stephanos Camarinopoulos, Sotiris  Angelos Lenas, Vassilis Tsaoussidis, Athanasios Anastasopoulos, Katrin  Lenz, Sarah Schneider, Mike  Hill, Adewole Adesiyun, Bernd Frankenstein. Skin-like sensor enabled bridge  structural health  monitoring system. 8th European workshop on structural health monitoring - EWSHM 2016 (5-8 July  2016, Spain, Bilbao). Bilbao, 2016. URI: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=19908> (дата звернення: 14.05.2019).
4. Cheilakou E., Tsopelas N., Anastasopoulos A., Kourousis D., Rychkov D., [Gerhard](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) R., [Frankenstein](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) B., [Amditis](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) A., [Damigos](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) Y., [Bouklas](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) C. Strain monitoring system for steel and concrete structures. [1st International Conference of the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials (10-12 May 2018, Greece, Athens). Athens, 2018. URL: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.005 (дата звернення: 14.05.2019).](1st%20International%20Conference%20of%20the%20Greek%20Society%20of%20Experimental%20Mechanics%20of%20Materials%20(10-12%20May%202018,%20Greece,%20Athens).%20Athens,%202018.%20URL:%20https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.005%20(дата%20звернення:%2014.05.2019).)
5. Konstantinos Loupos, Yannis Damigos, Angelos Amditis, Reimund Gerhard, Dmitry Rychkov, Werner Wirges, Manuel Schulze, Sotiris-Angelos Lenas, Christos Chatziandreoglou, Christina M. Malliou, Vassilis Tsaoussidis, Ken Brady, Bernd Frankenstein. Structural health monitoring system for bridges based on skin-like sensor. IOP Conference Series: Materials Science and  Engineering. Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 - BESTInfra2017 (21–22 September 2017, Prague, Czech Republic). Prague, 2017. Vol. 236. 012100. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012100> (дата звернення: 14.05.2019).
6. Antonia Gordt, Stephanie Maier, Kristina Henzler, Stephanos Camarinopoulos, Vassilis Kallidromitis, Corrado Sanna, Panagiotis Panetsos, Theodora Karali, Kostas Bouklas. Proactive condition-based bridge rehabilitation planning including LCA and LCC. 5th international conference on road and rail infrastructure - CETRA 2018 (17–19 May 2018, Croatia, Zadar). Zadar, 2018. URL: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.650> (дата звернення: 14.05.2019).
7. ДБН В.1.2-14-2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ, 2018. 30 c. (Інформація та документація).
8. ДБН В.1.2-5:2007 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. Київ, 2007. 16 c. (Інформація та документація).
9. ДБН В.2.3-6:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. Київ, 2009. 63 c. (Інформація та документація).
10. Коваль П. М., Сташук П. М., Фаль А. Є., Полюга Р. І., Бабяк І. П. Дослідження технічного стану естакади в м. Києві, пошкодженої пожежею. *Дороги і мости*, Київ, 2007. Вип. 7. С. 288-297.

**REFERENCES**

1. Petro Koval. Upgrading the system of maintenance of highway bridges of   Ukraine.   *Dorogi   і mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2009. 11. P. 133-145. URI:  <http://dorogimosti.org.ua/ua/vdoskonalennya-sistemi-utrimannya-avtodoroghnih-mostiv-ukrayini> (Last accessed: 31.07.2019) [in Ukrainian].
2. Panetsos Panagiotis, Ntotsios, Evangelos, Liokos, Nikolaos-Aggelos, Papadimitriou, Costas. Identification of dynamic models of Metsovo (Greece) Bridge using ambient vibration measurements. 2nd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009), Rhodes, Greece, 22-24 June. Rhodes, 2009. P.456-468. URI: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10771> (Last accessed: 14.05.2019) [in English].
3. Konstantinos Loupos, Angelos Amditis, Athanasia Tsertou, Yannis Damigos, Reimund  Gerhard, Dmitry Rychkov, Werner Wirges, Vassilis Kalidromitis, Stephanos Camarinopoulos, Sotiris  Angelos Lenas, Vassilis Tsaoussidis, Athanasios Anastasopoulos, Katrin  Lenz, Sarah  Schneider, Mike  Hill, Adewole Adesiyun, Bernd Frankenstein. Skin-like sensor enabled bridge structural health monitoring system. 8th European workshop on structural health monitoring (EWSHM  2016), 5-8 July 2016, Spain, Bilbao. Bilbao, 2016. URI: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=19908> (Last accessed: 14.05.2019). [in English].
4. Cheilakou E., Tsopelas N., Anastasopoulos A., Kourousis D., Rychkov D., [Gerhard](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) R., [Frankenstein](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) B., [Amditis](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) A., [Damigos](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) Y., [Bouklas](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618300532#!) C. Strain monitoring system for steel and concrete structures. [1st International Conference of the Greek Society of Experimental Mechanics of Materials (10-12 May 2018, Greece, Athens). Athens, 2018. URL: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.005 (Last accessed: 14.05.2019)](1st%20International%20Conference%20of%20the%20Greek%20Society%20of%20Experimental%20Mechanics%20of%20Materials%20(10-12%20May%202018,%20Greece,%20Athens).%20Athens,%202018.%20URL:%20https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.005%20(Last%20accessed:%2014.05.2019)). [in English].
5. Konstantinos Loupos, Yannis Damigos, Angelos Amditis, Reimund Gerhard, Dmitry Rychkov, Werner Wirges, Manuel Schulze, Sotiris-Angelos Lenas, Christos Chatziandreoglou, Christina M. Malliou, Vassilis Tsaoussidis, Ken Brady, Bernd Frankenstein. Structural health monitoring system for bridges based on skin-like sensor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 - BESTInfra2017 (21–22 September 2017, Prague, Czech Republic). Prague, 2017. Vol. 236. 012100. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012100> (Last  accessed: 14.05.2019) [in English].
6. Antonia Gordt, Stephanie Maier, Kristina Henzler, Stephanos Camarinopoulos, Vassilis Kallidromitis, Corrado Sanna, Panagiotis Panetsos, Theodora Karali, Kostas Bouklas. Proactive condition-based bridge rehabilitation planning including LCA and LCC. 5th international conference on road and rail infrastructure - CETRA 2018 (17–19 May 2018, Croatia, Zadar). Zadar, 2018. URL: <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2018.650> (Last  accessed: 14.05.2019) [in English].
7. State Building Norms (DBN V.1.2-14-2018) General principles for reliability and constructive safety ensuring of buildings and civil engineering works. Kyiv, 2018. 30 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
8. State Building Norms (DBN V.1.2-5:2007) Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obiektiv. Naukovo-tekhnichnyi suprovid budivelnykh obiektiv (System of reliability and safety of building objects. Scientific and technical support of construction objects). Kyiv, 2007. 16 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
9. State Building Norms (DBN V.2.3-6: 2009) Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia (Constructions of transport. Bridges and pipes. Inspection and testing). Kyiv, 2009. 63 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
10. Koval P. M., Stashuk P. M., Fal A. Ye., Poliuha R. I., Babiak I. P. Doslidzhennia tekhnichnoho stanu estakady v m. Kyievi, poshkodzhenoi pozhezheiu (Investigation of the technical condition of the overpass in Kyiv, damaged by a fire). *Dorogi і mosti.* Kiev, 2007. 7. P. 288-297 [in Ukrainian].

**Бабяк І. П.**, *канд. техн. наук,*[*https://orcid.org/0000-0002-3732-2439*](https://orcid.org/0000-0002-3732-2439)

**Бідненко Н. М.**, [*https://orcid.org/0000-0003-3978-1193*](https://orcid.org/0000-0003-3978-1193)

**Вирожемський В. К.**, *канд. техн. наук,*[*https://orcid.org/0000-0003-2010-1004*](https://orcid.org/0000-0003-2010-1004)

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені  М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

**СУЧАСНИЙ ЄВРОПЕЙСЬКИЙ МЕТОД НЕРУЙНІВНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

**МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

***Анотація***

Вступ. Проаналізовано різні існуючі методи неруйнівної діагностики, зокрема, і для діагностики мостових конструкцій. Проте, в даний час в різних країнах світу продовжують виконуати дослідження щодо пошуку найбільш інформативних методів неруйнівної діагностики будівельних конструкцій, споруд, зокрема, мостових конструкцій, які б давали можливість отримувати достовірні дані щодо процесів, які відбуваються в конструкціях під дією різних факторів пливу.

Проблематика. Існуючі методи неруйнівної діагностики, які використовуються для діагностики мостових конструкцій, полягають, в основному, у періодичному розміщенні давачів на конструкціях. Зібравши інформацію, давачі демонтуються. Такі дії повторюються, коли настає час наступного обстеження. Крім того, вимірювання виконують тільки в дискретних точках, більшість приладів та обладнання мають обмежений робочий діапазон вимірювань. Мала кількість отриманих даних та великий інтервал між їх отриманням не можуть забезпечити сигналізацію про неминучу катастрофу, яка може бути спричинена різними факторами впливу.

Мета. Кінцевою метою Міжнародної наукової організації FEHRL, в рамках якої працює Консорціум «SENSKIN» є розроблення системи моніторингу мостових конструкцій в рамках міжнародного науково-дослідного проекту «SENSKIN» (Чутлива шкіра) для технічного обслуговування на основі моніторингу транспортної інфраструктури.

Висновки. Учасниками проекту «SENSKIN», членом якого є ДП «ДерждорНДІ», розроблено давачі, які збиратимуть інформацію з конструкцій мостів, джерела живлення, модулі передачі та обробки даних, програмне забезпечення та інші компоненти системи моніторингу мостових конструкцій. На даному етапі апробовано прототип системи моніторингу на натурних об’єктах. Актуальну інформацію щодо системи моніторингу можна знайти на сайті Консорціуму «SENSKIN» <http://www.senskin.eu> .

Для більш надійної експлуатації позакласних мостів (мостів, параметри яких перевищують граничні значення згідно з прийнятою класифікацією мостів) в Україні необхідно планувати перехід на моніторинг мостових конструкцій із використанням систем, які б давали можливість отримувати необхідну інформацію про стан конструкцій у випадку виникнення катастрофічних ситуацій, що дасть можливість уникнути, зокрема, загибелі людей.

***Ключові слова:*** автоматичні системи моніторингу і управління, давач, методи неруйнівної діагностики, позакласні мости, система моніторингу мостових конструкцій «SENSKIN».

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 624.4:539.374

## Бабков О. В., *канд. техн. наук,* [*https://orcid.org/0000-0001-5075-4239*](https://orcid.org/0000-0001-5075-4239)

## Дехтяр А. С., *д-р техн. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0002-6838-0770*](https://orcid.org/0000-0002-6838-0770)

*Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури, м. Київ, Україна*

## МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

***Анотація***

Вступ. Публікації останніх роки свідчать про інтерес фахівців до проблеми експлуатації будівельних конструкцій. Він викликаний недостатнім фінансуванням, що веде до накопичення об'ємів відкладених ремонтів, було навіть запропоновано вводити в несні конструкції сигнальні елементи, поведінка яких змушувала б замислитися про початок розумної експлуатації.

Проблематика. У зв'язку з цим слід зазначити такі обставини.

– Оскільки деградація властивостей споруди починається негайно після закінчення її зведення, здійснювати експлуатаційні заходи необхідно одночасно з початком експлуатації, а не пізніше – після певного нагадування.

– Сучасна будівельна наука дозволяє теоретично і достатньо точно передбачати погіршення властивостей конструкцій і відповідно будувати план експлуатації, не вдаючись до додаткових натурних вимірювань.

Серед причин деградації властивостей будівельних конструкцій основною є корозія сталі і бетону – атмосферна, в агресивних газових і рідких середовищах. Корозійне руйнування бетону пов'язано з розчиненням компонентів цементного каменя, його взаємодією з кислотами, з утворенням і кристалізацією в порах нерозчинних речовин.

Мета роботи – побудова методики планування експлуатаційних заходів для того, щоб забезпечити безпечну роботу споруди протягом заданого періоду.

Матеріали і методи. Методику розроблено на основі аналізу деградації будівельних конструкцій та вартості відновлювальних робіт.

Результати. Запропоновані пропозиції носять методичний характер і не претендують на широкі узагальнення. Проте, можна зауважити, що правильна експлуатація конструкції повинна ґрунтуватися на спільному аналізі обох кривих – деградації несних властивостей і вартості ремонтів.

Висновки. Запропоновано методику планування експлуатаційних заходів для забезпечення безпечної роботи споруди протягом заданого періоду.

***Ключові слова:*** будівельні конструкції, експлуатація споруд, планування ремонтів, терміни відновлювання.

**Вступ**

Відомо [1, 2, 3], що споруди з плином часу втрачають свої властивості. Таке погіршення починається від самого початку експлуатації. Будівельні конструкції під впливом сталих і змінних навантажень, а також під дією зовнішнього середовища втрачають міцність – несну здатність, збільшують прогини, втрачають стійкість форм рівноваги. Всі такі процеси мають загальну назву «деградація». В певний момент деградація збільшується настільки, шо унеможливлює подальшу безпечну експлуатацію споруди.

Термін безпечної експлуатації споруди ніколи не був і наразі не є предметом проектування. Жодні норми не містять рекомендації про те, як проектувати споруду з заданим терміном 47 років або, наприклад, 69 років. Споруду спроектовано, побудовано, і вже експлуатаційні організації визначають, що з нею робити далі. Проте навіть якщо під час проектування споруди було би все ж таки призначено певну тривалість її безпечної експлуатації, то і в такому випадку скоріш за все через брак коштів в момент вичерпання заданого терміну заміну конструкцій зроблено не буде, натомість найвірогідніше буде ухвалено рішення про продовження експлуатації. Відтак виникає задача про терміни і об’єми відновлювальних робіт. В загальному ж випадку така задача виникатиме і в межах початково запроектованого періоду. Залежно від подовженої тривалості експлуатації може бути здійснено один або декілька ремонтів.

Для планування експлуатації споруд існують комп’ютерні програми, зокрема для мостів відомі системи експлуатації Pontis, Bridgit, BМS та ін. Вони в своїх розрахунках найчастіше виходять з поняття – надійність споруди. Надійність споруди – узагальнене поняття, воно охоплює різні сторони роботи конструкцій, тому важко отримати рекомендації про терміни і об’єми відновлювальних робіт відносно конкретних будівельних конструкцій.

За визначенням «надійність» – є ймовірність невиходу параметрів споруди за границі допустимої області, і, як будь-яка ймовірність, вона ґрунтується не на матеріальних оцінках і об’єктах, а на ступеню нашої інформованості про ту чи іншу подію.

В цьому досліджені виходимо з того, що оцінкою придатності до подальшої експлуатації є лише одна характеристика споруди – несна спроможність. Її можна оцінювати розрахунком, тому відпадає потреба в різних інших підходах, зокрема в експертних оцінках.

Не існує несності споруди в цілому, її несність визначається несністю окремих конструкцій, а вона може бути різною. В складі споруди її елементи можуть експлуатуватися в різних умовах. відтак можуть мати неоднакові терміни безпечної експлуатації.

**Виклад основного матеріалу**

Пропонується підхід, який полягає в тому, що в кожній споруді формується певна кількість груп елементів, які знаходяться в однакових умовах, тому мають однаковий термін безпечної роботи. Можна уявити собі три залізобетонні балки, однакові за розмірами та за використаними матеріалами. Для прикладу в споруді залізничного вокзалу одна з таких балок може знаходитись всередині опалюваного приміщення, інша розташована на відкритому пероні проте під покрівлею, а третя працює в складі віадуку над коліями. Кожну з цих балок треба віднести до трьох різних груп конструкцій, тому що вони матимуть різні умови експлуатації.

Відомо [1, 2], що передчасні ремонти економічно невигідні, оскільки гроші ще «дорогі», хоча об’єми робіт порівняно невеликі. Так само запізнілі ремонти виконуються після суттєвого знецінення грошей, проте швидко збільшуються об’єми відновлювальних робіт. Отже, маємо оптимізаційну задачу про найкращі терміни виконання експлуатаційних заходів. Таких заходів може бути один або декілька залежно від терміну подовженої експлуатації споруди.

Не тільки терміни, але й об’єми ремонтних робіт також є предметом розрахунків, адже в загальному випадку необов’язково щоразу елементи споруди відновлювати до їхнього початкового стану. Проте, якщо йдеться про залізобетонні конструкції, то добетонування перерізів і відновлення арматури зазвичай відбувається саме так – до початкових розмірів. Тому для залізобетонних конструкцій друге питання – про об’єми робіт – найчастіше відпадає і залишаються лише терміни ремонтів.

В роботі [2] задачу про строки ремонтних робіт було розглянуто стосовно прогонових елементів мостів, в цьому досліджені задачу поширено на споруду в цілому. Також узагальнено вигляд цільової функції – вартості відновлювальних робіт. Нижче йдеться про відновлення залізобетонних конструкцій добетонуванням.

Задача в загальному випадку складається з трьох частин:

* моделі руйнування бетону і стальної арматури залежно від навантажень і властивостей середовища;
* оптимізаційна задача про найкращі терміни відновлювальних робіт;
* методи і способи відновлення.

Розглянемо лише середню ланку зазначеної вище послідовності. Важливим є сам факт існування тих чи інших моделей (перша частина проблеми), вони часто мають формульний вигляд і можуть в подальшому, якщо треба, бути замінені іншими залежно від умов експлуатації.

В певній споруді виберемо якусь групу конструкцій. Нехай це будуть залізобетонні балки прямокутного перерізу з розмірами *b* (ширина) і *h* ( висота). Нехай робоча арматура з площею перерізу *F* розташована в нижній частині перерізу балки. Центр тяжіння *F* віддалено від нижньої поверхні балки на висоту *a* захисного шару.

Границю текучості арматури позначимо , тоді границя міцності бетону на стиск при згині дорівнюватиме . Балку шарнірно обперто по кінцях і рівномірно навантажено.

Товщину зруйнованого шару бетону описуватимемо співвідношенням

 (1)

Вичерпування несної здатності балки супроводжується утворенням одного пластичного шарніра в найнапруженішому перерізі.

Припустимо, що балка не має захищених поверхонь. Корозія зменшує розміри поперечного перерізу



де глибина пошкодженого шару описується співвідношенням виду (1). Висота стиснутої зони визначається рівністю



де  – коефіцієнт армування. Плече внутрішньої пари становить . З  урахуванням його величини знаходимо граничний згинальний момент

 (2)

Вираз (2) справедливий для малих . Якщо ж глибина пошкодження перевищує товщину захисного шару, починається інтенсивне руйнування арматури. Зменшення площі її поперечного перерізу може бути представлено виразом

 (3)

де  – час повного руйнування захисного шару.

Відповідно змінюється і решта величин – висота стиснутої зони і плече внутрішньої пари



а також граничний згинальний момент



Отже, лінія зменшення в часі несності має дві ділянки (рис. 1), розділені моментом початку корозії арматури.

drr1

***Рисунок 1*** – Залежність граничного згинального моменту від часу експлуатації та вартості експлуатаційних заходів

Допустиму величину кНм граничного згинального моменту показано на рис. 1 горизонтальною лінією. Її перетин з графіком деградації міцності дозволяє визначити час , до якого можлива безпечна експлуатація балки без будь-яких відновлень і ремонтів. Якщо ж балку треба експлуатувати довше, необхідні додаткові експлуатаційні заходи. Основна задача тут – визначення часу проведення таких робіт.

Хоча задача, що розглянута, в загальному випадку припускає визначення якнайкращих часу і об'єму відновлювальних робіт [1, 2], у застосуванні до балки, швидше за все, буде проведене повне, а не часткове відновлення перерізу, тобто відновлення до первинних розмірів. Тому задача спрощується і зводиться до визначення тільки найкращого часу ремонту конструкції. Крім того, при повному відновленні перерізу в першому наближенні можна прийняти, що вартість робіт пропорційна до глибини  пошкодженого бетону, принаймні, до моменту  повного руйнування захисного шару. Загалом же цільова функція – вартість відновних робіт – може бути представлена співвідношенням

 (4)

де  – параметри, величина  визначається виразами виду (1),

*e* – коефіцієнт економічної ефективності. Така цільова функція окрім вартості відновлення первинних розмірів перерізу містить ще й вартість ремонту арматури. З практичної точки зору часткове відновлення арматури складніше, ніж її заміна, тому в другому доданку в (4) введено повну площу перерізу *F*, а не її пошкоджену частину.

Розглянемо перший приклад – залізобетонну балку з розмірами перерізу см з коефіцієнтом армування розтягнутої зони . Границя текучості стальної арматури прийнята  МПа. Моделі корозійного пошкодження (1) і (3) представлено параметрами  а цільова функція –  Крім того .

На рис. 1 відображено зменшення несної здатності балки в часі (спочатку вона становила  кНм). Якщо допустима величина несності  кНм, то свої несні властивості балка вичерпує до кінця 15 року. Якщо ж треба подовжити термін експлуатації ще на 12 років – до 27 року від початку експлуатації, то потрібні відновлювальні заходи.

На тому ж рис. 1 але в іншій системі координат (див. праву крайку) наведено графік змінювання вартості експлуатаційних заходів (С). В межах початкового періоду найменшій вартості відповідає момент повного руйнування захисного шару бетону й початку руйнування арматури.

Намагання подовжити строк експлуатації балки можна розглядати як поступальне перенесення ділянки графіка на відповідну відстань *n - n*, як показано на рис. 1.

На графіку вартості робіт можна вгледіти точку *m* мінімуму, але зазвичай вона розташована набагато пізніше (правіше на графіку), ніж треба, тому єдиною точкою, вартою уваги, є точка, що відповідає часу .

Виникає едино можливий висновок про те, що якщо погодитися з повним відновлюванням щоразу конструкції до початкового стану, то отримуємо просту рекомендацію – виконувати ремонтні роботи в моменти перед початком корозії арматури.

Як видно з викладеного вище, для повного опису задачі мають бути задані наступні параметри:

* висота захисного шару *а*;
* коефіцієнт поздовжнього армування ;
* границя текучості арматури ;
* міцність бетону на стиск при згині ;
* допустима величина згинального моменту ;
* коефіцієнти  моделі руйнування бетону;
* коефіцієнти  корозії арматури;
* коефіцієнти  цільової функції;
* коефіцієнт економічної ефективності *е*.

В складі певної споруди мають бути утворені декілька груп несних елементів. Відмінність хоча би одного з перелічених параметрів переводить елемент до іншої групи, відтак іншими будуть і результати розрахунків.

Розглянемо приклад 2, в якому за умов прикладу 1 будемо змінювати лише один параметр – висоту *а* захисного шару в інтервалі 1,8 – 2,8 см. Результати подано в табл.1

***Таблиця 1***

***Оцінка зміни показників вартості відновлюваних робіт в залежності від***

***технічних параметрів (приклад 2)***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Найменування параметрів | Показники | | | |
| Група елементів за товщиною захисного шару *а*, см | 1,8 | 2,0 | 2,4 | 2,8 |
| Момент  повного руйнування захисного шару, рік | 9 | 12 | 16 | 22 |
| Момент  вичерпання несності балки, рік | 13 | 15 | 18 | 23 |
| Вартість відновлювальних робіт на момент , умов. грош. од. | 7,84 | 6,41 | 4,64 | 2,69 |
| Вартість відновлювальних робіт на момент , умов. грош. од. | 9,55 | 8,88 | 7,39 | 6,51 |

Припустимо тепер, що вирішено експлуатувати споруду 20 років. З таблиці 1 випливає, що для перших трьох груп конструкцій маємо планувати відновлення. Якщо прийняти зроблену  вище пропозицію, то першу балку доведеться ремонтувати двічі – в 9 і 18 році. Перший ремонт для неї коштуватиме, як видно з табл. 1, 7,84 умовних грошових одиниць, а другий, виконуваний на 9 років пізніше, лише – 2,82 умовних грошових одиниць, тож сума всіх п’ятьох доданків становить 21,9 умовних грошових одиниць. Якщо ж будемо чекати до останньої миті, що передує вичерпанню несності цих елементів, то три перші балки буде відремонтовано в 13, 15 і 18 роки від початку експлуатації, а сумарну вартість робіт в такому випадку отримаємо додаванням перших трьох чисел з останнього рядка табл. 1. Ця сума становить  24,71 умовних грошових одиниць, це на 13 % більше від попередньої. В цьому прикладі четверта балка не потребує відновлюваних заходів.

Ще один приклад (приклад 3) від двох попередніх відрізняється змінюванням лише  коефіцієнта  в моделі деградації бетону – швидкості руйнування, інші параметри – як в прикладі 1. Результати обчислень наведено в табл. 2.

***Таблиця 2***

***Оцінка зміни показників вартості відновлюваних робіт в залежності від***

***технічних параметрів (приклад 3)***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Найменування параметрів | Показники | | |
| Група елементів за швидкістю  руйнування захисного шару | 0,8 | 0,6 | 0,4 |
| Момент  повного руйнування захисного шару, рік | 7 | 12 | 25 |
| Момент  вичерпання несності балки, рік | 10 | 15 | 28 |
| Вартість відновлювальних робіт на момент , умов. од. | 11.15 | 6,41 | 4,40 |

В цьому прикладі видно, що для заданого терміну експлуатації 20 років конструкції першої групи мають відновлюватися двічі, а другої групи – один раз протягом такого терміну.

**Висновок**

Запропонована методика планування експлуатаційних заходів для забезпечення безпечної роботи споруди протягом заданого періоду дозволяє врахувати умови експлуатації споруди від якого залежить момент повного руйнування захисного шару.

**Список літератури**

1. Дехтяр А.С. Планування експлуатації залізобетонних мостів. Наукові праці Міжнародного семінару «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій». Луцьк, 2002. С. 16-19.
2. Дехтяр А.С., Коваль П.М. Про корисність своєчасних ремонтів мостів. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2006. N 11. С. 219-222.
3. Иосилевский Л. И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. Москва, 1999. 295 с.

**REFERENCES**

1. Dekhtiar A. S. Planuvannia ekspluatatsii zalizobetonnykh mostiv. Naukovi pratsi Mizhnarodnoho seminaru «Mekhanika i fizyka ruinuvannia budivelnykh materialiv i konstruktsii». Lutsk, 2002. P. 16-19.

2. Dehtyar A. S., Koval P. M. On the usefulness of timely repairs of bridges (On the usefulness of timely repairs of bridges). Vìsnik Nacìonalʹnogo transportnogo unìversitetu. Kyiv, 2006. 11. P. 219-222.

3. Yosylevskyi L. Y. Prakticheskie metodyi upravleniya nadezhnostyu zhelezobetonnyih mostov (Practical methods for managing the reliability of reinforced concrete bridges). Moscow, 1999. 295 p.

**Oleksandr Babkov**, *Ph.D*, [*https://orcid.org/0000-0001-5075-4239*](https://orcid.org/0000-0001-5075-4239)

**Anatolii Diekhtiar**, *D.Sс, Professor,* [*https://orcid.org/0000-0002-6838-0770*](https://orcid.org/0000-0002-6838-0770)

*National Academy of Fine Art and Architecture, Kyiv, Ukraine*

**PLANNING METHOD OF BUILDING STRUCTURES MAINTENANCE**

***Abstract***

Introduction. The publications of the last years testify to the interest of specialists to the problem of building structures operation. It is caused by the insufficient financing that conduces to accumulation of volumes of the postponed repairs; it was even offered to enter the signaling elements in the bearing structures which behavior would force to think of the beginning of a reasonable operation.

Problem Statement. In this connection it should be noted such circumstances:

– As the degradation of properties of the building structure begins immediately after ending of its installation, carrying out the operating measures should be started simultaneously with the beginning of operation, but not later – after some reminders.

– Modern building science allows in a theory and enough exactly to predict the deterioration of the properties of structures and accordingly to issue the plan of its operation, excluding the additional scale measuring.

Among the reasons of the properties degradation of building structures, the basic one is the corrosion of steel and concrete – the atmospheric one, in aggressive gas and liquid environments. Corrosive deterioration of concrete is related to the dissolution of the components of cement stone, its interaction with acids, with crystallization in the pores of insoluble matters.

Objective– is to develop the technique for planning the method for operating the planning in order to provide safe work of the building facility during the set period.

Materials and Methods. Materials in this work were not used, methods have not used.

Results. The suggestions presented here, carry a methodical character and do not apply on wide generalizations. Nevertheless, it is possible to state that the correct operation of structures must be based on the joint analysis of both curves – degradations of bearing properties and the cost of repairs.

Conclusions. The method of planning of operating measures for providing the safe work of building facility during the set period is offered.

***Key words:*** building facilities, operation of facilities, the repairs planning, renovation terms.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.7/.8

## Гаркуша М. В., [*https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*](https://orcid.org/0000-0002-5388-0561)

## Онищенко А. М., *д-р техн. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*](https://orcid.org/0000-0002-1040-4530)

*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ПОКРИТТЯ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ

***Анотація***

Вступ. На основі досвіду останніх років експлуатації автомобільних доріг встановлено, що одним з найпоширеніших дефектів на асфальтобетонному покритті від транспортного навантаження та високої літньої температури є колія, яка призводить до зменшення його строку служби, а відповідно і всієї конструкції дорожнього одягу в цілому. Визначено необхідність удосконалення методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії.

Проблематика. Враховуючи, що покриття нежорсткого дорожнього одягу перебуває у складних умовах експлуатації (підтверджується інтенсивним зростанням дефектів у вигляді колії), причиною чого є зростання параметрів транспортних навантажень та високі літні температури, необхіднопідвищити стійкість покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії.

Мета. Полягає в удосконаленні методу оцінки стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії при дії вертикальних навантажень транспортних засобів за високих літніх температур.

Методи дослідження – аналітично-експериментальні з використанням положень теорії пружнопластичності і термов'язкопружності та експериментальних методів дослідження утворення колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу; чисельного моделювання; математичної статистики.

Результати. На основі виконаного аналізу розглянуто умови роботи покриття нежорсткого дорожнього одягу, а також проаналізовано існуючі теоретичні та експериментальні методи прогнозування утворення колії.

Отримано аналітичну залежність та удосконалено метод оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії, від дії вертикальних навантажень транспортних засобів, що дозволяє враховувати комплексну дію основних факторів, а саме: термов’язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; укріплення ґрунтів; температуру асфальтобетону; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантаження.

Експериментально досліджено розрахункові термореологічні характеристики асфальтобетонів та укріплених ґрунтів, міцність зчеплення між асфальтобетоном та основою при зсуві, проведено натурні, лабораторні та стендові дослідження впливу різних факторів на утворення залишкових деформацій у вигляді колії, отримано закономірності дії впливових факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу.

Висновки. Під час роботи удосконалено метод оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії та враховано комплексну дію основних факторів, а саме: термов’язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону, вертикального тиску на покриття транспортних засобів та часу їх дії на конструкцію; інтенсивності прикладання вертикальних навантажень. Результати досліджень знайшли застосування при розробці нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації асфальтобетонних покриттів на автомобільних дорогах України.

***Ключові слова:*** автомобільна дорога, асфальтобетон, бітум, дорожній одяг, колія, навантаження, покриття, стійкість, температура, термов'язкопружність.

**Вступ**

Аналіз досвіду останніх років експлуатації автомобільних доріг показує, що одним з найпоширеніших дефектів на асфальтобетонному покритті від транспортного навантаження та високої літньої температури є колія, яка призводить до зменшення його строку служби, а відповідно і всієї конструкції дорожнього одягу в цілому [1 – 5].

Головною причиною утворення колії на асфальтобетонному покритті є та обставина, що більшість доріг було запроектовано під розрахункові навантаження групи А (100 кН на вісь) та групи Б (60 кН на вісь). З часом, в процесі експлуатації автомобільних доріг зростає не тільки інтенсивність руху, але і збільшуються параметри транспортного навантаження.

Аналіз досліджень з проблем деформування та утворення колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу від дії транспортних засобів та температури виконані  вченими: Александров А. С., Батракова А. Г., Біруля О. К., Білятинський А. О., Богуславський А. М., Бонченко Г. О., Борщ І. М., Братчун В. І., Васільєв О. П., Веренько В. А., Вікович І. А., Волков М. І., Воловик О. О., Гамеляк І. П., Гезенцвей Л. Б., Гоглідзе В. М., Головко С. К.,Горелишев М. В., Гохман Л. М., Жданюк В. К., Золотарьов В. О., Іванов М. М., Казарновський В.Д., Кияшко І. В., Корольов І. В., Ковальов Я. М., Колбановська А. С., Кірічек Ю. О., Лапченко А. С., Марчук О. В., Матуа В. П., Мозговий В. В., Негомедзянов А. А., Онищенко А. М., Павлюк Д. О., Печьоний Б. Г., Радовський Б. С., Руденська А. В., Савенко В.Я., Сібільскій Д., Смірнов В. М., Стьожка В. В., Сюньї Г. К., Титаренко О. М., Телтаєв Б. Б., Хархута М. Я., Шуляк І. С., Barksdale R. D., Gachwendt I., Gidel, Hushek S., HuurmanM., Erlingsson S., Korkiala-Tanttu L., Lizenga J., Lytton R. L., Nielsen J., NijboerL.W., Tseng K-H., Poliacek I. та іншими дослідниками, показав, що недостатня стійкість асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії суттєво знижує як міцність всієї конструкції дорожнього одягу, так і особливо рівень безпеки руху за рахунок створення ефекту аквапланування в місцях застою води та зимової слизькості [1, 2, 6 – 11].

Згідно з чинними нормами України щодо ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування [19] поява колії на асфальтобетонному покритті автомобільних доріг є недопустимою, а та, що виникла, підлягає терміновій ліквідації. Ремонт та заходи з ліквідації колії на асфальтобетонному покритті є складним, трудомістким та фінансово витратним процесом, що супроводжується значними матеріальними та енергетичними затратами. Окрім того, існуючі підходи з виконання ремонтно-відновлюваних робіт усунення колії не завжди призводять до бажаного результату. Як показує широкий практичний досвід, використання типових конструкцій нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах не завжди забезпечують необхідну стійкість до утворення колії, а методи їх розрахунку є недосконалими.

Існуючі методи оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу з утворення колії недостатньо враховують комплексний вплив термореологічних властивостей асфальтобетону та укріплених шарів основи з урахуванням режимів навантаження великовагових транспортних засобів за різних температурних умов [1 – 5].

Існуючі моделі та методи з прогнозування утворення колії в покритті нежорсткого дорожнього одягу не в повній мірі враховують такі фактори, як: структурні, термореологічні властивості асфальтобетону, реологічні властивості ґрунтів, конструктивні, властивості укріплених ґрунтів основи та їх властивостей, технологічні, кліматичні та транспортні фактори. Також істотним недоліком українських нормативних документів з проектування дорожнього одягу, зокрема ВБН В.2.3-218-186-2004, є відсутність методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії.

Проведений аналіз робіт свідчить, що до теперішнього часу залишається відкритим питання врахування спільного впливу структурних, конструктивних, технологічних, кліматичних та транспортних факторів на утворення колії в покритті нежорсткого дорожнього одягу при лабораторних і стендових експериментальних дослідженнях.

Таким чином, проведений аналіз існуючих підходів до урахування дії вертикальних навантажень транспортних засобів при високих літніх температурах на утворення колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу, який дає можливість зробити висновок про те, що на даний час не розроблено удосконалений метод оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії з урахуванням структурних, конструктивних, технологічних, кліматичних та транспортних факторів.

Виникає необхідність вирішення важливої науково-практичної задачі – підвищення стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії за рахунок удосконалення методу її оцінки на стадії проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг.

**Основна частина**

Для підвищення стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії за рахунок удосконалення методу її оцінки на стадії проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг необхідно вирішити ряд задач, а саме:

* провести аналіз умов роботи і стану асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах, існуючих теоретичних та експериментальних методів прогнозування утворення колії;
* встановити аналітичну залежність для вдосконалення методу оцінки стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії від дії вертикальних навантажень транспортних засобів при високих літніх температурах;
* експериментально дослідити: розрахункові термореологічні характеристики асфальтобетонів та укріплених ґрунтів; міцність зчеплення між асфальтобетоном та основою при зсуві; лабораторні та стендові дослідження впливу різних факторів на утворення залишкових деформацій у вигляді колії; закономірності дії впливових факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу;
* розробити практичні рекомендації та методику розрахунку підвищення стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії.

***Аналіз умов роботи і стану асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах.***

З метою вирішення поставлених задач розроблено схему утворення колії на асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу (рис. 1).

Виходячи з прийнятої в роботі постановки задачі в роботі застосовано аналітично-експериментальний підхід з врахуванням відомих наукових положень утворення пластичних деформацій в покритті нежорсткого дорожнього одягу. Зокрема на основі досліджень Богуславського А. М., Васільєва О. П., Золотарьова В. О., Жданюка В. К., Лугова С. В., Смірнова О. В., Мевлидинова З. А., Павлюка Д. О., Радовського Б. С., Телтаєва Б. Б. та інших дослідників, можна констатувати, що відбуваються малі відносні деформації в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу за рахунок накопичення вертикальних деформацій від дії навантаження, сумарне накопичення яких за певний період призводить до утворення колії.

З метою вирішення поставленої задачі розроблено схему утворення колії на асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу (рис. 1) [1, 2, 10].

Для розроблення аналітичної залежності з прогнозування колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу (рис. 1) розглядається її формування за рахунок накопичення залишкових деформацій при дії навантаження транспортних засобів та високої  літньої температури в асфальтобетонних шарах покриття та в шарах основи нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг. Асфальтобетон з урахуванням відомих результатів дослідження Богуславського А. М., Веренька В. А., Гезенцвея Л. Б., Жданюка В. К., Золотарьова В. О., Матуа В. П., Онищенка А. М., Руденського А. В., Телтаєва Б. Б. та інших вчених, розглядається як термов’язкопружнопластичне тіло, властивості якого запропоновано описувати такими основними показниками: функція модуль пластичності (в’язкопружна характеристика) асфальтобетону *Еп а/б ш/укр(t,T(t))*, яка залежить від часу дії навантаження і температури. Шари конструкції дорожнього одягу з урахуванням відомих результатів досліджень Васільєва О. П., Матуа В. П., Мозгового В. В, Мурашиної Н. В., Радовського Б. С., Павлюка Д. О., Телтаєва Б. Б. та інших вчених, описати: функцією релаксації дискретного матеріалу *Rш/д(t)*, укріпленого матеріалу *Rш/укр(t)*, земляного полотна *Rз/п(t);* функція модуля деформації шару з дискретного матеріалу *Ед ш/д(t)*, укріпленого матеріалу *Ед ш/укр(t)*, земляного  полотна *Ед з/п(t);* коефіцієнтів, що враховують в’язко-пластичні властивості матеріалів (дискретного матеріалу, укріпленого шару, земляного полотна), відповідно *kш/д,kш/укр, kз/п* [1, 2, 6 – 11]*.*

|  |
| --- |
|  |
| ***Рисунок 1*** *–* Схема утворення колії на асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу автомобільної дороги: *p* – питомий тиск, МПа; *μ(t)* – коефіцієнт Пуассона, який залежать від часу дії навантаження,  температури і виду матеріалу; *T(t)* – температура, яка  залежить від часу, ºС; *Еп а/б(t, T(t))* – функція модуля пластичності асфальтобетонного покриття, МПа; *Rш/д(t), Rш/укр(t), Rз/п(t)* – функція релаксації дискретного матеріалу, укріпленого матеріалу, земляного полотна, МПа; *Ед ш/д(t), Ед ш/укр(t), Ед з/п(t)* – функція деформації шару з дискретного матеріалу, укріпленого матеріалу, земляного полотна, МПа; *На/б*– товщина асфальтобетонного покриття, що складається з кількості шарів n, м; *hш/д, hш/укр, hз/п*– товщина шару з дискретного матеріалу, укріпленого шару, земляного полотна, м; *kш/д,kш/укр, kз/п*– коефіцієнти, що враховують в’язко-пластичні властивості матеріалів (дискретного матеріалу, укріпленого шару, земляного полотна); *hmax(∑N,t,T(t))* – максимальна глибина колія асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу, м |

***Аналітична залежність та удосконалений метод оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії.***

Як передумова для оцінки стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії було використано: теоретичні положення та рішення задач накопичення залишкових деформацій в асфальтобетоні Богуславського А. М., Васільева О. П., Смірнова О. В., а прогнозування залишкових деформацій в шарах основи та земляному полотні Васильєва О. П., Мурашиної Н. В., Радовського Б. С., Павлюка Д. О., Телтаєва Б. Б. та інших дослідників при дії навантаження транспортних засобів та високої літньої температури.

З урахуванням розробленої схеми (рис.1) [1, 2, 10] та відомих теоретичних положень запропоновано аналітичну залежність для прогнозування глибини утворення колії в покритті  нежорсткого дорожнього одягу, від дії циклічного вертикального навантаження транспортних  засобів при високих літніх температурах, яка включає в себе параметри: термов’язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; конструкції дорожнього одягу (з/без укріплення шарів основи); дії вертикального навантаження та зміни температури. Тому визначення загальної глибини колії *hзаг(∑N,t,T(t))* в асфальтобетонному покритті з урахуванням підходів Васільева О. П. встановлюється за залежністю:

 (1)

де  – залишкова деформації в асфальтобетонному шарі, м;

 – залишкова деформації в укріпленому шарі основи, м;

– залишкова деформація в шарі дискретного матеріалу, м;

– залишкова деформації в земляному полотні, м;

*ωв (t)* – середня висота випорів колії, м;

*ωτ(∑N, t)* – знос покриття від шипованих шин (залежить від виду мінерального матеріалу асфальтобетону), м;

*Tсл* – розрахунковий строк служби дорожньої конструкції, роки;

*n* та *N* – інтенсивність руху розрахункових автомобілів на полосу руху відповідно в місяць і за строк служби, один. навант.;

*tp* – час релаксації, с;

*V* – швидкість транспортного потоку, приймається як середнє між швидкістю на початку експлуатації дорожньої конструкції та в кінці строку її служби, км/год;

*Dд* – діаметр відбитку колеса рухомого автомобіля, м;

*і* – число місяців в році з характерною середньою температурою;

*τ* – активні дотичні напруження зсуву в ґрунті земляного полотна, МПа;

*B* – коефіцієнт консистенції ґрунту, доля одиниці;

*t* – тривалість дії одного прикладення автомобільного навантаження, с;

*W* – функція, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних факторів (вид функції і параметрів встановлюється експериментально);

,, – параметри, що встановлюються експериментально і відображають вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді *N* колеса.

– середньо-інтегральне значення модуля пластичності визначається за залежністю, МПа:

 (2)

де  – функція модуля пластичності і-го шару асфальтобетонного покриття;

*n* – кількість шарів асфальтобетонного покриття (n=3), МПа;

*Hабі* – товщина і-го шару асфальтобетонного покриття (і=3), м.

Для оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії, яка базується на отриманні аналітичних залежностей (1, 2), запропоновано умову граничного стану, яка перевіряється як максимальне значення глибини колії , накопиченою за розрахунковий строк служби та включає в себе загальну глибину колії  з відповідною забезпеченістю, визначається за формулою:

 (3)

де  – коефіцієнт довірчої імовірності;

 – коефіцієнт варіації глибини колії;

*hн* – гранично допустима глибина колії за нормативним документом, м.

Таким чином, удосконалено метод оцінювання стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії від впливу структурних, конструктивних, технологічних, кліматичних та транспортних факторів, а також запропоновано послідовність розрахунку оцінки стійкості такого покриття.

**Експериментальні дослідження**

***Об’єкти експериментальних досліджень****:* асфальтобетонне покриття нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг, кільцевий стенд ДП «Дорожній контроль якості»; традиційний асфальтобетони дрібнозернистий, крупнозернистий (тип Б, А), щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА). Досліджувалися асфальтобетони з використанням щебеню розміром 10 мм, 20 мм, 40 мм на бітумах дорожніх марок БНД 40/60, БНД 60/90 та бітумах, модифікованих полімером марки: БМПА 60/90-53, що модифікували полімером – термоеластопластом. Досліджувалися матеріали шарів основи дорожнього одягу: укріплений грунт, щебінь фракції 20-40 мм, щебенево-піщана суміш, пісок, суглинок [12 – 13].

***Оцінка стійкості асфальтобетонів до утворення колії.*** Перед випробуванням зразки  виготовляли за допомогою секторного пресу (ПМА 218-21476215-450), що відтворює умови ущільнення асфальтобетонної суміші, подібні умовам ущільнення котками. Базуючись на існуючому методі (СОУ 45.02-00018112-020) з метою визначення показника стійкості  асфальтобетону накопичення залишкових деформацій у вигляді колії при багатоцикловому повторному навантаженні за підвищених температур, проводили лабораторні випробування [14, 15].

Отримані результати експериментальних досліджень впливу структурних факторів на підвищення стійкості до утворення колії в асфальтобетоні підтвердили відомі дані про підвищення зсувостійкості асфальтобетону за рахунок регулювання зернового складу, властивостей бітумних в’яжучих, крім того, отримано кількісні дані та закономірності впливу режимів навантаження та конструктивно-технологічних факторів.

На рисунку 2, показано вплив використання різних бітумних в’яжучих на дрібнозернистий асфальтобетон типу А-20, щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-10, ЩМА-20 на утворення колії.

|  |
| --- |
|  |
| ***Рисунок 2*** – Залежність глибини колії від кількості проходів огумленого колеса та виду  бітумного в’яжучого в асфальтобетоні (тип А, ЩМА) за температури 50оС при навантажені 700 Н |

Одержано порівняльні результати (рис. 2) асфальтобетонів типу А (з максимальним розміром зерен щебеню 20 мм), щебенево-мастикових асфальтобетонів (ЩМА-10, ЩМА-20), з яких випливає, що мінімальне значення глибини колії при температурі +50 ºС становить 3,5 мм для ЩМА-20, а у типі А-20 значення колії більше в 2,7 разів. З результатів дослідження можна сказати, що, використовуючи асфальтобетони на бітумах, модифікованих полімерами, можна підвищити стійкість до утворення колії асфальтобетонного покриття на 50 – 60 %. Дані дослідження дають можливість обрати найбільш стійкий асфальтобетон до утворення колії при проектуванні конструкції дорожнього одягу. Результати дослідження застосовуються для обґрунтування вибору асфальтобетону при проектуванні конструкції дорожнього одягу.

***Оцінка міцності зчеплення при зсуві між асфальтобетонним шаром і асфальтобетонним покриттям***. Для досліджень використовували методику (СОУ 45.2-00018112-046) для оцінки зчеплення асфальтобетонного шару і асфальтобетонного покриття при випробуванні під дією горизонтальних та вертикальних зусиль, що моделюють дію зовнішнього навантаження на асфальтобетонні шари при гальмуванні транспортних засобів. Випробування здійснювали за допомогою приладу НТУ-ЗЧ-1, зразків кернів, які були відібрані з покриття кільцевого стенду. Результатами дослідження встановлено оптимальні витрати підґрунтовки, що складають від 0,3 – 0,7 л/м2 і суттєво залежать від виду асфальтобетону. Це свідчить про те, що при проектуванні асфальтобетонних шарів необхідно враховувати оптимальні параметри технології їх влаштування [16]. Результати дослідження застосовуються для обґрунтування кількості підґрунтовки між асфальтобетонними шарами.

***Встановлення термов'язкопружньопластичних характеристик асфальтобетону***. Аналітична залежність з прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті потребує застосування характеристик, що описують термов’язкопружню поведінку асфальтобетонів (функція релаксації) та термов'язкопружнопластичну (функція модуля пластичності; функція, що відображає вплив комбінованих причин утворення колії від внутрішніх факторів; параметри, що відображають вплив циклічного навантаження) [1, 13, 17].

Отримані параметри функції модуля пластичності щебенево-мастикового асфальтобетону наведено в таблиці 1.

***Таблиця 1***

***Параметри функції модуля пластичності ЩМА***

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Шифр асфальтобетону | Параметри функції *αТ* | | Параметри модуля пластичності | | |
| *Q,* °С | *р*, град-1 | *Еп а/б*, МПа | *η*, с | *λ* |
| ЩМА-10 (БМПА 60/90-53) | 20 | 0,171 | 4754 | 1,68 х10-5 | 0,290 |
| ЩМА-20 (БМПА 60/90-53) | 20 | 0,165 | 4586 | 1,53 х10-5 | 0,300 |

Для визначення деформаційних властивостей матеріалів дорожньої конструкції в лабораторних умовах визначали вертикальні переміщення за допомогою жорсткого штампу, встановленого на поверхні щебенево-піщаного шару (фракції 0 – 40 мм) покриття за допомогою важільного пресу (рис. 3), в залежності від різного часу дії навантаження. Навантаження на поверхню щебеневого шару передавалося за допомогою важільного преса через сталевий штамп  заданим діаметром. Переміщення фіксувалося за допомогою індикатора годинникового типу. Випробування переміщень проводили двічі при навантаженні *р* = 0,5 МПа з тривалістю дії від 0 до 2400 с, результати наведено на рис. 4.

Отримані результати випробувань матеріалів шарів основи за допомогою важільного преса (рис. 3) дозволили визначити на основі отриманих даних залежності переміщень матеріалів основи при заданій вологості та різному часі дії навантаження (рис.4), визначити параметри функцій релаксації та модуля деформації. Результати параметрів наведено в таблиці 2.

***Таблиця 2***

***Параметри функції релаксації та коефіцієнт в’язкопластичності матеріалів***

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Шифр матеріалу | Параметри функції релаксації | | | | | Коефіцієнт в'язкопластичності |
| *E*мт, МПа | *Е*дт, МПа | | *а* | *χ* | *k* |
| Укріплений грунт, М 60 | 540 | 490 | | 6,1 | 4,1 | 0,98– 0,96 |
| Щебінь, влаштований методом заклинки (фракції 20 – 40 мм) | 358 | 332 | | 6,0 | 4,0 | 0,97– 0,93 |
| Щебенево-піщана суміш  (фракції 0 – 40 мм) | 258 | 236 | | 5,9 | 3,9 | 0,96– 0,91 |
| Пісок середній | 138 | 125 | | 9,0 | 3,75 | 0,94– 0,88 |
| Суглинок | 70 | 49 | | 5,8 | 2,1 | 0,91– 0,83 |
| **Примітка:** Коефіцієнт пластичності для матеріалу шарів залежить від вологості | | | | | | |
| D:\Р О Б О Т А__ 2012\ДОГОВІР___№ 6 (ДБ)_(ШЛАКИ)\ШЛАК_ДОСЛІДЖЕННЯ\ФОТО_КАСТРУЛЯ\P1020793.JPG  **3**  **2**  **1** | | | | ***Рисунок 4*** – Залежність переміщень від часу дії навантаження в щебенево-піщаній суміші при вологості 4 % | | | |
| ***Рисунок 3*** – Схема встановлення штампу та індикатора годинникового типу при визначенні переміщень в матеріалі за допомогою важільного преса: 1 – індикатори годинникового типу; 2 – штамп із заплечниками; 3 – форма із зразком | | | |
|  | | | |  | | | |

***Стендові випробування на кільцевому стенді***. Дослідження полягали у вивченні поперечного профілю асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з вимірюванням параметрів колії в залежності від кількості проїздів колеса по одному сліду при температурах від 45 оС до 55 оС [18]. Досліджувана конструкція складалася: верхній шар покриття з ЩМА-20 на бітумі, модифікованому полімером, товщиною 5 см; щільний дрібнозернистий асфальтобетон типу А з максимальною крупністю мінеральних зерен 20 мм на бітумі модифікованому полімером БМПА 60/90-53, товщиною 8 см; нижній шар – пористий крупнозернистий асфальтобетон типу А з максимальною крупністю мінеральних зерен 40 мм на БНД 60/90 товщиною 8 см; між шарами виконана підґрунтовка на модифікованому бітумі; шар основи з щебенево-піщаної суміші С-7, укріпленою цементом, товщиною 15 см; шар з щебенево-піщаної суміші С-5 товщиною 18 см. Поперечний профіль та кінетику зміни його характеристик показано на рисунку 5.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| *а)* | *б)* |
| ***Рисунок 5*** – Залежність утвореної колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу від кількості проїздів колеса: *а)* – поперечний профіль; *б)* – кінетика зміни характеристики утворення колії | |

Отримані дані свідчать про те, що із збільшенням кількості навантажень темпи зростання глибини колії спочатку стрімко збільшуються, а потім поступово затухають (рис. 7). Результати досліджень дозволили встановити підвищення стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії за рахунок застосування: у верхньому та нижньому шарі покриття асфальтобетону на бітумі модифікованому полімером, а також укріпленого шару основи та раціонального конструювання дорожнього одягу.

З метою перевірки точності переміщення залишкових деформацій в поперечному профілі конструкції дорожнього одягу виконувалося її розриття (рис. 6). Результати дослідження дозволили визначити пошарове накопичення пластичних залишкових деформацій у кожному шарі конструкції дорожнього одягу (рис. 7).

|  |  |
| --- | --- |
| D:\М А Т Е Р І А Л И___!!!  ДОРЯКІСТЬ !!!\МАТЕРІАЛИ___ДОР'ЯКІСТЬ_2013\КОНСТРУКЦІЯ___КОЛІЯ\2013.07.11\P1040106.JPG |  |
| ***Рисунок 6*** – Загальний вид розриття конструкції дорожнього одягу на  кільцевому стенді ДП «Дорожній контроль якості» | ***Рисунок 7*** – Результати дослідження пластичних залишкових деформацій в конструктивних шарах дорожнього одягу |

Проведено числове моделювання вертикальних переміщень в покритті нежорсткого дорожнього одягу за допомогою методу скінченних елементів для різних конструкцій дорожнього одягу. На основі отриманих результатів зроблено висновок про те, що максимальні поля переміщень розповсюджуються в конструкції, в якій не використовуються укріплення шарів основи, максимальні переміщення в конструкції з використанням укріплених матеріалів менші до 40 %.

Для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі (3), а також для вивчення параметрів утворення колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу використано конструкцію дорожнього одягу при стендових випробування на кільцевому стенді ДП «Дорожній контроль якості» з наведеними вище параметрами, а також проведено натурні дослідження утворення колії, аналогічної конструкції нежорсткого дорожнього одягу, що експлуатується на автомобільній дорозі М 03 Київ – Харків – Довжанський. Результати натурних досліджень були проведені на автомобільній дорозі М 03 Київ – Харків – Довжанський в 2016 та 2018 роках. Крім того, для співставлення запропонованої математичної моделі з існуючими методами, було проведено теоретичні розрахунки утворення колії в запропонованій конструкції дорожнього одягу за підходами Васільева О.П., М-218-03450778-256 [1, 4, 5, 8] та виконано порівняння з отриманою теоретичною залежністю (3), натурними дослідженнями, що наведено на рис. 8.

На підставі натурних, стендових та теоретично розрахованих за формулою (1–3) досліджень встановлено залежність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті на різних конструкціях нежорсткого дорожнього одягу від впливу структурних, конструктивних, технологічних, кліматичних та транспортних факторів. Розбіжність результатів знаходиться в межах від 9,0 % до 18,0 %, при рівні довірчої вірогідності 0,95. Це вказує на можливість практичного застосування удосконаленого методу оцінки стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу.

|  |
| --- |
|  |
| ***Рисунок 8*** – Залежність глибини колії в асфальтобетонному покритті нежорсткого дорожнього одягу на автомобільній дорозі М03 Київ – Харків – Довжанський від дії навантаження *р* = 0,8 МПа в залежності від терміну експлуатації |

**Висновки**

У роботі наведено теоретичне узагальнення і нові вирішення наукових та практичних задач. У роботі удосконалено метод оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу з утворення колії та враховано комплексну дію основних факторів, а саме: термов’язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону, вертикального тиску на покриття пневматичних коліс транспортних засобів та часу їх дії на конструкцію; інтенсивності прикладання вертикальних навантажень; ці положення були підтверджені експериментальним дослідженням, в тому числі з врахуванням укріплення шарів основи дорожнього одягу.

Результати досліджень дозволили сформулювати теоретичні та науково-практичні висновки, основними з яких є:

1. Із аналізу відомих літературних даних та досліджень стосовно нежорсткого дорожнього одягу встановлено:

* асфальтобетонне покриття нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг перебуває у складних умовах експлуатації, що підтверджується інтенсивним зростанням дефектів у вигляді колії (понад 60% пластичних деформацій із загальної кількості дефектів), у зв’язку з ростом параметрів транспортних навантажень та високих літніх температур;
* в існуючих наукових розробках недостатньо вивчено: комплексний вплив термов’язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону з врахуванням структурних, конструктивних, технологічних, кліматичних, транспортних факторів; існуючі методи оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії недостатньо враховують комплексний вплив термореологічних властивостей асфальтобетону та укріплення шарів основи, а також фактичних режимів навантаження великовагових транспортних засобів за різних температурних умов; існуючі експериментальні дослідження недостатньо відображають фактичні умови роботи покриття; не в повній мірі вивчено стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії при комбінованому застосуванні різних практичних заходів.

2. Встановлено аналітичну залежність, яка дозволяє прогнозувати глибину утворення колії в покритті нежорсткого дорожнього одягу, від дії циклічного вертикального навантаження транспортних засобів при високих літніх температурах та включає в себе параметри: термов’язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; конструкції дорожнього одягу (з/без укріплення шарів основи); дії вертикального навантаження та зміни температури. Удосконалено метод оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії, від дії вертикальних навантажень від транспортних засобів, що дозволяє враховувати комплексну дію основних факторів, а саме: термов’язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; укріплення ґрунтів; температуру асфальтобетону; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантаження.

3. На основі експериментальних результатів:

* досліджено властивості асфальтобетону та укріплених ґрунтів, а саме: фізико-механічні властивості; розрахункові параметри термов’язкопружньопластичних властивостей (функція деформації, функція релаксації, функція пластичності), міцність зчеплення між асфальтобетоном та основою при зсуві; характеристики утворення колії;
* одержано порівняльні результати випробувань асфальтобетонів типу А,  Б (з  максимальним розміром зерен щебеню 20 мм), щебенево-мастикових асфальтобетонів (ЩМА-10, ЩМА-20), з яких випливає, що мінімальне значення глибини колії при температурі +50 ºС становить 3,5 мм для ЩМА-20, а у типі А-20 значення колії більше ніж в 2,7 разів;
* на підставі натурних та стендових досліджень встановлено залежність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті на різних конструкціях нежорсткого дорожнього одягу від впливу структурних, конструктивних, технологічних, кліматичних та транспортних факторів, перевірена адекватність теоретичних положень, підтверджено адекватність теоретичних рішень з експериментальними даними;
* на основі чисельного аналізу встановлено і доведено можливість підвищення стійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії за рахунок застосування: у верхньому та нижньому шарі покриття асфальтобетону на бітумі модифікованому полімером (при їх кількості до 5 %); укріпленого шару основи та раціонального конструювання дорожнього одягу.

4. Результати досліджень знайшли застосування при розробці 7 нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації асфальтобетонних покриттів на автомобільних дорогах України.

**Список літератури**

1. Onyshchenko А. М., Garkusha M. V., Leshchuk О. М. Prediction and assessment of residual strain of asphalt concrete pavement using finite element method. *World science*. Warsaw, 2018. N 4 (32). Vol. 2. P. 29-37. URL: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/2321.pdf> (дата  звернення: 15.06.2019).
2. Гаркуша М. В. Підвищення колієстійкості нежорстких дорожніх одягів за рахунок укріплення ґрунтів основи. *Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2012. Вип. N 47. С. 47-53.
3. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Білан О. О. Моніторинг стану  дорожнього одягу для планування ремонтних робіт автомобільних доріг, у тому числі  для  СУСП. *Дороги і мости*. Київ, 2011. Вип. 13. С. 76-88. URL: [http://dorogimosti.org.ua/ua/monitoring-stanu-doroghnyogo-odyagu-dlya-planuvannya-remontnih-robit -avtomobilynih-dorig-u-tomu-chisli-dlya-susp](http://dorogimosti.org.ua/ua/monitoring-stanu-doroghnyogo-odyagu-dlya-planuvannya-remontnih-robit%20-avtomobilynih-dorig-u-tomu-chisli-dlya-susp) (дата звернення: 31.08.2019).
4. Мозговой В. В., Онищенко А. Н., Гаркуша Н. В. Методы повышения устойчивости к колееобразованию асфальтобетонного покрытия. Современные тенденции и направления строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений: Материалы научно-технической конференции, посвященной 50-летию республиканского дочерного унитарного предприятия «Белорусский дорожный научно-иследовательский институт «БелдорНИИ». Минск, 2012. С. 144-150.
5. Гаркуша М. В. Прогнозування накопичення залишкових деформацій в конструкції  нежорсткого дорожнього одягу. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції з участю студентів та молодих вчених «Сучасні комп’ютерно-інноваційні технології  проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг і аеродромів». Харків, 2012. С. 88-94.
6. Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В., Різніченко О. С., Аксьонов С. Ю., Білан О. О. Заходи з підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з інтенсивним рухом великовантажних транспортний засобів. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. 2013. Вип. 2013-1 (99). С. 58-65. URL: <http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2013/maket_2013-1(99).pdf> (дата звернення: 15.06.2019).
7. Аксьонов С. Ю., Гаркуша М. В. Теоретичні аспекти проектування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу заданої довговічності. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2013. Вип. 90. С. 57-65. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/90/057-065.pdf> (дата звернення: 15.06.2019).
8. Гаркуша М.В. Підвищення стійкості до утворення колії асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу. *Дороги і мости*. Київ, 2017. Вип. 17. С. 27-41. URL: <http://dorogimosti.org.ua/files/upload/ilovepdf_com-27-41.pdf> (дата звернення: 31.08.2019).
9. Онищенко А. М. Метод розрахунку колієстійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса, 2015. Вип. N 58. С. 288-294.
10. Онищенко А. М., Худолій С. М., Гаркуша М. В., Лещук О. М. Прогнозування та оцінка залишкових деформацій асфальтобетонного покриття з використанням методу скінченних елементів. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2017. Вип. 1 (37). С. 308-320. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/308.pdf> (дата звернення: 15.06.2019).
11. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю. Методика визначення тріщиностійкості та колієстійкості асфальтобетонних шарів конструкції дорожнього одягу з використанням доменних шлаків в шарах основи: науковий твір. Україна, свідоцтво N 48068, дата реєстрації 26.02.2013.
12. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю., Гаркуша М. В., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С. Методика приготування та результати випробування бітуму  модифікованого полімерами за допомогою лабораторного лопатевого змішувача. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2012. Вип. 26. Частина 1. С. 79-84. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/26_1_2013/079-084.pdf> (дата звернення: 15.06.2019).
13. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф., Гаркуша М.В., Аксьонов С.Ю. Використання нових нормативних документів для визначення  розрахункових характеристик дорожньо-будівельних матеріалів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2013. Вип. N 49. Частина 1. С. 245-251.
14. СОУ 45.2-00018112-020:2009 Будівельні матеріали. Асфальтобетон дорожній. Метод випробування на стійкість до накопичення залишкових деформацій. Київ, 2009. 18 с. (Інформація та документація).
15. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Різніченко О. С., Гаркуша М. В., Лещук О. М., Тюлєнєв Є. І., Плазій Є. П. СОУ 45.2-00018112-020:2009. Проект. Стандарт організації України. Дорожньо-будівельні матеріали. Метод випробування на стійкість до накопичення залишкових деформацій: літературний письмовий твір науково-технічного характеру. Україна, свідоцтво N 78942, дата  реєстрації 10.05.2018.
16. СОУ 45.2-00018112-046:2009 Асфальтобетон дорожній. Методика оцінки зчеплення між асфальтобетонними шарами при зсуві. Київ, 2009. 16 с. (Інформація та документація).
17. Гаркуша М. В. Вплив укріплення ґрунтів на підвищення довговічності конструкції дорожнього одягу та зменшення колієутворення на автомобільних дорогах України. Проектування, будівництво і експлуатація нежорстких дорожніх одягів: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, яка присвячена 80-річчю ХНАДУ та дорожньо-будівельного факультету. Харків, 2010. С.84-87.
18. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Білан О. О. Аналіз результатів випробування дорожнього одягу різних типів на кільцевому стенді з асфальтобетонними шарами. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг». Харків, 2013. С. 154-159.
19. П-Г.1-218-113:2009. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України. Київ, 2010. 168 с.

**REFERENCES**

1. Onyshchenko A. M., Garkusha M. V., Leshchuk O. M. Prediction and assessment of residual strain of asphalt concrete pavement using finite element method. *World science*. Warsaw, 2018. N 4 (32). Vol. 2. P. 29-37. URL: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/2321.pdf> (Last accessed: 15.06.2019) [in English].
2. Harkusha M. V. Pidvyshchennia koliiestiikosti nezhorstkykh dorozhnikh odiahiv za rakhunok ukriplennia gruntiv osnovy. *Visnyk odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury.* Odesa, 2012. N 47. p. 47-53. [in Ukrainian].
3. Volodymyr Mozghovyi, Artur Onyshchenko, Mykola Garkusha, Olexander Bilan Monitoring of motor road pavement condition, provided with the purpose of repair works planning of motor roads, including those for PMS. *Dorogi і mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2011. 13. P. 76-88. URL: <http://dorogimosti.org.ua/ua/monitoring-stanu-doroghnyogo-odyagu-dlya-planuvannya-remontnih-robit-avtomobilynih-dorig-u-tomu-chisli-dlya-susp> (Last accessed: 31.08.2019) [in Ukrainian].
4. Mozgovoy V. V., Onischenko A. N., Garkusha N. V. Metodyi povyisheniya ustoychivosti k koleeobrazovaniyu asfaltobetonnogo pokryitiya. Sovremennyie tendentsii i napravleniya stroitelstva, remonta i soderjaniya avtomobilnyih dorog i iskusstvennyih soorujeniy: Materialyi nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyaschennoy 50-letiyu respublikanskogo dochernogo unitarnogo predpriyatiya «Belorusskiy dorojnyiy nauchno-isledovatelskiy institut «BeldorNII». Minsk, 2012. P. 144-150. [in Russian].
5. Harkusha M. V. Prohnozuvannia nakopychennia zalyshkovykh deformatsii v konstruktsii nezhorstkoho dorozhnoho odiahu. Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii z uchastiu studentiv ta molodykh vchenykh «Suchasni komp’iuterno-innovatsiini tekhnolohii proektuvannia, budivnytstva, ekspluatatsii avtomobilnykh dorih i aerodromiv». Kharkiv, 2012. P. 88-94. [in Ukrainian].
6. Arthur Onischenko, Vadym Nevinglovsky, Mykolay Garkusha, Oleksandr Riznichenko, Sergei Aksenov, Olexander Bilan. Measures to improve track hardness of asphalt concrete roads with heavy traffic of heavy vehicles. *Vìsnik Donbasʹkoì nacìonalʹnoï akademìï budìvnictva ì arhìtekturi.* 2013-1 (99). P. 58-65. URL: <http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2013/maket_2013-1(99).pdf> (Last accessed: 15.06.2019).
7. Aksonov S. Yu., Harkusha M. V. Teoretychni aspekty proektuvannia asfaltobetonnykh shariv dorozhnoho odiahu zadanoi dovhovichnosti. Avtomobìlʹnì dorogi ì dorožnê budìvnictvo. Kyiv, 2013. 90. P. 57-65. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/90/057-065.pdf> (Last accessed: 15.06.2019).
8. Mykola Garkusha. Increasing the stability to the development of the asphalt concrete coating of impressive road clothing. Dorogi і mosti [Roads and bridges]. Kyiv, 2017. 17. P. 27-41. URL: <http://dorogimosti.org.ua/files/upload/ilovepdf_com-27-41.pdf> (Last accessed: 31.08.2019) [in Ukrainian].
9. Onyshchenko A. M. The method of calculation the asphalt pavement coverage of motor roads to rutting. *Visnyk odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury.* Odesa, 2015. N 58. p. 288–294. [in Ukrainian].
10. Onishchenko A. M., Khudolii S. M., Harkusha M. V. Leshchuk A. N. Prediction and  assessment of residual strain of asphalt pavement using finite element method. Vìsnik  Nacìonalʹnogo transportnogo unìversitetu. Kyiv, 2017. 1 (37). P. 308-320. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/37/308.pdf> (Last accessed: 15.06.2019) [in Ukrainian].
11. Mozgovyi V. V., Onyshchenko A. M., Lapteva N. S., Garkusha M. V., Aksenov S. Yu. Method of determination of friction resistance and cross-resistance of asphalt concrete layers of construction of road clothes using blast furnace slag in base layers: Scientific work. Ukraine, Certificate N 48068, registration date 26.02.2013 [in Ukrainian].
12. Mozgovyi V. V., Onishchenko A. M., Axenov S. Y., Garkusha M. V., Nevinglovskiy V. F., Riznichenko O. S., Methods of preparation and test results of bitumen modified with polymers using laboratory shovel mixer. *Vìsnik Nacìonalʹnogo transportnogo unìversitetu*. Kyiv, 2012. 26. Part 1. P. 79-84. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/26_1_2013/079-084.pdf> (Last accessed: 15.06.2019) [in Ukrainian].
13. Mozgovyi V. V., Onyshchenko A. M., Nevinglovskyi V. F., Garkusha M. V., Aksenov S. Yu. Use of new regulatory documents for determining the design characteristics of road building materials. *Visnyk odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury.* Odesa, 2013. 49. Part 1. P. 245-251. [in Ukrainian].
14. Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-020: 2009) Budivelni materialy. Asfaltobeton dorozhnii. Metod vyprobuvannia na stiikist do nakopychennia zalyshkovykh deformatsii (Building materials. Road asphalt concrete. Test method for resistance to accumulation of residual strains). Kyiv, 2009. 18 p.  (Information and documentation) [in Ukrainian].
15. Mozgovyi V. V., Onyshchenko A. M., Riznichenko O. S., Garkusha M. V., Leshchuk O. M., Tulyenev Ye. I., Plasiy E. P. SOU 45.2-00018112-020:2009. Proekt. Standart orhanizatsii Ukrainy. Dorozhno-budivelni materialy. Metod vyprobuvannia na stiikist do nakopychennia zalyshkovykh deformatsii (SOU 45.2-00018112-020:2009. Project. Standard of Organization of Ukraine. Road building materials. Test method for resistance to accumulation of residual deformations): Literary Written Product of a Scientific and Technical Character. Ukraine, Certificate N 78942, registration date 10.05.2018 [in Ukrainian].
16. Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-046:2009) Asfaltobeton dorozhnii. Metodyka otsinky zcheplennia mizh asfaltobetonnymy sharamy pry zsuvi. Kyiv, 2009. 16 p.  (Information and documentation) [in Ukrainian].
17. Harkusha M. V. Vplyv ukriplennia gruntiv na pidvyshchennia dovhovichnosti konstruktsii dorozhnoho odiahu ta zmenshennia koliieutvorennia na avtomobilnykh dorohakh Ukrainy (Influence of strengthening of soils on increasing durability of the design of road clothing and reduction of knee formation on highways of Ukraine). Proektuvannia, budivnytstvo i ekspluatatsiia nezhorstkykh dorozhnikh odiahiv: materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, yaka prysviachena 80-richchiu KhNADU ta dorozhno-budivelnoho fakultetu (Designing, construction and operation of non-rigid road clothing: Materials of the international scientific and technical conference devoted to the 80th anniversary of the KHNAHU andthe road-buildingfaculty). Kharkiv, 2010. p. 84-87. [in Ukrainian].
18. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Aksonov S. Yu., Bilan O. O. Analiz rezultativ vyprobuvannia dorozhnoho odiahu riznykh typiv na kiltsevomu stendi z asfaltobetonnymy sharamy (Analysis of the results of testing various types of road clothing on a ring stand with asphalt concrete layers). Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Suchasni tekhnolohii budivnytstva ta ekspluatatsii avtomobilnykh dorih» (Materials of the international scientific and technical conference «Modern technologies of construction and operation of highways»). Kharkiv, 2013. P. 154-159. [in Ukrainian].
19. Technical rules (P-G.1-218-113:2009) Tekhnichni pravyla remontu ta utrymannia avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia Ukrainy (Technical rules for repair and improvement of automobile roads of Ukraine). Kyіv, 2010. 168 p. [in Ukrainian].

**Mykola Garkusha,**[*https://orcid.org/0000-0002-5388-0561*](https://orcid.org/0000-0002-5388-0561)

**Artur Onyshchenko**, *D.Sc., Professor,* [*https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*](https://orcid.org/0000-0002-1040-4530)

*National Transport University, Kiev, Ukraine*

**IMPROVING THE METHOD OF EVALUATION OF THE STABILITY OF NON-RIGID PAVEMENT AGAINST RUTTING**

***Abstract***

Introduction. The experience of road operations of recent years shows that one of the most common defects in asphalt pavement under the impact of traffic loads and high summer temperatures is rutting which leads to decrease of its life time and, respectively, the road pavement design as the whole. The need to improve the method of evaluation of stability of non-rigid pavement against the rutting is determined.

Problem statement. Taking into account that non-rigid pavement is in complicated operational conditions (it is confirmed by intensive growth of defects, such as rutting) due to increase of traffic loads and high summer temperatures, it is needed to increase the stability of non-rigid pavement against rutting.

Purpose is to improve the method of assessing the stability of the non-rigid asphalt pavement against rutting under the impact of vertical loads of vehicles at high summer temperatures.

Methods of research are analytical and experimental using the provisions of the theory of elastic plasticity and thermal elasticity and experimental methods of studying the rutting formation in non-rigid asphalt pavement; numerical simulation; mathematical statistics.

Results. On the basis of the performed analysis, the working conditions of non-rigid pavements were considered, as well as the existing theoretical and experimental methods of forecasting the rutting formation was analyzed.

Analytical dependency is achieved and method of evaluation the stability of non-rigid pavement against rutting under the impact of vertical vehicle loads is improved that allow considering the complex impact of major factors, namely: thermo viscous elastic properties of asphalt, soil stabilization, asphalt temperature, vertical pressure on pavement of vehicle tires, intention of vertical pressure, time of load impact.

The calculated thermoreological characteristics of asphalt concrete and reinforced soils, the adhesion strength between asphalt and the foundation during shearing were experimentally researched. Field, laboratory and bench tests of the impact of various factors on the formation of residual strains in the form of rut were carried out, as well as the regularities of impact of influence factors on the intensity of the rutting formation in non-rigid asphalt pavement.

Conclusion. During work, the method of evaluation of the stability of the non-rigid pavement against the rutting was improved and the complex impact of the main factors was considered, namely: thermo viscous elastic properties of asphalt concrete, vertical pressure of vehicles on the pavement and the time of its impact on the structure; the intensity of vertical loadings. The results of research were used in the development of regulations for the design, construction, reconstruction, repair and operation of asphalt pavements on highways of Ukraine.

***Key words:*** highway, asphalt concrete, bitumen, pavement, rutting, loading, stability, temperature, thermo viscous elastic.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.745.1:691

## *1*Зеленовський В. А., [*https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*](https://orcid.org/0000-0001-5834-5456)

## *1*Копинець І. В.,[*https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*](https://orcid.org/0000-0002-0908-4795)

## *2*Онищенко А. М., *д-р техн. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*](https://orcid.org/0000-0002-1040-4530)

*1Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

*2Національний транспортний університет, м. Київ, Україна*

## ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ЕПОКСИАСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ

***Анотація***

Вступ. Надано аналіз останніх досліджень щодо попередження утворення дефектів асфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах та подовження термінів їх експлуатаційного періоду. Визначено перспективу застосування в Україні асфальтобетонних покриттів з асфальтобетону модифікованого термореактивними полімерами. Сформульовано задачі дослідження.

Проблематика. Відсутність достатнього досвіду застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах України та невизначеність економічної доцільності його застосування.

Мета роботи. Виконати аналіз існуючого досвіду застосування асфальтобетонного покриття з асфальтобетону, модифікованого термореактивними полімерами, для підвищення його довговічності на автодорожніх мостах.

Матеріали і методи. Аналіз інформаційних джерел щодо застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах. Аналітичні дослідження асфальтобетонних сумішей, модифікованих епоксидними складовими.

Результати. Визначено перспективні напрями покращання якості покриттів на автодорожніх мостах, підвищення їх працездатності та довговічності. Проведено аналітичний огляд досвіду застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах. Вивчено питання модифікації бітумної основи асфальтобетонних сумішей епоксискладовими з метою поліпшення їх технічних характеристик. Встановлено перспективну економічну ефективність застосування епоксиасфальтобетонних сумішей в Україні. Сформульовані задачі подальшого дослідження епоксиасфальтобетонного покриття при його застосуванні на автодорожніх мостах.

Висновки. Аналіз інформаційних джерел щодо застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах показав економічну та технічну доцільність застосування цих покриттів, оскільки у порівнянні із покриттями з асфальтобетонів стандартного складу (без модифікаторів) вони мають значні переваги; введення у бітум епоксискладових від 5,0 % до 20,0 % призводить до суттєвого підвищення міцності та теплостійкості епоксиасфальтобетону за всіх температур. Впровадження епоксиасфальтобетонів дозволяє підвищити якість та довговічність покриттів на автодорожніх мостах, а також значно скоротити витрати на ремонтні роботи.

***Ключові слова:*** епоксиасфальтобетонна суміш, асфальт, модифікація бітуму, довговічність дорожнього покриття.

**Вступ**

***Актуальність поставленої проблеми*.** Транспортно-експлуатаційний стан переважної більшості автодорожніх мостів в Україні, як і в ряді інших країн східної Європи, не відповідає сучасним світовим вимогам дорожнього руху і потребує поліпшення з урахуванням соціально економічних потреб держави. На автомобільних дорогах загального користування в Україні експлуатується близько 16150 автодорожніх мостів [1]. Переважна їх більшість має залізобетонну плиту проїзної частини з асфальтобетонним покриттям. Останніми роками у зв’язку із зростанням параметрів транспортних навантажень та під дією аномально високих літніх температур асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів досить швидко втрачає несну здатність. Значного розповсюдження набули дефекти у вигляді:

* колії (деформація поперечного профілю дорожнього полотна уздовж лінії накату);
* викришування (порушення цілісності покриття за рахунок випадання частин мінерального матеріалу);
* розкритих тріщин (лінійні пошкодження з шириною розриву більше 3 мм);
* лущення (послідовне руйнування поверхні в результаті відшаровування тонких частинок матеріалу);
* вибоїн (дефекти у формі поглиблень з різко позначеними краями);
* поодиноких тріщин або сітки тріщин (поздовжні, перетині, поперечні розриви, хаотично розташовані на поверхні покриття без будь-якої закономірності).

У результаті, необхідно виконувати відновлення покриттів на автодорожніх мостах з підвищеною періодичністю або виконувати передчасні ремонти. Це, в свою чергу, вимагає залучення додаткових вагомих витрат, а також створює значні труднощі у русі транспортних засобів під час усунення дефектів.

Одним з найважливіших факторів, що впливає на знижений терміни служби покриттів в умовах інтенсивного та вантажонапруженого руху транспорту є бітуми з недостатньо якісними властивостями. У порівнянні з іншими дорожньо-будівельними матеріалами бітуми є найбільш чутливими до дії транспортних навантажень та впливу погодно-кліматичних факторів. Бітум як термопластичний матеріал розм’якшується при підвищених температурах та стає крихкими при низьких, що призводить до утворення на покриттях мостів зазначених вище дефектів.

***Аналіз останніх досліджень*.** Сьогодні в Україні реальні строки служби асфальтобетонного покриття на мостах становлять 6-12 років замість нормативних 15-20 років. Передчасні ремонти та відновлення цих покриттів вимагають багатомільйонних додаткових витрат, які можна було б спрямувати на будівництво нових або ремонт та реконструкцію існуючих мостів. Одним з вирішальних факторів, що впливає на терміни служби покриттів в умовах інтенсивного та вантажонапруженого транспортного руху, є властивості бітумів.

З усіх дорожньо-будівельних матеріалів бітуми є найбільш чутливими до дії транспортних навантажень та впливу погодно-кліматичних факторів. Бітум за високих літніх температур розм’якшується, що призводить до утворення колій, зсувів, напливів. За низьких зимових температур він стає крихким та жорстким, що при низькотемпературному стисканні асфальтобетонного покриття обумовлює появу поперечних тріщин. Низька міцність бітуму є причиною того, що внаслідок тривалої дії транспорту та постійних розтягувальних напружень на покриттях виникають хаотичні «втомні» тріщини. Недостатнє прилипання (адгезія) бітуму до поверхні кам’яного матеріалу призводить до появи на покриттях лущення, вибоїн та викришування [2].

Зважаючи на вищевикладене, направлена зміна властивостей бітуму є найбільш ефективним способом підвищення працездатності та довговічності дорожнього покриття на автодорожніх мостах. Найбільш ефективним напрямком підвищення довговічності асфальтобетонного покриття є зміна поведінки бітуму шляхом модифікації різними видами добавок: полімерними, адгезійними (катіонними поверхнево-активними речовинами), восками, гумовою крихтою тощо [3].

Дорожній бітум як один із основних компонентів асфальтобетону, що виготовляється на заводах України, має низьку корозійну стійкість, що призводить до виникнення на поверхні покриття вищезазначених дефектів. Серед усіх відомих модифікаторів найменш дослідженими є термореактивні полімери, зокрема епоксидні смоли та затверджувачі до них (епоксискладові). Разом з цим, аналіз досліджень, які були проведені на сьогоднішній день, вказують на те, що епоксискладові можуть докорінно змінювати властивості бітумів та асфальтобетонів, і ефект від їх застосування може бути значно вищим ніж у інших модифікаторів [3, 4].

Отже, альтернативним рішенням з покращання якості бітумів є модифікація їх відповідними термореактивними полімерами, які здатні забезпечити додаткову гнучкість при низьких температурах і додаткове зчеплення для сприйняття напружень.

В країнах західної Європи, Китаю, США та Австралії спостерігається значний інтерес до використання в ролі модифікаторів – термореактивних полімерів (зокрема епоксидних смол). Асфальтобетонні суміші різних видів, до складу яких входять епоксидні смоли, отримали назву «Епоксиасфальтобетони».

Враховуючи те, що вітчизняні дорожні бітуми суттєво відрізняються якісними характеристиками від тих, що використовуються у країнах з добре розвиненою інфраструктурою, постало питання вивчення впливу таких модифікаторів на властивості дорожніх бітумів, що застосовуються в Україні. Окрім цього в Україні відсутня чітка адаптована технологія влаштування епоксиасфальтобетонних покриттів, відсутні конкретні параметри щодо виробництва епоксиасфальтобетонних сумішей, а також недостатня кваліфікація спеціалістів, які б вільно володіли цими питаннями. Це все спонукає до проведення додаткових досліджень.

До цього часу, не зважаючи на широке застосування термореактивних полімерів у світі, в Україні такі дослідження проведені в недостатній кількості, а також враховуючи, що їх використання повинно призначатись на основі окремих фізико-механічних показників – не має можливості пересвідчитись в доцільності їх застосування [3]. Щоб наблизитись до вирішення цього питання, було проведено аналіз вітчизняного та світового досвіду застосування епоксиасфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах.

Вивченням епоксиасфальтобетону займаються такі провідні наукові центри, як: BASt (Німеччина), TRL (Велика Британія), LCPC (Франція), OPUS (Нова Зеландія), Turner Fairbank Highnay Research Center (США) тощо.

За їхніми даними при заміні (20-35) % бітуму епоксискладовою спостерігається значне поліпшення показників міцності асфальтобетонного покриття, особливо при підвищених температурах, в 2-3 рази збільшується його опір колієутворенню без погіршення при цьому низькотемпературної поведінки [2]. Характерно-якісною рисою епоксиасфальтобетону є здатність набирати міцність протягом тривалого періоду експлуатації. Крім того, епоксиасфальтобетон відзначається уповільненим старінням під впливом погодно-кліматичних факторів та стійкістю до дії паливно-мастильних матеріалів, що також дасть можливість значно підвищити строк служби покриттів на його основі [2].

Конструкція дорожнього одягу на залізобетонній плиті проїзної частини моста повинна визначатись проектом та включати в себе, як правило: бетонний вирівнювальний шар; гідроізоляцію; бетонний захисний шар (при необхідності); двошарове асфальтобетонне покриття. Конструкція дорожнього одягу на плиті проїзної частини з використанням епоксиасфальтобетону, враховуючи його захисні гідрофільні властивості, виключає необхідність влаштування гідроізоляції та відповідно бетонного захисного шару, що дає можливість зберегти ресурси при будівництві.

Вартість асфальтобетонних сумішей, модифікованих термореактивними полімерами, звичайно вища у порівнянні із звичайними асфальтобетонними сумішами, але, враховуючи ряд факторів, які впливають на вартість кінцевого продукту, таких як збільшений тривалий строк служби покриття або економія матеріалів при укладанні, обумовлює високу рентабельність його застосування [5].

***Мета роботи.*** Виконати аналіз існуючого досвіду застосування асфальтобетонного покриття з асфальтобетону, модифікованого термореактивними полімерами для підвищення його довговічності на автодорожніх мостах.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

Епоксидні смоли являють собою олігомери, що містять епоксидні групи, які здатні під  дією затверджувачів утворювати зшиті полімери. Найбільш поширені епоксидні смоли – продукти поліконденсації епіхлоргідрину з фенолами, найчастіше – з бісфенолом А [2].

Поєднуючи різноманітні смоли і затверджувачі, можна отримати матеріали, які будуть мати різні властивості, від гумоподібних до жорстких і твердих, що перевершать навіть сталь за міцнісними характеристиками. На сьогоднішній день епоксидна смола, властивості якої перевершують характеристики всіх інших матеріалів на основі синтетичних смол, використовується в усіх галузях промисловості.

Найбільш універсальним і надійним клеєм вважається саме епоксидний. Завдяки його міцності та хорошій адгезії клейового з'єднання, він однаково добре склеює як взуття, так і деталі літаків. Епоксидна смола використовується, як просочувальний матеріал для склонитки і склотканини, для виготовлення склопластиків, які застосовують у кораблебудуванні, будівництві, літакобудуванні, виготовленні машинних деталей та ін [6].

Крім того, така смола входить до складу покриття для гідроізоляції та хімічно стійких покриттів, а також в фарби для внутрішніх і зовнішніх робіт, гідроізолювальні зміцнювальні просочення для дерева, бетону та інших пористих матеріалів. Останнім часом епоксидні смоли знаходять застосування в дорожньому будівництві [6].

В рамках реалізації міжнародного проекту Economic Evaluation of Long Pavements, що виконувався під егідою Спільного OECD/ECMT Центру транспортних досліджень, доведено економічну доцільність використання на ділянках автомобільних доріг з високою інтенсивністю руху дорожнього покриття з епоксиасфальтобетону, яке має набагато довший термін експлуатації (до 40 років) і практично не потребує витрат на ремонт та утримання.

В останні два десятиліття епоксиасфальтобетон знайшов широке застосування в якості покриття товщиною приблизно 50 мм на мостах по всьому світу, особливо в Східній Азії. Зокрема, епоксиасфальтобетон влаштовано в якості покриття на мостах Sutong (найдовший вантовий міст в Китаї), Xihoumen (висячий міст в Китаї) та Oakland Bay Bridge (висячий міст в  США). При влаштуванні таких покриттів було проведено багато попередніх досліджень, вирішено ряд складних проблем влаштування такого дорожнього покриття та витрачено значні зусилля для того, щоб мати можливість скористатись унікальними властивостями епоксискладових [7].

За останні роки велика кількість дослідження і технічні документи були опубліковані з різних аспектів застосування щільних епоксиасфальтобетонних сумішей на мостах у якості покриття, що стосуються виробництва цих сумішей, механічного аналізу епоксиасфальтобетону, структурного аналізу, оцінки ефективності та методів технічного обслуговування. Інженери мають досвід успішного застосування унікальних властивостей епоксидної смоли для вирішення складних проблем дорожнього покриття на мостах. Але тим не менш питання з системного застосування цього матеріалу у мостовому будівництві ще досі потребує глибокого вивчення та вдосконалення.

Для вирішення проблем недостатніх технічних характеристик асфальтобетонних покриттів на аеродромах, які могли б забезпечити стійкість до великих навантажень, до високих  температур і ерозійного впливу, перше покоління епоксиасфальтобетону було розроблено «Shell Oil Co», з торговою маркою «EPON» [5].

Покриття влаштоване з використанням цього нового в’яжучого не схильне до утворення колії, рух по ньому може бути відкритим вже через дві години і є стійким до дії агресивних середовищ. Розроблений новий вид асфальтобетону отримав назву «Shell Epoxy Asphalt» [5].

Епоксиасфальтобетон – гарячий асфальтобетон, виготовлений із застосуванням в’яжучого, що модифіковане великим вмістом епоксидної смоли та затверджувача [2]. Під час вироблення асфальтобетонної суміші епоксидна смола та затверджувач змішуються, і відбувається хімічна реакція, наслідком якої є створення жорсткої полімерної сітки. Результатом реакції є незворотне твердіння в’яжучого (термозатвердівання). При низьких температурах реакція проходить повільно, а при підвищенні температури вона значно прискорюється. Таким чином, температура навколишнього середовища визначає час, за який суміш залишається пластичною і може бути укладена в покриття.

Зважаючи на властивості бітумів та епоксидних смол, вміст останніх значно перевищує вміст термопластичних полімерів і складає від 20 % до 35 % від маси в’яжучого. Характеристики бітумно-епоксидного в’яжучого після полімеризації настільки відрізняються від вихідного бітуму, що можна говорити не про поліпшення його якості, а про радикальну зміну властивостей. За даними дослідницького центру компанії «Shell» головними особливостями отриманого бітуму є здатність не розм’якшуватись під дією тепла і не розчинятись в нафтових розчинниках [8]. Типові властивості епоксиасфальтобетону наведено в таблиці 1.

***Таблиця 1***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ч.ч. | Найменування показника | Асфальт з епоксискладовою | Звичайний  асфальтобетон |
| 1 | Стабільність по Маршаллу, кН | 45 | 7,5 |
| 2 | Текучість по Маршаллу, мм | 4,0 | 4,0 |
| 3 | Частка Маршалла | 11,2 | 1,9 |
| 4 | Модуль жорсткості, Н/м, за температури 0 °С | 2,0-1010 | 1,51010 |
| 5 | Модуль жорсткості, Н/м, за температури 20 °С | 1,2·1010 | 3,0·109 |
| 7 | Модуль жорсткості, Н/м, за температури 40 °С | 3,3·109 | 4,0·108 |
| 8 | Модуль жорсткості, Н/м, за температури 60 °С | 19,5·108 | — |
| 9 | Границя втоми при згині (циклів до руйнування при вмісті в’яжучого 6 %) | 1,0·106 | 3,0·104 |
| 10 | Границя втоми при згині (циклів до руйнування при вмісті в’яжучого, 7 %) | > 2,0·106 | 2,0·105 |
| 11 | Міцність при стисканні, МН/м (початкова) | 16,0 | 3,7 |
| 12 | Міцність при стисканні, МН/м (після 7 діб витримки із зануренням в масло | 17,0 | 3,1 |
| 13 | Міцність при стисканні, МН/м (після 30 діб витримки із зануренням в масло | 16,9 | 2,2 |
| 14 | Міцність при стисканні, МН/м (після 56 діб витримки із зануренням в масло | 17,2 | 1,8 |

Результати випробувань в різних країнах світу свідчать, що різниця границі втоми при згині між звичайним асфальтобетоном і епоксиасфальтобетоном є не менше ніж десятикратною. Термореактивний характер в’яжучого виключає утворення на покритті з епоксиасфальтобетону зсувів та колійності.

За економічними показниками бітумно-епоксидне в’яжуче в середньому коштує в 12 разів дорожче звичайного бітуму. Але такі технічні характеристики епоксиасфальтобетону, як межа втоми при згині та залишкова деформація в 10 і більше разів перевищують відповідні показники звичайного асфальтобетону [8]. Таким чином, збільшення строку служби епоксиасфальтобетону робить цей матеріал економічно ефективним для особливо важких умов експлуатації дороги: на автодорожніх мостах, на ділянках автодоріг з високою інтенсивністю руху, перехрестях, вулицях великих міст та місцях концентрації ДТП.

Визначено, що одним з перспективних матеріалів, який може забезпечити строк служби покриттів на мостах з підвищеною довговічністю, є епоксиасфальтобетон. З 1967 року більше 50 000 тон епоксиасфальтобетону було укладено на металеві та бетонні покриття мостів. Одним з перших випадків його застосування було влаштування в 1967 році проїзної частини на ортотропній сталевій прогоновій будові мосту в San Meteo-Hayward через протоку San Francisco. Міст до теперішнього часу знаходиться в задовільному стані. Слід однак зазначити, що внаслідок м’якого клімату (практично без морозів) протиожеледні матеріали не застосовувались [8]. В той же час покриття з епоксиасфальтобетону піддавалось значному ультрафіолетовому опромінюванню.

В результаті досліджень встановлено, що при виробництві епоксиасфальтобетону температурний інтервал нагрівання мінерального матеріалу знаходиться в межах від 143 °С до 150 °С. Нижня температурна границя початку ущільнення становить 82 °С, закінчення – 66 °С. Час транспортування залежить від температури епоксиасфальтобетонної суміші та вантажопідйомності транспорту. При температурі 116 °С допустима тривалість транспортування коливається від 42 хв. до 62 хв. При 127 °С цей інтервал зменшується до (35­-43) хв [8].

Одним з наукових центрів, де виконувались дослідження епоксиасфальтобетону, є  компанія «Road construction by Scott Wilson» (Нотінгем, Велика Британія). Вивчались два типи епоксиасфальтобетону: HMA – гарячий асфальтобетон та SMA – щебенево-мастиковий асфальтобетон. Епоксив’яжуче складалось з двох частин: А – епоксидна смола та В – бітум разом  із затверджувачем. Вміст бітуму у вихідних асфальтобетонах становив 6 %, епоксив’яжучого – 6,3 % від маси мінерального матеріалу. SMA додатково вміщував 0,3 % стабілізаційних волокон [9].

Одразу після ущільнення зразки епоксиасфальтобетону (HMA та SMA) мали жорсткість, як і зразки стандартних асфальтобетонів. Після завершення «затвердіння» та повної стабілізації структури епоксиасфальтобетони HMA та SMA мали жорсткість за температури 20 °С в 3 рази більшу, ніж контрольні зразки.

В повністю затверділому стані епоксиасфальтобетони мали у 2-8 разів більший опір повзучості під багаторазовими навантаженнями при 40 °С та опір утворенню колії від колеса за температури 60 °С, ніж відповідні контрольні матеріали.

Випробування на опір втомі показали, що за цим показником довговічність епоксиасфальтобетону в 10 разів більша, ніж контрольних сумішей [9].

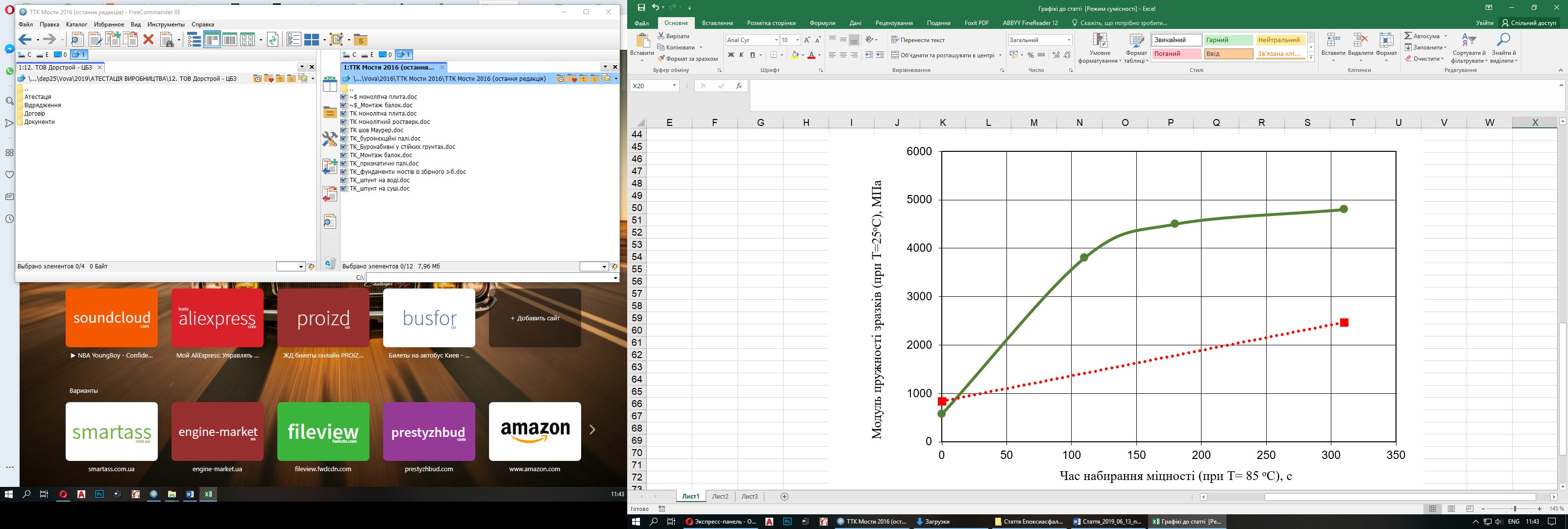
Результати випробування на вигин балки за пониженої температури показали, що епоксиасфальтобетони виявили збільшену міцність/жорсткість, але із зменшеною розтяжністю в порівнянні з контрольними зразками [9].

Таким чином, можна зробити висновок, що за основними характеристиками епоксиасфальтобетони перевищують контрольні суміші в 2-3 рази, а в деяких випадках більше ніж в 10 разів. В цілому, у порівнянні з контрольними зразками із звичайними бітумами, епоксив’яжуче надає асфальтобетонам такі переваги: збільшення жорсткості (що сприяє збільшенню опору навантаженням), зростання пружності при підвищених температурах (що  призводить до підвищення стійкості стосовно утворенню деформацій), а також надає більш низьку чутливість до температури та навантажень.

В Центральній лабораторії OPUS (Нова Зеландія) були проведені дослідження впливу  бітуму, модифікованого епоксидною смолою, на когезійні властивості пористого асфальтобетону  (OGPA).

При проведенні досліджень для виробництва OGPA використовувався епоксибітум, який є продуктом двох частин, змішаних перед безпосереднім використанням. Частина А складалась з епоксидної смоли, частина В – із затверджувача та бітуму. Вміст в’яжучого в суміші становив 4,7 %. Пористість OGPA – 20,4 % [12].

Проводились непрямі вимірювання модуля пружності (ІТМ) контрольних зразків асфальтобетону OGPA та епоксиасфальтобетону OGPA. ІТМ епоксиасфальтобетону збільшився від 570 одразу після виготовлення до 4300 після затвердівання (рис. 1), тобто більше ніж в 7 разів. Для порівняння, ІТМ контрольних зразків асфальтобетону – з 840 до 2500 [10].



***Рисунок 1*** *–* Залежність модулю пружності від часу затвердівання

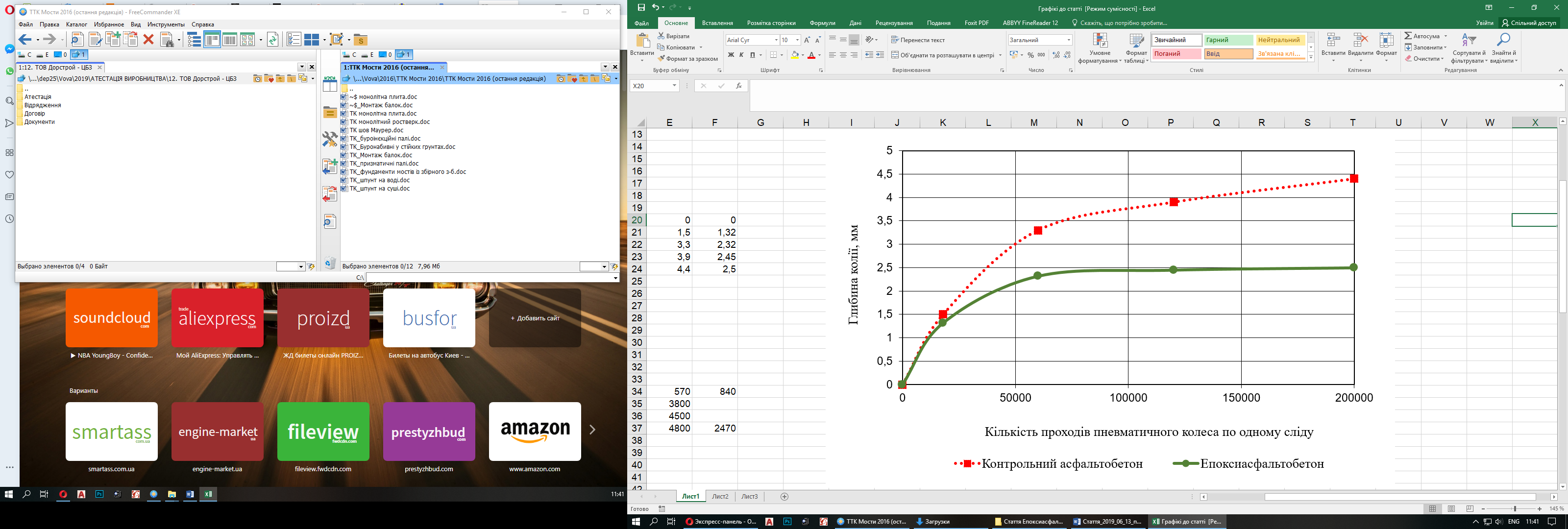
Когезія лабораторних і стендових зразків вихідного асфальтобетону OGPA та епоксиасфальтобетону OGPA визначалась за методом Cantabro. [10] Цей метод полягає у визначенні абразивного стирання матеріалу. За результат випробувань приймається втрата маси зразка (у %), віднесена до його вихідної маси. Результати випробувань за методом Cantabro (%  втрати маси) незістарених зразків (у випадку епоксиасфальтобетону OGPA після витримки за температури 85 °С протягом 120 год.) та після їх старіння (витримки за температури 85 °С протягом 909 год.) наведені в таблиці 2 [10].

***Таблиця 2***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Назва асфальтобетону | Втрата маси, % | |
| Незістарених зразків | Зістарених зразків |
| Епоксиасфальтобетон OGPA | 14,9 ± 4,6 | 17,6 ± 4,6 |
| Контрольний асфальтобетон OGPА | 53,1 ± 5,2 | 72,1 ± 7,7 |

За даними таблиці втрата маси епоксиасфальтобетону набагато менша, ніж контрольного  асфальтобетону: в 3,6 рази незістарених зразків та в 4,1 рази після їх старіння. Слід також  зазначити, що старіння суттєво не вплинуло на втрату маси епоксиасфальтобетону (14,9 % проти 17,6 %) тоді як для контрольного асфальтобетону воно значно збільшилось (на  26 %).

Були проведені випробування дослідних ділянок епоксиасфальтобетону та контрольного асфальтобетону на колієутворення. Для цього на стендових ділянках було виконано 198 тис. проходів колеса (протягом 3 тижнів) з навантаженням еквівалентним 8,5 т на вісь. Мінімальна температура повітря при випробуваннях становила 4,2 °С, максимальна – 27,7 °С [10]. На рис. 2 представлена динаміка утворення колії в залежності від кількості проходів колеса.



***Рисунок 2*** – Залежність глибини колії від кількості проходів колеса

Як видно з графіка, глибина колії на ділянці з епоксиасфальтобетоном була значно менше, ніж на контрольній ділянці (2,5 мм проти 4,2 мм). Слід зазначити, що на ділянці, де був укладений епоксиасфальтобетон, глибина колії після 60 проходів колеса стабілізувалась, тоді як колійність на контрольній ділянці постійно збільшувалась.

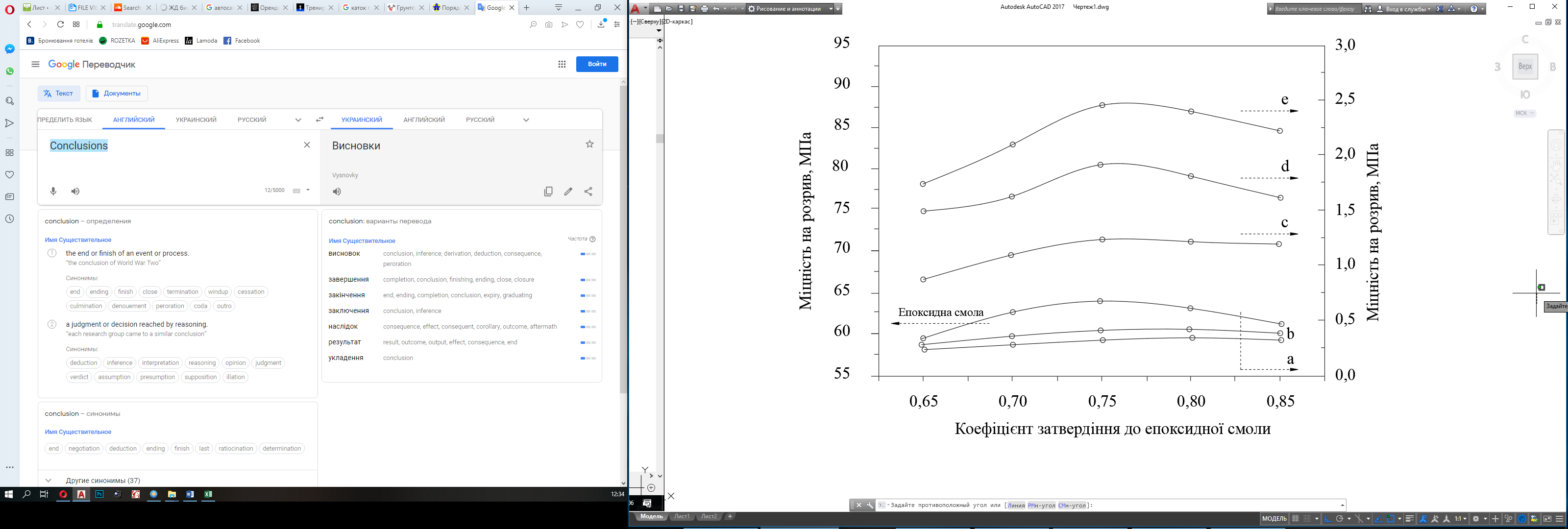
Проведені в OPUS дослідження показали, що когезійна міцність епоксиасфальтобетону OGPA значно більша, ніж контрольного асфальтобетону OGPA на чистому бітумі (випробування за методом Cantabro). Метод Cantabro також засвідчив більший опір епоксиасфальтобетону окисленню, тобто підвищену довговічність. Так, стандартний OGPA, окислений до стану, еквівалентному приблизно 7 рокам служби, показав майже подвійне збільшення втрати маси в порівнянні з незістареним OGPA. В той же час штучне старіння не вплинуло на втрату маси епоксиасфальтобетону. Випробування на колійність показали набагато більшу стійкість епоксиасфальтобетону до дії транспорту, ніж стандартного асфальтобетону [10].

Yang Kang виконував дослідження з порівняння реологічних властивостей епоксибітумного в'яжучого, бітуму контрольних зразків і бітуму модифікованого полімером типу СБС. Зазначається, що епоксибітумне в’яжуче суттєво відрізняється від інших модифікованих бітумних в'яжучих.

Результати випробувань на динамічному реометрі зсуву показали, що деформації повзучості епоксибітуму від 10-7 до 10-2 рази більше ніж у бітумі контрольних зразків  
і від 10-6 до 10-2 рази більше, ніж в бітумі модифікованому полімером типу СБС [11].

Дослідження з повзучості та відновлення показали, що епоксибітум повністю еластичний після 100 циклів завантаження-розвантаження, це означає, що епоксибітум відзначається високою стійкістю до утворення колії.

В дослідженнях Peiliang Cong щодо впливу співвідношення затверджувача до епоксидної  смоли на міцність при розтягуванні затвердженої епоксидної смоли та бітумного в’яжучого з епоксидною смолою використовувався бітум, комплексно модифікований полімером  та епоксидною смолою (рис. 3). Вплив співвідношення затверджувача до епоксидної смоли на границю міцності при розриві епоксидної смоли і епоксибітуму, що містить епоксидну смолу: (*а*) 10 %, (*b*) 20 %, (*e*) 30 %, (*d*) 40 %, (*c*) 50 % [12].

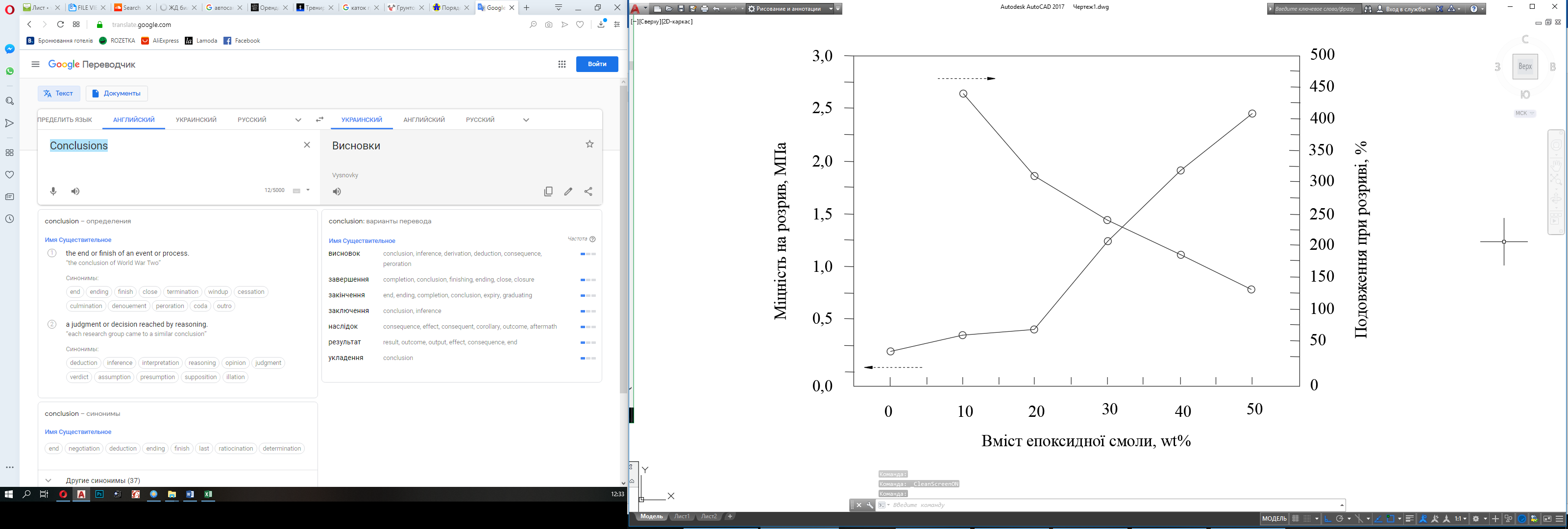


***Рисунок 3*** – Залежність міцності та розрив від кількості епоксидної смоли та співвідношення компонентів

Границя міцності при розтягуванні підвищується із збільшенням відсоткового вмісту затверджувача. При відношенні затверджувача до епоксидної смоли (0,75), міцність на розрив переходить через максимум і становить 64,1 МПа. Із збільшенням відношення міцність починає знижуватись [12]. Саме відношення затверджувача до епоксидної смоли (0,75) може вважатися оптимальним, оскільки забезпечується найбільша міцність затверділої смоли.

Залежність міцності епоксибітуму, що вміщує різну кількість епоксискладових є аналогічною, що свідчить про незначний вплив бітумного середовища на затвердівання епоксидної смоли.

Границю міцності при розтягуванні і відносне подовження при розриві для епоксибітумів наведено на рис. 4. Границя міцності при розтягуванні епоксибітуму збільшується зі збільшенням вмісту епоксидних складових [12]. Границя міцності при розтягуванні епоксибітуму повільно збільшується при вмісті епоксискладових до 20 %, і є більшою ніж у вихідного модифікованого бітуму. Границя міцності при розтягуванні помітно збільшується, коли вміст епоксискладових перевищує 20 % за масою. Так, границя міцності при розтягуванні епоксибітуму з 10 %, 20 % і 30 % епоксискладових становила 0,32, 0,41 і 1,24 МПа, відповідно.



***Рисунок 4*** – Вплив вмісту епоксидної смоли на міцність та подовження

Відносне подовження при розриві, є одним з ключових показників прогнозування пластичності матеріалів на основі епоксискладових [12]. Відносне подовження при розриві  епоксибітуму з 10 % епоксискладових становило 440 %, а при 50 % епоксискладових – тільки 130 %, тобто відносне подовження при розриві зменшується із вмістом епоксискладових в епоксибітумі.

В 70-80 роках в Ленінградській філії «СоюздорНИИ» проводились дослідження полімербетону, в якому у ролі в’яжучого використовувались епоксидні смоли та суміші епоксидних смол з рідким бітумом марки МГ 70/130 у співвідношенні 100 до 50. Вміст епоксив’яжучих складав 5-7 % від маси мінерального матеріалу.

Дослідження показали, що міцність на стиск полімерасфальтобетону на епоксидній смолі  протягом усього періоду витримки зростає (особливо інтенсивно протягом 1 місяця). Після 3 років зберігання міцність зразків полімербетону збільшилась в 1,5-1,8 разів у порівнянні з добовою міцністю [2].

Міцність полімербетону після 4320 циклів заморожування/відтавання підвищилась в 1,3-1,5 рази у порівнянні з добовою міцністю зразків, що були піддані 4 циклам заморожування. Полімербетон на епоксидній смолі відзначається дуже високою морозостійкістю. Він витримав 4320 циклів заморожування-відтавання у прісній воді без зниження міцності більше ніж на 15 %.

Зносостійкість матеріалу визначали на спеціальному приладі, в якому на зразок діяв абразив протягом 700 обертів під навантаженням на зразок 2 кг. Після цього визначали втрати  за  масою та середню висоту стирання. Знос зразків полімерасфальтобетону після витримки в  морозильній камері до 1500 циклів не збільшився, а після 2 000-4 320 циклів збільшився на 5-8 % в порівнянні зі зносом зразків при зберіганні на повітрі в еквівалентному віці.

Як свідчать результати випробувань полімербетону на епоксидній смолі на хімічну стійкість за витримкою в різних середовищах, полімербетони на епоксидних смолах мають високу хімічну стійкість до бензину, керосину, дизельного палива та автолу. Коефіцієнт втрати міцності полімербетону в усіх випадках був не менше 0,8 при витримуванні 40 діб в агресивному середовищі [2].

Таким чином, дослідження, що були проведені в «СоюздорНИИ», засвідчили здатність полімербетону на епоксидній смолі протягом тривалого періоду зберігати високу механічну міцність та хімічну стійкість. Це дало можливість припустити довготривалу роботу цього матеріалу в дорожньому покритті без руйнування.

В Україні у ДП «ДерждорНДІ» також виконувались пошукові дослідження епоксиасфальтобетонів. При проведенні досліджень використовувались:

* бітум марки БНД 60/90 виробництва, що відповідали вимогам ДСТУ 4044;
* щебінь фракції (5-10) мм, що задовольняли вимоги ДСТУ Б В.2.7-75;
* пісок штучного подрібнення (відсів), що відповідав вимогам ДСТУ Б В.2.7-76;
* мінеральний порошок виробництва, що відповідав вимогам ДСТУ Б В.2.7-121;
* епоксидна смола в комплексі із звтверджувачем.

Підібрані склади вихідних асфальтобетонів та епоксиасфальтів відповідали вимогам ДСТУ Б В.2.7-119.

Процес виробництва епоксиасфальтобетону складався з таких технологічних операцій:

* дозування та перемішування щебеню, піску та мінерального порошку відповідно до підібраного складу;
* нагрівання мінерального матеріалу до потрібної температури;
* введення затверджувача в нагрітий до відповідної температури бітум з наступним перемішуванням протягом 5-10 хв;
* введення бітуму разом із затверджувачем в мінеральну суміш з наступним перемішуванням;
* введення в суміш епоксидної смоли або епоксиполіуретану з наступним перемішуванням.

Виробництво та випробування зразків асфальтобетону та епоксиасфальтобетону виконувались за традиційною технологією згідно з ДСТУ Б В.2.7-89.

З метою дослідження змін властивостей епоксиасфальтобетону в залежності від ступеня формування структури матеріалу під дією термоокислювальних процесів в епоксискладових зразки епоксиасфальтобетону витримували протягом 1, 14 та 28 діб за температури 20 °С [6].

Міцність на стиск зразків епоксиасфальтобетону, які були щойно заформовані при 20 °С та 50 °С дещо нижче, ніж у вихідного асфальтобетону (відповідно на 0,5 МПа та 0,2 МПа). Із збільшенням терміну витримки міцність зразків епоксиасфальтобетону зростає. Особливо інтенсивне збільшення міцності спостерігається з 7 до 14 діб витримки. Через 28 діб міцність епоксиасфальтобетону за температури 20 °С складає 5,4 МПа проти 3 МПа у вихідного асфальтобетону, а за температури 50 °С відповідно 2,9 МПа проти 1,4 МПа. Таким чином, міцність за температури 20 °С збільшилась на 64 %, а за температури 50 °С – в 2 рази [6].

Важливою властивістю асфальтобетонів є їх здатність зберігати міцність при підвищенні температури, яку можна характеризувати коефіцієнтом температурної чутливості. Коефіцієнт температурної чутливості вихідних асфальтобетонів становить 0,42-0,43. При введенні епоксискладових він зростає до 0,53-0,54 або на 23-28 % [6].

Для епоксиасфальтобетонів та вихідних асфальтобетонів визначався коефіцієнт внутрішнього тертя асфальтобетону tgφ і лабораторний показник зчеплення при зсуві Сл. Проведені випробування показали, що при введенні у асфальтобетонну суміш епоксискладових tgφ практично не змінюється, а Сл  зростає відповідно на 12 % та 35 % [6].

Зважаючи на те, що введення епоксискладової підвищує міцність та теплостійкість асфальтобетонів, були проведені дослідження її впливу на опір покриття колієутворенню в умовах високих літніх температур.

Як свідчать дані випробувань, після 14 діб витримки зразків епоксиасфальту інтенсивність  колієутворення на ньому практично така ж, як і на вихідному асфальтобетоні (після  30000 проходів глибина колій на обох покриттях становить 4,6 мм) [6].

Після витримки 28 і більше діб інтенсивність колієутворення на покриттях епоксиасфальтобетону значно зменшується. Якщо глибина колії у вихідного асфальтобетону після 1000 проходів становила 1,7 мм, а після 30000 проходів – 4,6 мм, то у епоксиасфальтобетону після 42 діб витримки відповідно 0,3 мм та 1,7 мм. Таким чином, з протіканням процесів формування структури епоксиасфальтобетону збільшується опір покриттів колієутворенню. Після 42 діб він зростає майже в 3 рази [6].

**Висновки**

Аналізом інформаційних джерел щодо застосування епоксиасфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах встановлено, що використання термореактивних полімерів у якості  модифікаторів бітуму дозволяє значно покращити його властивості, а отже і властивості  асфальтобетонів на його основі. Засвідчено перспективність використання епоксиасфальтобетону, який у порівнянні із звичайним асфальтобетоном відзначається вищими міцнісними характеристиками, більшим опором колієутворенню, уповільненим старінням під дією природно-кліматичних факторів та стійкістю до дії паливно-мастильних матеріалів.

Визначено, що введення у бітум епоксискладових від 5,0 % до 20,0 % призводить до суттєвого підвищення міцності та теплостійкості епоксиасфальтобетону за всіх температур. Разом з цим низькотемпературні характеристики отриманих епоксив’яжучих не є гіршими (а у ряді випадків – кращими), ніж у немодифікованих бітумів такої ж в’язкості. При цьому, чим більший вміст термореактивних модифікаторів, тим більш значною є якісна зміна властивостей бітумів. Середня густина епоксиасфальтобетону знижується при одночасному зростанні його водонасичення, коефіцієнт водостійкості не залежить від вмісту епоксискладових.

Впровадження епоксиасфальтобетонів дозволить підвищити якість та довговічність покриття на автодорожніх мостах, а також значно скоротити витрати на ремонтні роботи. Питання щодо використання зазначених матеріалів для мостових покриттів є дуже актуальним але водночас досить невизначеним, а отже поставлено задачі щодо подальшого проведення досліджень.

**Список літератури**

1. Онищенко А. М. Наукові основи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах: дисертація на здобуття наукового ступеня док. тех. наук. Київ, 2017. 37 с. URL: <http://diser.ntu.edu.ua/Onyschenko_dis.pdf> (дата звернення: 02.02.2019).
2. Доронина Н. Д. Исследование долговечности полимербетона на эпоксидной смоле. *Труды СоюздорНИИ.* Москва, 1977. Вып. 89. С. 26-32.
3. Онищенко А. М. Підвищення довговічності асфальтобетонних шарів за рахунок використання полімерних латексів: автореферат дис. … канд. тех. наук. Київ, 2008. 21 с.
4. Невінгловський В. Ф. Методи розрахунку залишкового ресурсу асфальтобетонного покриття на транспортних спорудах: автореферат дис. … канд. тех. наук. Київ, 2015. 20 с.
5. Peijun Xu, Peiliang Cong, Huan Ye, Shuanfa Chen. Modification of Epoxy Asphalt by Hyperbranched Polyester (Модифікація епоксидного асфальту гіперрозгалуженим поліестером).   *Materials Science and Technology II*. Xi’an. 2013. Vol. 716. P. 379-382. URL: <https://u.to/h9ktFg> (дата звернення: 11.02.2019).
6. Кіщинський С. В., Копинець І. В. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести дослідження та розробити енерго та ресурсозберігаючі технології влаштування довговічних дорожніх покриттів з використанням термореактивних модифікаторів асфальтобетону з епоксискладовою». Київ, 2018. 122 с.
7. Alabaster D., Herrington P. R., Waters J. Ultra long life low noise porous asphalt. (Влаштування асфальтобетонних покриттів з низьким рівнем шуму). *The Journal of the Acoustical Society of America*. Hong Kong. 2012. Vol. 131, Issue 4. 131(4): 3225. URL: <https://u.to/7-EtFg> (дата звернення: 15.02.2019).
8. Haiyan Yin, Yuge Zhang, Yifan Sun, Wei Xu, Dier Yu, Hongfeng Xie. Performance of hot mix epoxy asphalt binder and its concrete (Дослідження гарячої суміші епоксидного асфальтового в'яжучого і його міцність). Materials and Structures. Nanjing, 2015. Vol. 48. N 11. P. 3825-3835. URL: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1617-S11527-014-0442-0> (дата звернення: 11.02.2019).
9. Widyamoko R., Elliott C., Planning and testing of durable layers of road surface wear (Планування та випробування зносостійких шарів дорожнього покриття). Scott Wilson Nottingham Central Laboratories. Notingham, 2006. 12 p.
10. Xinxing Zhou, Shaopeng Wu, Gang Liu, Pan Pan. Molecular simulations and experimental evaluation on the curing of epoxy bitumen (Молекулярне моделювання та експериментальна оцінка затвердіння епоксидного бітуму). *Materials and Structures*. Nanjing. 2016. Vol. 49. Issue 1-2. P. 241-247. URL: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0491-4> (дата звернення: 11.02.2019).
11. Yang Kang, Mingyu Song, Liang Pu, Tingfu Liu. Rheological behaviors of epoxy asphalt binder in comparison of base asphalt binder and SBS modified asphalt binder (Реологічна поведінка епоксидного асфальтового в'яжучого у порівнянні із звичайним асфальтовим в'яжучим та модифікованим асфальтовим в'яжучим SBS). Construction and Building Materials. Shaanxi, 2015. Vol. 76 P. 343-350. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.020> (дата звернення: 15.02.2019).
12. Jianying Yu, Peiliang Cong, Shaopeng Wu. Laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin (Лабораторне визначення властивостей асфальтобетону модифікованого епоксидною смолою). *Journal of Applied Polymer Science*. Wuhan. 2009. Vol. 13. Issue 6. P. 3557-3563. URL: <https://doi.org/10.1002/app.30324> (дата звернення: 15.02.2019).
13. Mohammad Shafaghat Lonbar, Seyyed Masoud Nasrazadani, Ali Shafaghat. Investigation of aggregate and binder types effects on the micro surfacing rutting properties (Дослідження впливу агрегатних та в’яжучих типів на мікроповерхневі властивості). International Conference on Civil Engineering Architecture and urban infrastructure. Tabriz. 2015. P. 29-30. URL: <https://u.to/2EkhFg> (дата звернення: 20.02.2019).
14. ДСТУ 4044-2001 Бітуми нафтові дорожні в’язкі. Технічні умови. Київ, 2001. 15 с. (Інформація та документація).
15. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 59 с. (Інформація та документація).
16. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2016. 64 с. (Інформація та документація).
17. СОУ 45.2-00018112-057:2010 Асфальтобетонні суміші та асфальтобетон на основі модифікованих полімерами бітумів. Київ, 2010. 15 с. (Інформація та документація).

**REFERENCES**

1. Onishchenko A. N. Scientific foundations for increasing resistance of asphalt-concrete pavement to rut *formation* on road bridges: dissertation for a scientific degree Doctor of Engineering Sciences. Kyiv, 2017. 394 p. URL: <http://diser.ntu.edu.ua/Onyschenko_dis.pdf> (Last accessed: 02.02.2019). [in Ukrainian]. (2017).
2. Doronina N. D. Issledovaniye dolgovechnosti polimerbetona na epoksidnoy smole. *Trudy SoyuzdorNII*. Moscow, 1977. 89. P. 26-32. [in Russian].
3. Onyshchenko A. N. Increase of longevity of asphalt - concrete’s layers for an account the use of polymeric latexes: PhD (Eng.). Kyiv, 2008. 21 p. URL: <https://u.to/xEIhFg> (Last accessed: 05.02.2019). [in Ukrainian].
4. Nevinhlovsʹkyy V. F. Metody rozrakhunku zalyshkovoho resursu asfalʹtobetonnoho pokryttya na transportnykh sporudakh (Methods of calculation of residual resource of asphalt concrete cover on transport structures): dissertation for a scientific degree Candidate Engineering Sciences (Ph.D). Kyiv, 2015. 20 p. [in Ukrainian].
5. Peijun Xu, Peiliang Cong, Huan Ye, Shuanfa Chen. Modification of Epoxy Asphalt by Hyperbranched Polyester. *Materials Science and Technology II*. Xi’an. 2013. Vol. 716. P. 379-382. URL: <https://u.to/h9ktFg> (Last accessed: 11.02.2019). [in English].
6. Kishchinsky S. V., Kopinets I. V. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Provesty doslidzhennya ta rozrobyty enerho ta resursozberihayuchi tekhnolohiyi vlashtuvannya dovhovichnykh dorozhnikh pokryttiv z vykorystannyam termoreaktyvnykh modyfikatoriv asfalʹtobetonu z epoksyskladovoyu» (Research report «Conduct research and develop energy and resource-saving technologies for the construction of durable pavements using thermosetting epoxy concrete asphalt concrete modifiers»). Kyiv, 2018. [in Ukrainian].
7. Alabaster D., Herrington P. R., Waters J. Ultra long life low noise porous asphalt. *The  Journal of the Acoustical Society of America*. Hong Kong. 2012. Vol. 131, Issue 4. 131(4): 3225. URL: <https://u.to/7-EtFg> (Last accessed: 15.02.2019). [in English].
8. Haiyan Yin, Yuge Zhang, Yifan Sun, Wei Xu, Dier Yu, Hongfeng Xie. Performance of hot mix epoxy asphalt binder and its concrete. Materials and Structures. Nanjing. 2015. Vol. 48. N 11. P. 3825-3835. URL: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-doi-10_1617-S11527-014-0442-0> (Last accessed: 11.02.2019) [in English].
9. Widyamoko R., Elliott C., Planning and testing of durable layers of road surface wear. Scott Wilson Nottingham Central Laboratories. Notingham, 2006. 12 p. [in English].
10. Xinxing Zhou, Shaopeng Wu, Gang Liu, Pan Pan. Molecular simulations and experimental  evaluation on the curing of epoxy bitumen. Materials and Structures. Nanjing. 2016. Vol. 49. Issue 1-2. P. 241-247. URL: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0491-4> (Last accessed: 11.02.2019). [in English].
11. Yang Kang, Mingyu Song, Liang Pu, Tingfu Liu. Rheological behaviors of epoxy   asphalt  binder in comparison of base asphalt binder and SBS modified asphalt binder.   Construction  and  Building Materials. Shaanxi, 2015. Vol. 76 P. 343-350. URL:  <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.020> (Last accessed: 15.02.2019). [in English].
12. Jianying Yu, Peiliang Cong, Shaopeng Wu. Laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*. Wuhan. 2009. Vol. 13. Issue 6. P. 3557-3563. URL: <https://doi.org/10.1002/app.30324> (Last accessed: 11.02.2019). [in English].
13. Mohammad Shafaghat Lonbar, Seyyed Masoud Nasrazadani, Ali Shafaghat. Investigation  of aggregate and binder types effects on the micro surfacing rutting properties. International Conference on Civil Engineering Architecture and urban infrastructure. Tabriz. 2015. P.  29-30. URL:  <https://u.to/2EkhFg> (Last accessed: 20.02.2019). [in English].
14. State Standard of Ukraine (DSTU 4044-2001) Bitumy naftovi dorozhni vʺyazki. Tekhnichni umovy (Bitumens are oil road bindings. Specifications). Kyiv, 2001. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
15. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Sumishi asfalʹtobetonni i asfalʹtobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Tekhnichni umovy (Mixtures of asphalt and asphalt road and airfield. Specifications). Kyiv, 2012. 59 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
16. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-319:2016) Sumishi asfalʹtobetonni i asfalʹtobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvanʹ (Mixtures of asphalt and asphalt road and airfield. Test methods). Kyiv, 2016. 64 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
17. Standard of organization of Ukraine (SOU 45.2-00018112-057:2010) Asfalʹtobetonni sumishi ta asfalʹtobeton na osnovi modyfikovanykh polimeramy bitumiv (Asphalt mixes and asphalt concrete based on polymer modified bitumen). Kyiv, 2010. 15 p. (Information and documentation) [in  Ukrainian].

*1***Arthur Onishchenko**,*D.Sc., Professor,* [*https://orcid.org/0000-0002-1040-4530*](https://orcid.org/0000-0002-1040-4530)

*2***Ivan Kopinets**,[*https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*](https://orcid.org/0000-0002-0908-4795)

*2***Vladimir Zelenovsky**,[*https://orcid.org/0000-0001-5834-5456*](https://orcid.org/0000-0001-5834-5456)

*1National Transport University, Kyiv, Ukraine*

*2M. P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise (DerzhdorNDI SE), Kyiv, Ukraine*

**EXPERIENCE OF APPLICATION OF EPOXН ASPHALT CONCRETE**

**PAVEMENT ON ROAD BRIDGES**

***Abstract***

Introduction. The analysis of recent research on prevention of formation of defects of asphalt pavements on road bridges and extension of terms of their operating period is given. The perspective of application in Ukraine of asphalt pavements modified with thermosetting polymers is determined. The  research tasks are formulated.

Problem statement. Lack of sufficient experience in the use of epoxy asphalt pavement on the Ukrainian road bridges and uncertainty of economic feasibility of its application.

Objective. Perform an analysis of the existing experience of using asphalt pavement modified with thermosetting polymers to increase its durability on the road bridges.

Materials and methods. Analysis of information sources on the use of epoxy asphalt pavement on the road bridges. Analytical studies of asphalt mixtures modified with epoxy constituents.

Results. The perspective directions concerning improvement of quality of pavement on the road bridges, increase of their performance and durability are determined. An analytical review of the experience of using epoxy asphalt pavement on the road bridges has been conducted. The questions of modification of the bituminous base of asphalt mixtures with epoxy composites with the aim of improving their technical characteristics have been studied. The promising economic efficiency of the use of epoxy asphalt mixes in Ukraine has been established. The tasks concerning further investigation of epoxy asphalt pavement when applied on the road bridges have been formulated.

Conclusions. An analysis of information sources on the application of epoxy asphalt pavement  on the road bridges showed the following: the economic and technical feasibility of the use of these pavements, since they have significant advantages compared with the asphalt pavement of the standard composition (without modifiers); the introduction into the bitumen of epoxy constituents from 5.0 % to 20.0 % leads to a significant increase in the strength and heat resistance of epoxy asphalt concrete at all temperatures. The introduction of epoxy asphalt concrete allows improving the quality and durability of road pavement, as well as significantly reducing the cost of repairs.

***Key words:*** epoxy asphalt mix, asphalt, modification of bitumen, durability of pavement, research.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.7/.8

**Желтобрюх А. Д.**,[*https://orcid.org/0000-0003-0764-8793*](https://orcid.org/0000-0003-0764-8793)

**Малій П. Р.**,[*https://orcid.org/0000-0002-2039-5973*](https://orcid.org/0000-0002-2039-5973)

**Одегова Т. С.**,[*https://orcid.org/0000-0002-2008-8164*](https://orcid.org/0000-0002-2008-8164)

**Тимощук О. Ю.**, [*https://orcid.org/0000-0002-9230-1200*](https://orcid.org/0000-0002-9230-1200)

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна»(ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

**ВИКОРИСТАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ СПІНЕНОГО БІТУМУ**

***Анотація***

Вступ. Надано хронологічний аналіз використання технології приготування асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму за кордоном. Визначено переваги використання цієї технології.

Проблематика. Асфальтобетонні суміші, виготовлені з використанням спінених бітумів, широко використовуються, зокрема в таких країнах як Великобританія, США, Нідерланди, Австралія, де вже прийнято стандарти щодо застосування спіненого бітуму під час процесу виготовлення асфальтобетонних сумішей, оскільки їх застосування за рахунок особливої технології дозволяє знизити кількість енерговитрат, необхідних для виготовлення суміші, та підвищити якість та довговічність дорожнього покриття. Удорожчання енергоресурсів та необхідність підвищення техніко-експлуатаційних показників автомобільних доріг вимагає від дорожньої галузі України постійного розвитку та запровадження кардинальних змін щодо технології виконання будівельно-ремонтних робіт. Саме з цих причин впровадження технології приготування асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму є важливим галузевим завданням. На теперішній час в Україні відсутні нормативні документи, які б регламентували виконання робіт за даною технологією, що унеможливлює її практичне використання та обмежує оптимізацію та розвиток дорожньої галузі України.

Мета. Мета роботи полягала у дослідженні доцільності використання в Україні асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів.

Матеріали і методи. Проведено експериментальні випробування традиційних гарячих асфальтобетонних сумішей з та без додавання регенерованого асфальтобетонуз різним вмістом як вихідного, так і спіненого бітуму.

Результати. Встановлено доцільність використання асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму. Надано рекомендації щодо технологічних параметрів приготування, транспортування, укладання та ущільнення таких сумішей.

Висновки. Проведені дослідження показали, що за фізико-механічними показниками асфальтобетони як на вихідному, так і на спіненому бітумі відповідають вимогам чинних нормативних документів України. Відзначено переваги використання спіненого бітуму, а саме: зниження температури приготування та ущільнення суміші, економія оптимального вмісту бітуму та енергоресурсів. Отримані результати вказують на доцільність застосування технології приготування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів в Україні.

***Ключові слова***: асфальтобетон, асфальтобетонні суміші, бітум, в’яжуче, дорожнє будівництво, спінений бітум, температура, фізико-механічні показники.

**Вступ**

Технологія приготування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів, що мають підвищену поверхневу активність, меншу умовну в’язкість і більшу питому поверхню, дає змогу знизити енерговитрати, зменшити шкідливий вплив на довкілля за рахунок зниження викидів у повітря, розширити сезон улаштування сумішей, збільшити відстань транспортування, підвищити довговічність покриттів.

Вперше почали застосовувати спінені бітуми у 1957 році на інженерно-експериментальній станції університету штату Айова. Професором університету L. Csanyi було запропоновано використовувати спінений бітум в якості в’яжучого для ґрунтів. [1]. Для спінення було використано водяну пару. У 1960-х роках австралійською компанією Mobileoil було придбано права на технологію, запропоновану L. Csanyi з деякими удосконаленнями. Замість спінення за технологією із використанням пари гарячій бітум почали спінювати за допомогою холодної води у спеціальній розширювальній камері. Ця компанія не використовувала патент, і тільки із закінченням терміну його дії почалися інтенсивні дослідження у цьому напрямку у різних країнах світу.

Починаючи з 1990-х років лідером використання такої технологіє стала компанія WIRTGEN, якою було розроблено лабораторну установку WLB 10 для отримання спіненого бітуму у лабораторних умовах.

У зв’язку із дефіцитом матеріалів та бажаннях зменшити грошові витратина дорожнє будівництво така технологія знайшла свою реалізацію у ПАР [2]. У 2002 році було розроблено Тимчасовий технічний посібник TG2 із застандартизованою методологією добору складу суміші, її оптимізація, проектування шарів дорожнього одягу із сумішей на основі спінених бітумів [3].

На даний час ця технологія знайшла широке розповсюдження з відповідним удосконаленням на підставі попередньо отриманого досвіду у таких країнах як Нідерланди, Нова Зеландія, Великобританія, США, Австралія та інші [4-12].

Американською компанією AstecInc. розроблено систему підготовки теплих асфальтобетонних сумішей GreenPac. У США приблизно 90 % теплих сумішей отримують саме цим способом. На даний час кількість заводів, що працюють за цією технологією, більше 800 у всьому світі. Особливою популярністю така технологія користується у Казахстані. У 2014 році на підставі лабораторних випробувань тадослідного застосування технічний інститут АО «КАЗДОРНИИ» розробив відомчій нормативно-технічний документ щодо приготування та застосуванню асфальтобетонних сумішей з енергозберігаючими добавками («теплі суміші») [13].

Оскільки технологія приготування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів має значні переваги, які підтверджено світовим досвідом, необхідно було дослідження можливості застосування даної технології в Україні. Для цього необхідно було визначити можливість застосування цієї технології в рамках існуючих будівельних норм України.

**Основна частина**

Дослідження можливості застосування технології приготування асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму було виконано в ДП «ДерждорНДІ» [14]. Ці дослідження передбачали проведення ряду експериментів щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів.

На першому етапі експериментальних досліджень виготовляли контрольні зразки з традиційної гарячої асфальтобетонної сумішіз додаванням регенерованої асфальтобетонної суміші (РАП) у кількості 25 % та без неї на звичайному (вихідному) бітумі та з традиційної гарячої асфальтобетонної суміші з додавання РАП та без неї на спіненому бітумі. Кількість бітуму варіювалась в інтервалі від 4,0 % до 5,5 %.

Для приготування асфальтобетонів на основі вихідних та спінених бітумів використовували: щебінь фракції (20 – 40) мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-75 [15]; щебінь фракції (10 – 20) мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-75[15]; щебінь фракції (5 – 10) мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-75 [15]; пісок із відсівів подрібнення вивержених гірських порід фракції (0 – 5) мм згідно з ДСТУ Б.В.2.7-210 [16]; мінеральний порошок згідно з ДСТУ Б В.2.7-121 [17]; РАП; бітум марки БНД 60/90 згідно з ДСТУ 4044 [18].

Під час виконання дослідження були проведені випробування таких асфальтобетонів:

* гарячий дрібнозернистий пористий асфальтобетон непереривчастої гранулометрії, марки І, типу А-Б (АСГ.Др.П.А-Б.НП.І)на вихідному бітумі БНД 60/90, з вмістом бітуму 4,5 %, 5,0 %, 5,5 %;
* гарячий крупнозернистий щільний асфальтобетон непереривчастої гранулометрії, марки І, типу А1 (АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І) на вихідному бітумі БНД 60/90, з вмістом бітуму 5,0 %, 5,5 %, 6,0 %;
* гарячий крупнозернистий щільний асфальтобетон непереривчастої гранулометрії, марки І, типу А1 (+РАП 25%) (АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І + РАП) на вихідному бітумі БНД 60/90, з вмістом бітуму 4,5 %, 5,0%, 5,5 %;
* гарячий дрібнозернистий пористий асфальтобетон непереривчастої гранулометрії, марки І, типу А-Б (АСГ.Др.П.А-Б.НП.І) на спіненому бітумі БНД 60/90, з вмістом бітуму 4,0 %, 4,5 %, 5,0 %;
* гарячий крупнозернистий щільний асфальтобетон непереривчастої гранулометрії, марки І, типу А1 (АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І) на спіненому бітумі БНД 60/90, з вмістом бітуму 4,5 %, 5,0 %, 5,5 %;
* гарячий крупнозернистий щільний асфальтобетон непереривчастої гранулометрії, марки І, типу А1 (+РАП 25%) (АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І + РАП) на спіненому бітумі БНД 60/90, з вмістом бітуму 4,0 %, 4,5%, 5,0 %.

Під час застосування спінених бітумів технологічний процес приготування асфальтобетонних сумішей суттєво не змінювався та здійснювався з дотриманням стандартної послідовності та змісту технологічних операції згідно з ДСТУ Б В.2.7-319 [19] та ДСТУ Б В.2.7-119 [20]. При використанні спінених бітумів готування мінеральних матеріалів (піску, щебню і мінерального порошку), їх просушування, фракціонування, дозування і подача у змішувач виконувались у такій же послідовності, що і при звичайній технології приготування асфальтобетонних сумішей. Різниця утехнології полягала лише у зміні процесів підготовки і подачі бітуму, які забезпечують його введення у змішувач у спіненому стані. Процес спінення бітуму складався з таких технологічних операцій:

* нагрівання вихідного бітуму до температури 160°C;
* поступове вприскування під тиском повітря невеликої порції холодної води (від 2 % до 4 % від маси бітуму) у гарячий бітум у спеціальній камері;
* перемішування суміші у камері впродовж (10 – 20) с до появи піни.

Завдяки ефекту спінювання, під час якого бітум переходив у відносно стійку тонкодисперсну гетерогенну систему, яка складалась з в’яжучого, повітря, води, пари, суміш характеризувався пластичністю, полегшувався процес її перемішування, відбувався більш рівномірний розподіл бітуму по поверхні мінеральних матеріалів, що супроводжувався покриттям усіх мінеральних часток тонкою бітумною плівкою. Тим самим зменшувались технологічні температури приготування суміші. Для забезпечення необхідної однорідності асфальтобетонної суміші на спіненому бітумі та потрібного вкриття бітумом кам’яних матеріалів було добрано оптимальні властивості спіненого бітуму, які характеризувались ступенем спінювання та періодом піврозпаду. Ступінь спінювання (показник зростання об’єму) оцінювалась збільшенням  об’єму бітуму (ΔV) у спіненому стані відносно початкового об’єму, період піврозпаду (Т1/2) – здатність спіненого в’яжучого зберігати свій об’єм у часі. У таблиці 1 наведено дані щодо залежності показника зростання об’єму піни та періоду піврозпаду від кількості води.

***Таблиця 1***

***Залежність показника зростання об’єму піни та періоду піврозпаду***

***від кількості води***

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Кількість води для спінювання, % від кількості в’яжучого | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Показник зростання об’єму (ΔV) | 6 | 16 | 23 | 31 | 33 |
| Період піврозпаду піни (Т1/2), с | 30 | 20 | 11 | 7 | 7 |

При додаванні води у кількості (2 – 3) % від кількості в’язного спостерігалися найбільш оптимальні значення показників зростання об’єму та періоду піврозпаду піни. Під час приготування традиційної суміші температура вихідного бітуму під час перемішування становила (140 – 155) °C, мінерального матеріалу – (170 – 180) °C. Температура під час ущільнення знаходилась в межах (135 – 145) °C.Під час приготування суміші на основі спіненого бітуму його температура становила (130 – 145) °C, температура нагрівання мінерального матеріалу – (140 –160) °C. Температура під час ущільнення зразків становила від 125 °C до 135 °C. Таким чином, використання спіненого бітуму дозволило знизити температуру нагрівання в’яжучого і мінерального матеріалу на (10 – 15) °C, зекономити паливо для виготовлення суміші і знизити емісію СО2 в оточувальне середовище.

Випробування асфальтобетонів на вихідному та спіненому бітумах проводились за показниками та методами випробувань, наведеними в таблиці 2.

***Таблиця 2***

***Фізико-механічні показники та методи випробувань асфальтобетонів***

|  |  |
| --- | --- |
| Назва показника | Методи випробувань |
| Середня густина, ρ, г/см3 | п.8 ДСТУ Б В.2.7-319 [18] |
| Водонасичення, W, % за об’ємом | п.14 ДСТУ Б В.2.7-319 [18] |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури:  – 20 °C;  – 50 °C | п. 16 ДСТУ Б В.2.7-319 [18] |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | п. 23 ДСТУ Б В.2.7-319 [18] |

Отримані фізико-механічні показники асфальтобетону АСГ.Др.П.А-Б.НП.І залежно від вмісту бітуму наведено у таблицях 3, 4 та на рисунку 1.

***Таблиця 3***

***Фізико-механічні показники АСГ.Др.П.А-Б.НП.І на основі вихідного бітуму***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники | Значення показників залежно від кількості вихідного бітуму, % | | |
| Кількість бітуму, % | 4,5 | 5,0 | 5,5 |
| Середня густина, ρ, г/см3 | 2,32 | 2,34 | 2,34 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 20 °С | 3,2 | 3,3 | 2,6 |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | 0,86 | 0,89 | 0,89 |

***Таблиця 4***

***Фізико-механічні показники АСГ.Др.П.А-Б.НП.І на основі спіненого бітуму***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники | Значення показників залежно від кількості спіненого бітуму, % | | |
| Кількість бітуму, % | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Середня густина, ρ, г/см3 | 2,30 | 2,34 | 2,32 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 20 °С | 3,1 | 3,4 | 3,3 |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | 0,89 | 0,9 | 0,9 |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

***Рисунок 1*** – Порівняння фізико-механічних показників АСГ.Др.П.А-Б.НП.І на основі вихідного та спіненого бітумів

Згідно ДСТУ Б В.2.7-119 [20] для пористого асфальтобетону типу А-Б границя міцності при стиску за температури 50 °С та водонасичення не визначалась.

За результатами випробувань границя міцності при стиску за температури 20 °С асфальтобетону типу А-Б при вмісті вихідного бітуму від 4,5 % до 5,5 % змінювалась від 2,6 МПа до 3,3 МПа і була найвищою при вмісті бітуму 5,0 %. Максимального значення середньої густини асфальтобетону типу А-Б на вихідному бітумі досягали при вмісті бітуму 5,0 % і становило 2,34 г/см3. Найбільше значення коефіцієнту довготривалої водостійкості асфальтобетону типу А-Б на вихідному бітумі – при вмісті бітуму 5,0 %. Границя міцності при стиску за температури 20 °С асфальтобетону типу А-Б на спіненому бітумі при вмісті бітуму від 4,0 % до 5,0 % змінювалась від 3,1 МПа до 3,4 МПа. При цьому найбільше її значення відповідало 4,5 % вмісту бітуму. Середня густина асфальтобетону типу А-Б на спіненому бітумі була найвищою при вмісті бітуму 4,5 % і становила 2,34 г/см3. Коефіцієнт довготривалої водостійкості асфальтобетону типу А-Б на спіненому бітумі має найкращий результат при вмісті бітуму (4,5 – 5,0) %, а саме 0,9. Результати випробувань засвідчили, що спінення дозволяє зменшити потрібний вміст бітуму в суміші. Так найкращі результати випробувань в асфальтобетоні на вихідному бітумі мали місце при 5,0 % в’яжучого, а на спіненому бітумі – при 4,5 %. При цьому спостерігалось і певне поліпшення властивостей асфальтобетону при використанні спіненого бітуму як за міцністю, так і за коефіцієнтом довготривалої водостійкості.

Отримані фізико-механічні показникиасфальтобетону АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І залежно від вмісту бітуму наведено у таблицях 5,  6 та на рисунку 2.

***Таблиця 5***

***Фізико-механічні показники АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І на основі вихідного бітуму***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники | Значення показників залежно від кількості вихідного бітуму, % | | |
| Кількість бітуму, % | 5,0 | 5,5 | 6,0 |
| Середня густина, ρ, г/см3 | 2,33 | 2,34 | 2,33 |
| Водонасичення, W, % за об’ємом | 2,5 | 2,3 | 2,2 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 20 °С | 2,5 | 2,4 | 2,2 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 50 °С | 1,00 | 1,13 | 1,00 |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | 0,89 | 0,93 | 0,94 |

***Таблиця 6***

***Фізико-механічні показники АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І на основі спіненого бітуму***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Показники | Значення показників залежно від кількості спіненого бітуму, % | | | |
| Кількість бітуму, % | 4,5 | | 5,0 | 5,5 |
| Середня густина, ρ, г/см3 | 2,34 | | 2,34 | 2,35 |
| Водонасичення, W, % за об’ємом | 2,4 | | 1,9 | 2,1 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 20 °С | 2,6 | | 2,7 | 2,4 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 50 °С | 1,05 | | 1,19 | 1,15 |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | 0,92 | | 0,96 | 0,96 |
|  | | |  | | | |
|  | | |  | | | |

***Рисунок 2*** – Порівняння фізико-механічних показників АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І на основі вихідного та спіненого бітумів

За результатами випробувань встановлено, що границя міцності при стиску за температури 20 ° С крупнозернистого асфальтобетону типу А1 на вихідному бітумі при вмісті бітуму від 5,0 % до 6,0 % змінювалась з 2,2 МПа до 2,5 МПа. Максимальне значення міцності відповідало 5,0 % бітуму.Границя міцності при стиску за температури 50 °С крупнозернистого асфальтобетону типу А1 при вмісті вихідного бітуму від 5,0 % до 6,0 % становила від 1,0 МПа до 1,13 МПа. Максимальне значення міцності 1,13 МПа асфальтобетону було при 5,5 % бітуму. Середня густина асфальтобетону типу А1 на вихідному бітумі становила від 2,33 г/см3 до 2,34 г/см3. Її  більше значення досягалось при 5,5 % бітуму. Найменше водонасичення асфальтобетону на вихідному бітумі дорівнювало 2,2 % при вмісті бітуму 6,0 %. Найбільше значення коефіцієнта довготривалої водостійкості на вихідному бітумі крупнозернистий асфальтобетон типу А1 мав при вмісті 5,5 %. При використанні спіненого бітуму границя міцності при стиску за температури 20 °С крупнозернистого асфальтобетону типу А1 змінювалась з 2,4 МПа до 2,7 МПа при вмісті в’яжучого від 4,5 % до 5,0 %. Найбільше значення міцності за температури 20 °С (2, МПа) відповідало 5,0 % в’яжучого. Границя міцності при стиску за температури 50 °С асфальтобетону типу А1 в залежно від вмісту спіненого бітуму становила (1,05 – 1,19) МПа. Найвище значення міцності за температури 50 °С було при 5,0 % спіненого бітуму. Середня густина крупнозернистого асфальтобетону типу А1 була практично незмінною при вмісті спіненого бітуму (4,5 – 5,0) % і становила 2,34 г/см3, при вмісті 5,5 % – 2,35 г/см3. При зміні вмісту спіненого бітуму від 4,5 % до 5,5 % найнижче значення водонасичення крупнозернистого асфальтобетону дорівнює 1,9 %, найвище (при 4,5 % бітуму) – 2,4 %. Коефіцієнт довготривалої водостійкості крупнозернистого асфальтобетону типу А1 був найбільшим при вмісті спіненого бітуму 5,0 % і становив 0,99. Таким чином крупнозернистий асфальтобетон типу А1 на вихідному бітумі показував найкращі результати при вмісті бітуму 5,5 %. На спіненому бітумі асфальтобетон типу  А1 мав кращі результати при вмісті бітуму 5,0 %.

Отримані фізико-механічні показники асфальтобетонуАСГ.Кр.Щ.А1.НП.І + РАП залежно від вмісту бітуму наведено у таблицях 7, 8 та на рисунку 3.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

***Рисунок 3*** – Порівняння фізико-механічних показників АСГ Кр.Щ.А1.НП.І + РАП на основі вихідного та спіненого бітумів

***Таблиця 7***

***Фізико-механічні показники АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І + РАПна основі вихідного бітуму***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники | Значення показників залежно від кількості вихідного бітуму, % | | |
| Кількість бітуму, % | 4,5 | 5,0 | 5,5 |
| Середня густина, ρ, г/см3 | 2,42 | 2,41 | 2,43 |
| Водонасичення, W, % за об’ємом | 2,3 | 2,28 | 2,64 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 20 °С | 4,4 | 4,4 | 3,3 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 50 °С | 1,3 | 1,4 | 1,2 |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | 0,88 | 0,92 | 0,93 |

***Таблиця 8***

***Фізико-механічні показники АСГ.Кр.Щ.А1.НП.І + РАП на основі спіненого бітуму***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники | Значення показників залежно від кількості спіненого бітуму, % | | |
| Кількість бітуму, % | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| Середня густина, ρ, г/см3 | 2,42 | 2,45 | 2,42 |
| Водонасичення, W, % за об’ємом | 1,54 | 1,18 | 2,25 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 20 °С | 3,7 | 4,5 | 4,0 |
| Границя міцності при стиску, R, МПа, за температури 50 °С | 1,3 | 1,6 | 1,4 |
| Коефіцієнт довготривалої водостійкості, Квд | 0,87 | 0,94 | 0,95 |

Найкращі результати випробувань в асфальтобетоні на вихідному бітумі мали місце при 5,0 % в’яжучого, а на спіненому бітумі – 4,5 %.

Аналіз отриманих результатів засвідчив не тількивідповідність отриманих фізико-механічних показників вимогам стандарту [19], але і їх поліпшення навіть за меншої кількості бітуму.

Показник зчеплення оцінювався згідно з ДСТУ Б В.2.7-319 [19]. За результатами випробування зчеплення бітумів з поверхнею різних мінеральних матеріалів (таблиця 9) встановлено, що при використанні спінених бітумів їх зчеплення з поверхнею мінеральних матеріалів на (10-12) % краще, ніж при використанні традиційного в’язкого бітуму марки БНД 60/90.

***Таблиця 9***

***Показники зчеплення бітумів з поверхнею мінеральних матеріалів***

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Матеріал | Показник зчеплення, % | |
| Спінений бітум | БНД 60/90 |
| Вапняк | 78 | 69 |
| Граніт | 27 | 24 |
| Пісок | 36 | 31 |

Достовірність отриманих результатів підтверджено тим, що експерименти проводились згідно з методиками, встановленими нормативними документами України.

На підставі отриманих результатів розроблено рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів [21].

**Висновки**

Проведені дослідження використання технології приготування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумівдають змогу зробити такі висновки:

1. Фізико-механічні характеристики цих сумішей, встановлені під час випробувань згідно з затвердженими методиками, відповідають вимогам чинних нормативних документів.
2. Результати вказують на доцільність застосування даної технології в Україні, оскільки відзначаються такі переваги як зниження температури приготування та ущільнення суміші, економія оптимального вмісту бітуму та енергоресурсів.
3. Удосконалено технічну базу для будівництва автомобільних доріг загального користування. Розроблені рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів містять вимоги до вихідних матеріалів та кінцевої продукції, технологію приготування, методи контролювання, порядок укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів.

**Список літератури**

1. Csanyi L. H. Foamed asphalt in bituminous paving mixes. Highway research record. Washington, 1957. P. 108-122.
2. Muthen K. M. Foamed asphalt mixes: mix design procedure. CR-98/077. CSIR   Transportek. Pretoria (South Africa), 1999. URL: <https://www.viastrade.it/letteratura/bitume/MUTHEN%20MIX%20DESIGN.pdf> (дата звернення: 30.05.2019).
3. Jenkins K., Collings D., Jooste F. The design and use of foamed bitumen treated materials. Shortcomings and imminent revisions. TG2: Recycling and stabilisation conference. Auckland (New Zealand), 2008. URL: <https://trid.trb.org/view/882919> (дата звернення: 30.05.2019).
4. Jooste F., Long F., Hefer A. A Method for consistent classification of materials for pavement rehabilitation design. Technical Memorandum. Cullinan (South Africa), 2007. URL: <https://www.asphaltacademy.co.za/wp-content/uploads/2016/09/Materials_Classification_Memo_FINAL.pdf> (дата звернення: 30.05.2019).
5. Wirtgen Cold Recycling Technology. Cold Recycling. 3nd edition. Germany, 2010. URL: <http://media.wirtgengroup.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/Kaltrecycling_Handbuch_EN.pdf> (дата звернення: 30.05.2019).
6. Fu P., Jones D., Harvey J. T., Halles F. A. Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2010. 22 (1). P. 29-38.
7. Maccarrone S., Holleran G., Leonard D. J., Hey S. Pavement recycling using foamed bitumen. In 17th australian road research board (ARRB) conference. *Australian Road Research Board*. Queensland, 1994. P. 349-365.
8. White G. Foamed bitumen stabilization for Australian airports. Airfield engineering  and  maintenance summit. Singapore, 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324908740\_foamed\_bitumen\_base\_for\_airport\_pavements](https://www.researchgate.net/publication/324908740_FOAMED_BITUMEN_BASE_FOR_AIRPORT_PAVEMENTS) (дата звернення: 30.05.2019).
9. Design and performance of foamed bitumen stabilised pavements progress: Report 3. AP-T303-15. Sydney (Australia), 2015. URL: <https://austroads.com.au/publications/pavement/ap-t303-15> (дата звернення: 30.05.2019).
10. Kendall M., Baker B., Evans P., Ramanujan J. Foamed bitumen stabilisation. The  Queensland experience. 20th ARRB conference.
11. Sarvesh Kumrawat, Vinay Deulkar. Foamed Bitumen. International research journal of engineering and technology. India, 2018. 5. P. 401-404.
12. D. Alabaster, J. Patrick, Haran Arampamoorthy, Dr. A Gonzalez. The design of stabilized  pavements in New Zealand. *NZ Transport Agency research report.* 498. Willington (New Zealand), 2013. URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/498/docs/498.pdf> (дата  звернення: 30.05.2019).
13. Рекомендации по приготовлению и применению асфальтобетонных смесей с энергосберегающими добавками («теплые смеси») (Р РК 218-120-2014). Алматы. 2014.
14. Асфальтобетон. URL: <http://dorndi.org.ua/ua/asfalytobeton> (дата звернення: 30.05.2019).
15. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ, 1999. 19 с. (Інформація та документація).
16. ДСТУ Б.В.2.7-210:2010 Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови. Київ, 2011. 17 с. (Інформація та документація).
17. ДСТУ Б В.2.7-121:2014 Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови. Київ, 2015. 42 с. (Інформація та документація).
18. ДСТУ 4044-2001 Бітуми нафтові дорожні в’язкі. Технічні умови. Київ, 2002. 21 c. (Інформація та документація).
19. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2017. 75 с. (Інформація та документація).
20. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 49 с. (Інформація та документація).
21. Рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів (Р В.2.7-37641918-894:2018). Київ, 2018, 30 с. (Інформація та документація).

**REFERENCES**

1. Csanyi L. H. Foamed asphalt in bituminous paving mixes. Highway research record. Washington, 1957. P. 108-122 [in English].
2. Muthen K. M. Foamed asphalt mixes: mix design procedure. CR-98/077. CSIR  Transportek. Pretoria, South Africa, 1999. URL: [https://www.viastrade.it/letteratura/bitume/muthen%20mix%20design.pdf](https://www.viastrade.it/letteratura/bitume/MUTHEN%20MIX%20DESIGN.pdf) (last accessed: 30.05.2019) [in English].
3. Jenkins K., Collings D., Jooste F. The designand use of foamed bitumen treated materials. shortcomings and imminent revisions. TG2: Recycling and stabilisation conference. Auckland (New Zealand), June 2008. URL: <https://trid.trb.org/view/882919> (last accessed: 30.05.2019) [in English].
4. Jooste F., Long F., Hefer A. A method for consistent classification of materials for pavement rehabilitation design. Technical Memorandum. Cullinan (South Africa), 2007. URL: <https://www.asphaltacademy.co.za/wp-content/uploads/2016/09/Materials_Classification_Memo_FINAL.pdf> (last accessed: 30.05.2019) [in English].
5. Wirtgen Cold Recycling Technology. Cold Recycling. 3nd edition. Germany, 2010. URL:  <http://media.wirtgengroup.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/Kaltrecycling_Handbuch_EN.pdf> (last accessed: 30.05.2019) [in English].
6. Fu P., Jones D., Harvey J. T., Halles F. A. Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2010. 22 (1). P. 29-38. [in English].
7. Maccarrone S., Holleran G., Leonard D. J., Hey S. Pavement recycling using foamed bitumen. in 17th australian road research board (ARRB) conference. *Australian Road Research Board*. Queensland, 1994. P. 349-365. [in English].
8. White G. Foamed bitumen stabilization for Australian airports. Airfield  engineering  and  maintenance summit. Singapore, 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324908740\_foamed\_bitumen\_base\_for\_airport\_pavements](https://www.researchgate.net/publication/324908740_FOAMED_BITUMEN_BASE_FOR_AIRPORT_PAVEMENTS) (last accessed: 30.05.2019) [in English].
9. Design and performance of foamed bitumen stabilised pavements progress: Report 3. AP-T303-15. Sydney (Australia), 2015. URL: URL: <https://austroads.com.au/publications/pavement/ap-t303-15> (last accessed: 30.05.2019) [in English].
10. Kendall M., Baker B., Evans P., Ramanujan J. Foamed bitumen stabilisation. The Queensland experience. 20th ARRB conference. [in English].
11. Sarvesh Kumrawat, Vinay Deulkar. Foamed Bitumen. International research journal of engineering and technology. India, 2018. 05. P. 401-404 [in English].
12. D. Alabaster, J. Patrick, Haran Arampamoorthy, Dr. A Gonzalez. The design of stabilised pavements in New Zealand. *NZ Transport Agency research report.* 498. Willington (New Zealand), 2013. URL: <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/498/docs/498.pdf> (last accessed: 30.05.2019) [in English].
13. Rekomendatsii po prigotovleniyu i primeneniyu asfaltobetonnyih smesey s energosberegayuschimi dobavkami («teplyie smesi») (R RK 218-120-2014) (Information and documentation) [in Russian].
14. Asphalt concrete. URL: <http://dorndi.org.ua/en/asfalytobeton> (Last accessed: 30.05.2019).
15. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-75-98) Solid natural crushed stone and gravel for building materials, products, structures and construction works. Specifications. Kyiv, 1999. 19 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
16. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-210:2010) Sand from sereening after crushing of rocks for construction works. Specifications. Kyiv, 2011. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
17. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-121:2014) Mineral filler for asphalt concrete mixtures. Specifications. Kyiv, 2015. 42 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
18. State Standard of Ukraine (DSTU 4044:2001) Viscous oil road bitumen. Specifications. Kyiv, 2002. 21 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
19. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-319:2016) Asphaltic concrete mixtures, road and aerodromes asphaltic concrete. Test methods. Kyiv, 2017. 75 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
20. State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Asphaltic concrete mixtures, road and aerodromes asphaltic concrete. Specifications. Kyiv, 2012. 49 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
21. Rekomendatsii shchodo pryhotuvannia ta zastosuvannia asfaltobetonnykh sumishei na osnovi spinenykh bitumiv (R V.2.7-37641918-894:2018). Kyiv, 2018. 30 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Anton Zheltobriukh**,[*https://orcid.org/0000-0003-0764-8793*](https://orcid.org/0000-0003-0764-8793)

**Pavlo Malii**,[*https://orcid.org/0000-0002-2039-5973*](https://orcid.org/0000-0002-2039-5973)

**Tetiana Odehova**,[*https://orcid.org/0000-0002-2008-8164*](https://orcid.org/0000-0002-2008-8164)

**OleksandrTymoshchuk**,[*https://orcid.org/0000-0002-9230-1200*](https://orcid.org/0000-0002-9230-1200)

*M. P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – «DerzhdorNDI» SE, Kyiv, Ukraine*

**USING ASPHALT MIXTURES BASED ON FOAMED BITUMEN**

***Abstract***

Introduction. A chronological analysis of using the technology for the preparation of asphalt mixtures based on foamed bitumen abroad was given. The advantages of using this technology were determined.

Problem statement. Asphalt mixtures made using foamed bitumen are widely used in particular in countries such as the United Kingdom, the USA, the Netherlands, Australia, where standards for the use of foamed bitumen during the process of asphalt mixtures production are already adopted, because their using, due to special technology, allows to reduce an amount of energy required for the production of the mixture and to improve the quality and durability of the road pavement. The rising cost of energy resources and the necessity to increase the technical and operational indicators of roads require the road industry in Ukraine to constantly develop and introduce radical changes in the technology of construction and repair work. Due to the introduction of the technology of preparation of asphalt mixtures based on foamed bitumen is an important task for us. Unfortunately, today in Ukraine there are no normative documents that would regulate the implementation of works based on this technology which makes it impossible to use it and limits optimization and development of the road industry in Ukraine.

Purpose. The purpose of the study is reserch of expendiency of using the asphalt mixtures based on foamed bitumen in Ukraine.

Materials and methods. Experimental tests of traditional hot-mixes of asphalt concrete mixes with and without addition of reclaimed asphalt concrete with different contents of both source and foamed bitumen have been carried out.

Results. The expediency of using asphalt mixtures based on foamed bitumen has been established. The result is the developed recommendations on the processing parameters of preparation, transportation, laying and compaction of these mixtures.

Conclusions**.** The studies showed that physical and mechanical parameters of both asphalt based on original bitumen and foamed bitumen correspond the requirements of the current normative documents.The advantages of their using are noted: reduction of the temperature of preparation and compaction of the mixture, saving of optimum content of bitumen and energy resources. The obtained results indicate the expediency of application of technology of bitumen foaming during the preparation of asphalt concrete mixtures in Ukraine.

***Key words*:** asphalt concrete, asphalt mixtures, bitumen, binder, road building, foamed bitumen, temperature, physical and mechanical characteristics.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 691.16

## Копинець І. В., [*https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*](https://orcid.org/0000-0002-0908-4795)

## Соколова О. Б., [*https://orcid.org/0000-0003-4202-8661*](https://orcid.org/0000-0003-4202-8661)

## Соколов О. В., [*https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*](https://orcid.org/0000-0002-4694-9647)

## Юнак А. Л., [*https://orcid.org/0000-0002-5294-5554*](https://orcid.org/0000-0002-5294-5554)

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені  М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

## ВПЛИВ ДОБАВОК НА ОСНОВІ СИНТЕТИЧНИХ ВОСКІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМІВ

***Анотація***

Вступ. Встановлено, що за рахунок використання добавок на основі синтетичних восків можна знизити технологічні температури виробництва асфальтобетонних сумішей, а також зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище та витрати палива на їх виробництво.

Проблематика. Роботу присвячено проблемі підвищення теплостійкості бітуму та зниженню технологічних температур виробництва асфальтобетонних сумішей.

Мета. Установлення залежності впливу вмісту добавки на основі синтетичних восків на теплостійкість бітуму та його технологічні властивості.

Матеріали та методи. Як об’єкти дослідження було прийнято бітум нафтовий дорожній в’язкий марки БНД 60/90 (вихідний), бітум, модифікований 1,0 %, 2,0 % та 3,0 % добавки на основі синтетичних восків, та еквіпенетраційний бітум марки БНД 40/60 з пенетрацією близькою до пенетрації бітуму, модифікованого 3,0 % добавки на основі синтетичних восків. Для встановлення теплостійкості бітумів визначали їх температуру розм’якшеності за кільцем і кулею, еквіпенетраційну температуру розм’якшеності та динамічну в’язкість за температури розм’якшеності за кільцем і кулею. Для встановлення технологічних властивостей бітумів на основі залежності в’язкості бітумів від температури визначали температури змішування бітуму з мінеральним матеріалом під час виробництва асфальтобетонних сумішей та температури початку їх ущільнення.

Результати. Досліджено вплив вмісту добавки на основі синтетичних восків на експлуатаційні та технологічні властивості бітумів. Встановлено, що добавка на основі синтетичних восків підвищує теплостійкість бітуму за температурою розм’якшеності за кільцем і кулею та динамічною в’язкістю за температури розм’якшеності за кільцем і кулею. При цьому еквіпенетраційна температура розм’якшеності не змінюється. Також відбувається зниження динамічної в’язкості бітуму за технологічних температур.

Висновки. Експериментальними дослідженнями доведено можливість підвищення теплостійкості бітумів за рахунок використання добавки на основі синтетичних восків та можливість зниження технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей на (25 – 30) °С (у порівнянні з технологічними температурами виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей на еквіпенетраційному бітумі).

***Ключові слова:*** асфальтобетонна суміш, бітум, добавка на основі синтетичного воску, теплостійкість, технологічні температури.

**Вступ**

Гарячі асфальтобетонні суміші виробляють з використанням бітумів нафтових дорожніх в'язких за високих технологічних температур. Діапазон температури нагрівання мінеральних матеріалів становить від 165 °С до 185 °С, бітуму – від 135 °С до 165 °С, а ущільнення асфальтобетонних сумішей виконують за температури від 135 °С до 155 °С[1].

Нагрівання мінеральних матеріалів супроводжується значними викидами шкідливих речовин в навколишнє середовище, що погіршує екологічне становище, а також витратою палива для їх нагрівання.

З метою зменшення впливу на навколишнє середовище розповсюдження набуло використання теплих технологій виробництва асфальтобетонних сумішей на основі в’язких бітумів [2]. Ці технології можна класифікувати за трьома типами [3]:

* технологія першого типу заснована на використанні води (спінюванні) та може бути поділена на два підтипи, а саме: технологія, в якій використовують воду в рідкому стані або пару, і технологія, в якій використовують речовини, що під час нагрівання розкладаються з виділенням води.
* технологія другого типу заснована на використанні спеціальних хімічних добавок, що знижують поверхневий натяг бітуму, поліпшуючи обволікання, зручність укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей.
* технологія третього типу заснована на використанні добавок на основі синтетичних восків, що знижують в’язкість бітуму за технологічних температур і, тим самим, дозволяють знизити температури виробництва асфальтобетонних сумішей. Згідно з [4, 5, 6, 7] використання різного вмісту добавок на основі синтетичних восків також дозволяє значно підвищити теплостійкість бітумів, при цьому може відбуватися підвищення їх жорсткості за низьких температур [6, 7].

Враховуючи те, що технологія виробництва бітумів в Україні суттєво відрізняється від технології їх виробництва в країнах Західної Європи та США, і відповідно є значна різниця і у властивостях бітумів, необхідно встановити залежність впливу вмісту добавки на основі синтетичних восків на теплостійкість бітуму вітчизняного виробництва та його технологічні властивості.

**Основна частина**

Для встановлення теплостійкості бітумів визначено їх температуру розм’якшеності за кільцем і кулею згідно з ДСТУ EN 1426 [8], еквіпенетраційну температуру розм’якшеності та динамічну в’язкість за температури розм’якшеності за кільцем і кулею згідно з ДСТУ EN 13302  [9].

Для встановлення технологічних властивостей бітумів на основі залежності в’язкості бітумів від температури визначено температури змішування бітуму з мінеральним матеріалом під час виробництва асфальтобетонних сумішей та температури початку їх ущільнення згідно з [10].

Для дослідження було прийнято бітум нафтовий дорожній в’язкий марки БНД 60/90 згідно з ДСТУ 4044 [11] (вихідний), бітум, модифікований 1,0 %, 2,0 % та 3,0 % добавки на основі синтетичного воску, та еквіпенетраційний бітум марки БНД 40/60 згідно з ДСТУ 4044 [11] з пенетрацією, близькою до пенетрації бітуму, модифікованого 3,0 % добавки на основі синтетичного воску.

Під час модифікації добавку на основі синтетичного воску вводили в бітум, розігрітий до температури (155 – 160) °С, при постійному механічному перемішуванні з наступним перемішуванням бітуму з добавкою впродовж 60 хв.

Результати досліджень наведено в таблиці 1 та таблиці 2.

Результати випробувань свідчать про те, що при введенні в бітум від 1,0 % до 3,0 % добавки на основі синтетичного воску має місце зростання його в’язкості. Пенетрація бітуму марки БНД 60/90 за температури 25 °С при введенні 1,0 % добавки на основі синтетичного воску знижується в 1,32 рази (з 74 × 0,1 мм до 56,0 × 0,1 мм). Збільшення вмісту добавки супроводжується подальшим зниженням пенетрації: при 2,0 % добавки на основі синтетичного воску - в 1,37 рази (з 74 × 0,1 мм до 54 × 0,1 мм), при 3,0 % добавки на основі синтетичного воску - в 1,45 рази (з 74 × 0,1 мм до 51 × 0,1 мм). Таким чином, під час модифікації бітуму марки БНД 60/90 добавкою на основі синтетичного воску відбувається його перехід в бітум більш в’язкої марки із значенням пенетрації від 40 × 0,1 мм до 60 × 0,1 мм, тобто в’язкість бітуму змінюється на одну марку.

***Таблиця 1***

***Результати визначення впливу добавки на основі синтетичного воску на***

***теплостійкість бітуму***

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Назва показника,  одиниця вимірювання | Результати випробувань бітуму | | | | |
| марки БНД 60/90 | марки БНД 40/60 | модифікованого добавкою на основі синтетичного воску, % | | |
| 1,0 | 2,0 | 3,0 |
| Глибина проникності голки (пенетрація), за температури 25 °C, 0,1 мм | 74 | 49 | 56 | 54 | 51 |
| Температура розм’якшеності за кільцем і кулею, °С | 50,0 | 55 | 51,5 | 64,5 | 95,7 |
| Еквіпенетраційна температура розм’якшеності, °С | 47 | 54 | 47 | 47 | 48 |
| Динамічна в’язкість за температури розм’якшеності, Па · с | 2600 | 2830 | 3200 | 3410 | 4800 |

***Таблиця 2***

***Результати визначення впливу добавки на основі синтетичного воску на***

***технологічні властивості бітуму***

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Назва показника,  одиниця вимірювання | Результати випробувань бітуму | | | | |
| марки  БНД 60/90 | марки  БНД 40/60 | модифікованого добавкою на основі синтетичного воску, % | | |
| 1,0 | 2,0 | 3,0 |
| Динамічна в’язкість за температури135 °С, Па · с | 0,631 | 0,854 | 0,613 | 0,528 | 0,496 |
| Динамічна в’язкість за температури160 °С, Па · с | 0,204 | 0,422 | 0,198 | 0,176 | 0,168 |
| Температура змішування бітуму з мінеральним матеріалом, °С | 161,5-167 | 188-196 | 161-166 | 158-163,5 | 157-162,5 |
| Температура початку ущільнення асфальтобетонних сумішей, °С | 150,5-155,5 | 171-178 | 150-155 | 147-152 | 146-151 |

Одночасно із зростання в’язкості відбувається підвищення температури розм’якшеності бітуму за кільцем і кулею. При введенні 1,0 % добавки на основі синтетичного воску в бітум марки БНД 60/90 температура розм’якшеності зростає на 1,5 ºС. Збільшення вмісту добавки призводить до інтенсивнішого зростання температури розм’якшеності. Так, при вмісті 2,0 % добавки на основі синтетичного воску температура розм’якшеності бітуму зростає на 14,5 ºС (до 64,5 ºС), а при вмісті 3,0 % добавки на основі синтетичного воску– на 45,7 ºС (до 95,7 ºС). Дані результати свідчать про те, що вже при введенні 2,0 % добавки відбувається значне зростання теплостійкості бітуму.

Однак до зовсім протилежних висновків можна прийти, оцінюючи результати визначення еквіпенетраційної температури розм’якшеності (температури, за якої пенетрація бітуму становить 800 × 0,1 мм). Дані результати свідчать про те, що добавка на основі синтетичного воску не впливає на теплостійкість бітуму, оскільки значення еквіпенетраційної температури розм’якшеності модифікованих бітумів є аналогічними еквіпенетраційній температурі розм’якшеності вихідного бітуму марки БНД 60/90. В той же час теплостійкість модифікованого бітуму за даним показником є меншою за теплостійкість бітуму марки БНД 40/60 ((47 – 48) ºС проти 54 ºС).

Для бітумів марки БНД 60/90 та марки БНД 40/60 різниця між температурою розм’якшеності за кільцем і кулею та еквіпенетраційною температурою розм’якшеності є незначною (3,0 °С та 1,0 °С). В той же час для модифікованих бітумів ця різниця становить 4,5 °С, 17,5 °С та 48,7 °С.

Результати визначення динамічної в’язкості бітуму за температури розм’якшеності за кільцем і кулею вказують на те, що зі збільшенням вмісту добавки динамічна в’язкість зростає. За температури розм’якшеності за кільцем і кулею бітум, модифікований добавкою на основі синтетичного воску, має вищу динамічну в’язкість, ніж бітуми марки БНД 60/90 та БНД 40/60, при цьому в першому випадку температура проведення випробування є значно вищою.

Технологічні властивості бітумів характеризують за значенням їх динамічної в’язкості. Так, згідно з [10] за температуру змішування бітуму з мінеральним матеріалом приймають температуру, за якої динамічна в’язкість бітуму становить (0,17 ± 0,02) Па∙с, а за температуру початку ущільнення – температуру, за якої динамічна в’язкість бітуму становить (0,28 ± 0,03) Па∙с.

Під час модифікації бітуму добавкою на основі синтетичного воску, незважаючи на зниження пенетрації бітуму, відбувається зниження його динамічної в’язкості за температури 135 °С та 160 °С (рисунок 1).

***Рисунок 1*** – *Вплив добавки на основі синтетичного воску на динамічну в’язкість бітуму*

Тобто бітуми, модифіковані добавкою на основі синтетичного воску, при менших значеннях пенетрації за температури 25 °С (більшій в’язкості за помірних температур експлуатації) мають меншу в’язкість за технологічних температур. Порівнюючи динамічну в’язкість за технологічних температур бітумів, що мають близькі значення пенетрації (марки БНД 40/60 та марки БНД 60/90, модифікованого 3,0 % добавки на основі синтетичного воску), бачимо, що динамічна в’язкість модифікованого бітуму за температури 135 °С та 160 °С є в 1,72 рази та в 2,51 рази, відповідно, меншою за динамічну в’язкість немодифікованого бітуму (рисунок 2).

Оскільки добавка на основі синтетичного воску знижує динамічну в’язкість бітуму за технологічних температур, то вона також буде впливати на технологічні температури виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей. Для встановлення цього було побудовано залежність динамічної в’язкості від температури для кожного досліджуваного бітуму (рисунок 3 – рисунок 7).

***Рисунок 2*** – Залежність динамічної в’язкості еквіпенетраційних бітумів від температури

***Рисунок 3*** – Встановлення технологічних температур виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей для бітуму марки БНД 40/60

***Рисунок 4*** – Встановлення технологічних температур виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей для бітуму марки БНД 60/90

***Рисунок 5*** – Встановлення технологічних температур виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей для бітуму марки БНД 60/90, модифікованого 1,0 % добавки на основі синтетичного воску

***Рисунок 6*** – Встановлення технологічних температур виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей для бітуму марки БНД 60/90, модифікованого 2,0 % добавки на основі синтетичного воску

***Рисунок 7*** – Встановлення технологічних температур виробництва та початку ущільнення асфальтобетонних сумішей для бітуму марки БНД 60/90, модифікованого 3,0 % добавки на основі синтетичного воску

Установлені температури виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей для бітумів марки БНД 60/90 та БНД 40/60 є вищими за відповідні температури, встановлені в таблиці 12 ДСТУ Б В.2.7-119 [1]. Так, установлений необхідний діапазон температури нагрівання  бітуму марки БНД 60/90 становить від 161,5 °С до 167 °С, а діапазон температури нагрівання бітуму згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 становить від 140 °С до 155 °С, а для бітуму марки  БНД 40/60 діапазон температури нагрівання бітуму становить від 188 °С до 196 °С та від 145 °С до 165 °С, відповідно. Відповідні дані отримуємо для діапазону температур, за яких треба розпочинати ущільнювати асфальтобетонні суміші.

Використання добавки на основі синтетичного воску в кількості 1,0 %, 2,0 % та 3,0 % дає можливість знизити температуру виробництва асфальтобетонних сумішей в порівнянні з вихідним бітумом марки БНД 60/90 в середньому на 1,0 °С, 3,5 °С та 4,5 °С, відповідно. Враховуючи, що діапазон температури нагрівання бітуму марки БНД 60/90 під час виробництва асфальтобетонних сумішей становить 5,5 °С, то фактично температури нагрівання бітуму, модифікованого добавкою на основі синтетичного воску, входять в діапазон температур нагрівання вихідного бітуму. Це ж стосується і температури початку ущільнення асфальтобетонних сумішей.

Під час порівняння технологічних властивостей еквіпенетраційних бітумів установлено, що потрібна температура нагрівання бітуму марки БНД 60/90, модифікованого 3,0 % добавкою на основі синтетичного воску, (пенетрація за температури 25 °С становить 51 × 0,1 мм) є більше ніж на 30 °С нижчою за відповідну температуру для бітуму марки БНД 40/60 (пенетрація за температури 25 °С становить 49 × 0,1 мм). Для температури початку ущільнення ця різниця становить близько 25 °С.

**Висновки**

Виконані дослідження показали наступне.

1. Добавки на основі синтетичних восків підвищують в’язкість бітуму за помірних (за значенням пенетрації за температури 25 °С) та за високих температур експлуатації (за значенням динамічної в’язкості за температури розм’якшеності за кільцем і кулею). При цьому еквіпенетраційна температура розм’якшеності практично не змінюється.
2. Введення в бітум добавки на основі синтетичних восків призводить до незначного зниження їх динамічної в’язкості за технологічних температур. Під час модифікації бітуму 3,0 % добавки на основі синтетичних восків технологічні температури виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей можуть бути на (25 – 30) °С нижчими за відповідні температури для бітуму з близьким значенням пенетрації.
3. Оскільки встановлені температури виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей є значно вищими за відповідні температури згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [1] та зважаючи на прийняття нового маркування бітуму за значенням пенетрації, виникає критична необхідність в проведенні досліджень з уточнення технологічних температур виробництва та ущільнення асфальтобетонних сумішей та їх впливу на властивості асфальтобетонів.

**Список літератури**

1. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. Київ, 2012. 43 с. (Інформація та документація).
2. Радовский Б. С. Технология нового теплого асфальтобетона в США. *Дорожная  техника*. Санкт-Петербург, 2008. С. 24-28. URL: <https://bitumen.globecore.ru/wp-content/uploads/sites/5/2015/08/tehnologia_tverdogo_asfaltobetona.pdf> (дата звернення: 05.03.2019).
3. John D’Angelo, Eric Harm, John Bartoszek, etal. Warm-Mix Asphalt: European Practise.  Report N: FHWA-PL-08-007. Washington, 2008.  72 p. URL:  <https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf> (дата звернення: 05.03.2019).
4. Diana Simnofske, Konrad Mollenhauer. Effect of wax crystallization on complex modulus of modified bitumen after varied temperature conditioning rates. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 236. DOI:10.1088/1757-899X/236/1/012003.
5. Eva Remišová, Michal Holý. Changes of Properties of Bitumen Binders by Additives Application. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 245. URL:  <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/3/032003> (дата звернення: 05.03.2019).
6. Mohsen Aboutalebi Esfahani, Majid Harooni Jamaloei, Mohammad Filvan Torkaman. Rheological and Mechanical Properties of Bitumen Modified with Sasobit, Polyethylene, Paraffin,  and  Their Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019. Vol. 31. 7. URL: <https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002664> (дата звернення: 05.03.2019).
7. Solouki, A., Muniandy, R., Hassim, S., Kheradmand, B. (2015). Rheological property investigation of various Sasobit-modified bitumen. *Petroleum Science and Technology.* Vol. 33. 7. Р. 773-779. URL: <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1010040> (дата звернення: 05.03.2019).
8. [ДСТУ EN 1427:2018 (EN 1427:2015, IDT) Бітум та бітумні в’яжучі. Визначення температури розм’якшеності за методом кільця і кулі](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78301). Київ, 2019. 20 с. (Інформація та документація).
9. ДСТУ EN 13302:2019 (EN 13302:2018, IDT) Бітум та бітумні в’яжучі. Визначення динамічної в’язкості бітумного в’яжучого з використанням ротаційного віскозиметра Київ, 2019. 23 с. (Інформація та документація).
10. STANDARD by ASTM International (ASTM D2493 - D2493M-16) Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders. 2016. 5 p.
11. ДСТУ 4044-2001 Бітуми нафтові дорожні в’язкі. Технічні умови. Київ, 2001. 32 с. (Інформація та документація).

**REFERENCES**

1. National standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-119:2011) Asphaltic concrete mixtures, road and aerodromes asphaltic concrete specifications. Kyiv, 2012. P. 43. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. Radovskyi B. S. Tekhnolohyia novoho teploho asfaltobetona v SShA (New warm asphalt concrete technology in the USA). *Dorozhnaia tekhnyka.* St. Petersburg, 2008. P. 24-28. URL: <https://bitumen.globecore.ru/wp-content/uploads/sites/5/2015/08/tehnologia_tverdogo_asfaltobetona.pdf> (Last accessed: 05.03.2019) [in Russian].
3. John D’Angelo, Eric Harm, John Bartoszek, etal. Warm-Mix Asphalt:  European  Practise.   Report N: FHWA-PL-08-007. Washington, 2008. 72. p. URL: <https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf> (Last accessed: 05.03.2019) [in English].
4. Diana Simnofske, Konrad Mollenhauer. Effect of wax crystallization on complex modulus of modified bitumen after varied temperature conditioning rates. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 236. DOI:10.1088/1757-899X/236/1/012003. [in English].
5. Eva Remišová, Michal Holý. Changes of Properties of Bitumen Binders by Additives Application. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 245. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/3/032003> (Last accessed: 05.03.2019) [in English].
6. Mohsen Aboutalebi Esfahani, Majid Harooni Jamaloei, Mohammad Filvan Torkaman. Rheological and Mechanical Properties of Bitumen Modified with Sasobit, Polyethylene, Paraffin,  and Their Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019. Vol. 31. 7. URL: <https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002664> (Last accessed: 05.03.2019) [in English].
7. Solouki, A., Muniandy, R., Hassim, S., Kheradmand, B. (2015). Rheological property investigation of various Sasobit-modified bitumen. *Petroleum Science and Technology.* Vol. 33. 7. P. 773-779. URL: <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1010040> (Last accessed: 05.03.2019) [in English].
8. National standard of Ukraine (DSTU EN 1427:2018 (EN 1427:2015, IDT)) [Bitumen and bituminous binders.](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78301) Determination of softening point by ring and ball method. Kyiv, 2019. 20 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
9. National standard of Ukraine (DSTU EN 13302:2019 (EN 13302:2018, IDT)) Bitumen and bituminous binders. Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus. Kyiv, 2019. (Information and documentation) 23 p. [in Ukrainian].
10. STANDARD by ASTM International (ASTM D2493 - D2493M-16) Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders. 2016. 5 p. [in English].
11. National standard of Ukraine (DSTU 4044-2001) Viscous petroleum road bitumens. Specifications. Kyiv, 2001. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

**Іvan Kopynets,** [*https://orcid.org/0000-0002-0908-4795*](https://orcid.org/0000-0002-0908-4795)

**Оksana Sokolova**,[*https://orcid.org/0000-0003-4202-8661*](https://orcid.org/0000-0003-4202-8661)

**Оleksii Sokolov**,[*https://orcid.org/0000-0002-4694-9647*](https://orcid.org/0000-0002-4694-9647)

**Alina Yunak**, [*https://orcid.org/0000-0002-5294-5554*](https://orcid.org/0000-0002-5294-5554)

*M. P. Shulgin State Road Research institute State Enterprise – DerzhdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

**IMPACT OF ADDITIVES BASED ON SYNTHETIC WAXES ON THE OPERATIONAL AND PROCESSING CHARACTERISTICS OF BITUMEN**

***Abstract***

Introduction. It is established that due to the use of synthetic wax additives, it is possible to reduce the process temperatures of asphalt mix production, as well as to reduce the harmful effects on the environment and fuel consumption on their production.

Problem statement. The work is devoted to the problem of increasing the heat resistance of bitumen and reducing the process temperatures of asphalt mixes production.

Objective. Determination of the dependence of the content of the additive based on synthetic waxes on the heat resistance of bitumen and its processing properties.

Materials and methods. As the objects of the study of oil paving viscous bitumen of BND 60/90 grade (initial), modified with 1,0 %, 2,0 % and 3,0 % synthetic wax additives, and equi-penetration bitumen of BND 40/60 grade with the penetration value which is close to the bitumen penetration modified with 3.0 % of synthetic wax additive were taken. To determine the heat resistance of the bitumen, its softening point was determined by the ring and ball method, the equi-penetration softening point and the dynamic viscosity at the softening point was also determined by the ring and ball method. To determine the processing properties of bitumen on the basis of the dependence of the bitumen viscosity on the temperature, the mixing temperatures of bitumen and aggregates during the production of asphalt mixes and the temperature of the beginning of their compaction were determined.

Results. The influence of the additive content on the basis of synthetic waxes on the operational and processing properties of bitumen is investigated. It was established that the additive based on synthetic wax increases the heat resistance of bitumen at the softening point by the ring and ball method and the dynamic viscosity at the softening point by the ring and the ball method. In this case, the equi-penetration temperature of softening is not changed. There is also a decrease in the dynamic viscosity of bitumen at the process temperatures.

Conclusions Experimental research has proved the possibility of increasing the heat resistance of bitumen by using the additive based on synthetic waxes and the possibility of reducing the process temperatures of production and compaction of asphalt mixes at (25-30 °C) (in comparison with the process temperatures of production and compaction of asphalt mixes on based on the equi-penetration bitumen).

***Key words***: asphalt mix, bitumen, synthetic wax additive, heat resistance, process temperatures.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.12:550.837.7

## *1*Ковальчук В. В., *канд. техн. наук,* [*https://orcid.org/0000-0003-4350-1756*](https://orcid.org/0000-0003-4350-1756)

## 2Кравець І. Б., *[https://orcid.org/0000-0002-2239-849X](https://orcid.org/0000-0002-2239-849X3)*[3](https://orcid.org/0000-0002-2239-849X3)

## *3*Лучко Й. Й., *д-р техн. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0002-3675-0503*](https://orcid.org/0000-0002-3675-0503)

*1Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені  академіка В. Лазаряна, м. Львів, Україна*

*2Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна*

*3Львівський національний аграрний університет, м. Дубляни, Україна*

## ГЕОРАДІОЛОКАЦІЯ ЯК НЕРУЙНІВНИЙМЕТОД МОНІТОРИНГУ

## ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

***Анотація***

Вступ. У вступі коротко наведено основні фактори, що діють на земляне полотно залізничних і автомобільних доріг, котрі спричиняють виникнення та розповсюдження різного роду дефектів та деформацій. Надано коротку характеристику методу георадіолокації, описано загальний принцип дії георадара.

Проблематика. Застосування руйнівних методів моніторингуземляного полотна не дозволяє виявити зародження дефектів земляного полотна на ранніх стадіях, що в подальшому призводить до виникнення аварійних ситуацій та збільшення витрат на поточне утримання. У той же час застосування неруйнівних методів ускладнено у зв’язку з незначним досвідом їх застосування. Одним із таких неруйнівних методів є георадіолокація.

Мета. Метою роботи є огляд та аналіз існуючих досліджень, які присвячені методу георадіолокації, як одного з перспективних неруйнівних методів діагностики земляного полотна.

Матеріали і методи*.* Використано методи аналізу та синтезу при вивчені існуючого досвіду застосування георадіолокаційних досліджень, які наведено в літературних джерелах.

Результати. На основі аналізу досліджень у напрямі застосування георадіолокаційного методувстановлено історичний розвиток та фізичну сутьність зазначеного методу. Приведено особливості поширення хвиль у гірських породах з урахуванням їх характеристик. Розглянуто основні залежності та припущення, що використовуються при обстеженнях (дослідженні) різних споруд та об’єктів георадіолокаційним методом. Описано та проаналізовано результати обстежень методом георадіолокації. Показано можливість контролю якості виконаних робіт та порівняння з проектними рішеннями.

Висновки. Аналіз світового та вітчизняного досвіду застосування георадіолокаційного методу показує, по-перше,що георадари можуть ефективно використовуватися для загального обстеження протяжних ділянокземляного полотна. Їх основними перевагами є оперативність проведення робіт і низька трудоємкість. По-друге, застосування георадара, зокрема при дослідженні залізничних перегонів, є ефективним інструментарієм виявлення в земляному полотні дефектів різного типу і своєчасного ліквідування виявлених недоліків.

У зв’язку з цим актуальною науково-технічною задачею є проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо георадіолокаційного моніторингу і оцінки технічного стану земляного полотна.

***Ключові слова*:** георадіолокація, моніторинг, георадар, земляне полотно, електромагнітна хвиля.

**Вступ**

Під час експлуатації земляне полотно як залізничних, так і автомобільних доріг зазнає різних впливів: динамічне навантаження від рухомих одиниць, температурних, атмосферних опадів, що призводить до виникнення та розповсюдження дефектів, деформацій і пошкоджень, які в подальшому становлять загрозу безпеці руху транспорту.

На даний час існує велика кількість методів для дослідження стану земляного полотна, як руйнівним так і неруйнівним методами, одним із таких методів є георадіолокація. Даний метод дозволяє швидко та економічно вигідно діагностувати стан земляного полотна. Георадіолокація (підповерхневе радіолокаційне зондування; англ. Ground-penetrating radar, GPR) – метод, заснований на випромінюванні імпульсів електромагнітних хвиль і реєстрації сигналів, відбитих від різних об’єктів досліджуваного середовища. На вході середовища генерується електромагнітний імпульс, а на виході приймальною антеною сприймається відгук середовища, що є сукупністю хвиль, які відрізняються між собою часом проходження, інтенсивністю і формою. У кінематичних і динамічних характеристиках цих хвиль міститься інформація про середовище. Прилад, в якому реалізовані принципи георадіолокації, називається георадаром. Принцип дії георадара заснований на випромінюванні надширокосмугових імпульсів метрового і дециметрового діапазону електромагнітних хвиль і приймальної відгуку – сигналу, що є суперпозицією амплітуд прямих, відображених і заломлених хвиль, які досягли прийомної антени.

Для визначення можливості та перспектив використання георадіолокації як неруйнівного методу моніторингу земляного полотна необхідно провести огляд існуючих досліджень в у зазначеному напрямі.

**Виклад основного матеріалу**

***Аналіз робіт в області георадіолокаційних досліджень.***

В середині 50-х років А. Г. Тархов та інші, розробляли метод, заснований на напруженості електромагнітного поля віддалених радіостанцій від геологічної будови даної ділянки місцевості. Аналогічні дослідження були проведені Дж. Вейтом, який теоретично обґрунтував різні випадки розповсюдження радіовипромінювання в слоїстих середовищах [1], та Л. М. Бреховских [2]. В кінці 50-х років[3] А. Д. Петровський створив апаратуру радіопросвічування, Г. Я. Черняк досліджував радіохвильове профілювання з використанням методики настройки антен, а також станцій радіохвильового зондування на основі інтерференційного методу.

Для середовищ з великим затуханням радіохвиль широко використовувані в радіолокації діапазони дециметрового і тим більше сантиметрового хвиль виявилися непридатними. Потрібен був перехід в метровий і декаметровий діапазони, що погіршило б роздільну здатність методу по дальності. У зв’язку з цим було прийнято застосування радіоімпульсів, що включають декілька і навіть один період високочастотних коливань (одноперіодні імпульси, або моноімпульси). Для формування таких імпульсів ефективним виявилося запропоноване Дж. Куком в 1956 р. збудження широкополосної антени перепадом напруги – ударним збудженням антен.

Наземні радіолокатори підповерхневого зондування, в яких застосовується ударне збудження антен, працюють переважно в інтервалі частот 15–500 МГц, причому нижня межа частіше всього близько 100 МГц. Цей метод успішно застосовано для зондування у вапняку та вугіллі [4], в сухому доломіті товщиною 75 м [5], а також для виявлення закритих труб та інших подібних предметів на глибині до 8 м у прісній воді, мерзлих та звичайних ґрунтах [4] Під час зондування мерзлих ґрунтів було показано можливість картування структурних неоднорідностей в інтервалі глибин 3-30 м [6].

Теоретичним та практичним аспектам підповерхневого радіолокаційного зондування присвячено велику кількість наукових робіт [3, 6–14]. Вагомий внесок у розвиток радіолокаційного підповерхневого зондування внесли вчені: A. P. Annan (Канада); J. L. Davis (США); J. D. Daniels (Великобританія); M. Bano (Франція); T. Dahlin (Швеція); М. И. Финкельштейн, М. Л. Владов, А. В. Старовойтов, С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский, А. Ю. Гринев (Росія); Д. М. Ваврів, В. Г. Сугак, О. О. Вертій, А. М. Куделя (Україна) та інші.

Дослідженнями в області застосування методу георадіолокації, як і інших геофізичних методів при діагностиці земляного полотна залізничних і автомобільних доріг займалися вчені: Г. Г. Коншин, А. Г. Круглый, Е. С. Ашпиз, В. А. Явна, В. И. Грицык, А. М. Кулижников (Росія); В. Д. Петренко [15,16], А. Г. Батракова [17] (Україна).

Відомими компаніями та організаціями, які займаються розробкою георадарів та програмного забезпечення, є: Transient Technologies, EASYRAD GPR (Україна); ООО «Геологоразведка», ОАО «ВНИИСМИ», ООО «ТАЙМЕР», ООО «ЛОГИС» (Росія); GSSI (США); Sensor and Software Inc (Канада); Geoscanners AB та MALA (Швеція); US Radar Inc (Великобританія); Radar Systems (Латвія); OYO corporation та NTT (Японія); Geozondas (Литва) та інші.

На даний час область застосування методу георадіолокації (рис. 1) достатньо обширна та швидко розвивається: цивільна інженерія [18]; археологія [19]; гідрологія [20]; громадська безпека та криміналістика [21]. У транспортному будівництві метод застосовується для неруйнівного контролю залізничних та автомобільних доріг; для контролю якості під час будівництва насипів; для оцінки внутрішнього стану дорожніх конструкцій; для оцінки стану покриття в аеропортах; при діагностиці залізничного та автомобільного земляного полотна та його основи; для визначення ступеня забрудненості баластного шару і виявлення місць розташування баластних заглиблень в основній площадці залізничного земляного полотна; для встановлення рівня грунтових вод; для встановлення меж промерзання земляного полотна; при обстеженні підпірних стін, мостів та тунелів, [7, 10, 11, 22–31, та інші].

У працях [32, 33] наведено застосування георадарів, у гірничій галузі, інженерами для забезпечення безпеки гірничих робіт, вимірювання глибини залягання корінних порід, картографування піщано-гравійних покладів, визначення товщини порід, а також пошуку корисних копалин. Автори [34] пропонують застосовувати георадарадіолокацію як самостійний  геофізичний метод, так і в комплексі з іншими геофізичними методами для: побудови геологічних розрізів, визначення меж пластів; прогнозування потенційно викидонебезпечних зон тектонічних порушень; моніторингу стану вугільних пластів і вміщуючих їх порід покрівлі та підошви; випереджуюче сканування масиву порід в процесі проходки виробок (транспортних, дренажних, вентиляційних виробок, лав ,тощо); визначення   точного положення підземних об’єктів перед бурінням або початком роботи в забої; визначення рівня грунтових вод, зон надлишкового обводнення; визначення виходів корінних порід і т.д.; виявлення ділянок розвитку небезпечних геологічних процесів – карстових порожнин, порожнин, суфозії, зсувів, тектонічних порушень і зон тріщинуватості, зон розущільнення, меж  лінз, пливунів; побудова детальних геологічних розрізів між геологорозвідувальними свердловинами; контроль товщини бетонних стін шахтних стволів, шурфів, пошук дефектів кріплення.

Археологія

Екологія

Громадська безпека та

криміналістика

Дослідження автомобільних та залізничних доріг

Пошук обʼєктів та пустот в

будівельних конструкціях

Геологія

Область застосування георадіолокації

Пошук комунікацій

***Рисунок 1*** – Область застосування методу георадіолокації

У праці [35] наведено результати георадарних обстежень насипів при доповненні до традиційних технологій інженерних вишукувань, що дозволяють виявляти підтоплені місця і ступінь їх пошкодження, що є необхідним для призначення відповідних заходів щодо запобігання подальшого розвитку пошкоджень. Показано можливість контролю якості виконаних робіт і відповідність проектних рішень дійсності. Автор зазначає, що необхідно формувати електронну базу даних для систематизації та зберігання інформації, яка містить результати георадіолокаційнного обстеження насипу, для створення ефективної системи моніторингу за підтопленими насипами, потенційно схильними до руйнування.

У праці [36] зазначено результати обстеження земляного полотна за допомогою георадіолокаційнного зондування на об’єктах реконструкції і капітального ремонту залізниць. Автор зазначає, що застосування георадіолокаційного зондування створює передумови для обгрунтованого проектування заходів по оздоровленню земляного полотна: влаштування шарів з геотекстилю та георешіток, глибока вирізка баласту і планування основної площадки, осушення баластних лож і мішків, відсипання контрбанкетів, влаштування контрфорсів і габіонів, підпірних стінок, присипок і ін. Економічний ефект при виконанні інженерно-геологічних вишукувань із застосуванням георадарів для обстеження земляного полотна залізниць досягається за рахунок скорочення бурових робіт і підвищення якості одержуваної інформації за результатами досліджень. Достовірність обстеження земляного полотна із застосуванням георадарних технологій збільшується в середньому в кілька разів. Кількість свердловин контрольного буріння необхідно визначати за результатами георадіолокаційного зондування з урахуванням того, в яких місцях виникають труднощі при інтерпретації радарограм. Згідно аналізу радарограм та результатів інженерно-геологічних робіт (з відбором проб), встановлено, що за допомогою аналізу амплітуд сигналу в кожній точці зондування можна визначати вологість як грунтів, що складають земляне полотно, так і баластної призми, що дозволяє, в свою чергу, попереджувати деформації основної площадки земляного полотна та баластної призми.

У праці [37] окреслено результати контролю якості закріплення просадкових грунтів за допомогою георадіолокаціонного обстеження масиву з подальшою обробкою отриманих даних в автоматизованому режимі з побудовою розрізів добротності поля зворотнього розсіювання. Показано, що проведення робіт по запропонованій методиці дозволяє з одного боку підвищити якість закріплення грунтів, а з іншого – знизити витрати на виконання робіт. Розглянуто результати натурних спостережень за змінами значень добротності при ін’єкційному зміцненні грунту основи в режимі гідророзриву. Таким чином, застосування геораділокації згідно запропонованої методики, може стати одним з ефективних засобів визначення якості закріплення грунтів основ фундаментів. В роботі показано, що сучасні комп’ютерні програми обробки геораділокаціонних спостережень дозволяють на більш високому технологічному рівні вирішувати практичні завдання на будівельних об’єктах, зокрема в методах неруйнівного контролю. Отримувані з їх допомогою дані показують наявність ін’єкційного розчину в масиві, його просторовий розподіл, розташування розущільнених зон грунту, в тому числі і на контакті з фундаментом, дозволяють переходити до значень щільності.

У праці [38] наведено приклад виконання геофізичних досліджень методами георадіолокації і електротомографії в межах інженерних вишукувань на ділянці будівництва залізничної естакади. Особливістю ділянки є підвищений рівень техногенних перешкод, які мають значний вплив на польові дослідження електророзвідувальних робіт, збільшуючи похибку вибору електротомографічної моделі, тим самим знижуючи однозначність геологічної інтерпретації на етапі камеральної обробки. Розглядається підхід до спільної обробки та інтерпретації геофізичних даних, коли при розрахунку електротомографічної моделі в якості апріорних даних використовуються літологічні межі, виділені за даними георадіолокації.

Автори зазначають, що розрахунок геоелектричних моделей з урахуванням георадіолокаційних даних дозволив знизити неоднозначність розв’язання оберненої задачі, обумовленої впливом техногенних перешкод, на ділянці смуги відведення діючої залізниці, тим самим підвищивши достовірність геологічної інтерпретації геофізичних даних.

У праці [39] проведена апробація і впровадження сучасної технології геораділокації для вирішення інженерно-технічної задачі в процесі проектних і будівельних робіт на прикладі вивчення стану вертикальної підпірної стінки на зсувному схилі. Встановлено, що: контакт стіни з грунтом можна вважати відносно рівномірно щільним, причому для бічної стіни нижня частина більш щільна, ніж верхня, а для лицьової стіни спостерігається менш щільний контакт в діапазоні 20–25 метрів від лівого краю стіни; бетонна стіна споруджена на пальовій основі з металевих шпунтів (сталевих труб).

Автори зазначають, що перевага сучасної технології георадіолокації при виявленні дефектів бетонних конструкцій полягає в мобільності натурних спостережень і в створенні нових програмних продуктів обробки радарограм, що дозволяє поряд з аналізом первинної хвильової картини створювати її математичну фільтрацію за допомогою побудови наближеної моделі середовища в параметрах електромагнітного поля і тим самим виділити об’єкти на фоні перешкод. Недоліком георадіолокаціойних вимірювань, на відміну від ультразвукових і сейсмоакустичних, є відсутність на даний момент кількісних кореляційних залежностей, що дозволяють оцінювати фізико-механічні властивості бетону.

Актуальним завданням вдосконалення методів неруйнівного контролю вертикальних бетонних споруд є розробка: технологій безперервного запису параметрів поля в русі за допомогою використання спеціальних гідравлічних подушок в ультразвукових і акустичних приладах; малогабаритних багаточастотних ультразвукових, акустичних і георадарних апаратних комплексів, що містять два і більше приймальних блоки, рівновіддалених від генератора.

У праці [40] запропоновано методику безперервного визначення властивостей конструкційних шарів, що базується на георадіолокаційному методі, тарованого прямими вимірюваннями властивостей конструкції. Розглянуто різні методи визначення діелектричної проникності піщано-гравійної суміші і її змін, пов’язаних зі зміною характеристик грунту в процесі ущільнення. Також визначено значення усадки грунту в процесі ущільнення з урахуванням змінного значення діелектричної проникності, отримано залежність щільності грунтів в різних шарах по глибині від кількості проходів котка. Ефективність пропонованих методів перевірена на ділянці земляного полотна при пробному ущільненні.

***Основні історичні дані та характеристики георадіолокаційного методу.***

Георадіолокація є одним із прогресивних методів дослідження стану інженерних споруд  і таким, що викликає інтерес серед фахівців, що займаються неруйнівними дослідженнями. У 1910–1911 рр. німецькими вченими Г. Леві та Г. Леймбахом встановлено, що деякі гірські породи (кам’яна сіль, гіпс, сухий пісок) можна дослідити за допомогою радіохвиль без проблем, а для інших (наприклад, для глини) виникають певні обмеження. Вони також запропонували в 1912 році інтерференційний метод для пошуку води та руд. Якщо змінити частоту генератора при певній відстані між приймальною та передавальною антенами, що розташовані на поверхні землі, то в приймачі фіксуються максимуми та мінімуми сигналів, викликані інтерференцією прямої і відбитої від підповерхневого шару хвиль. Застосуванням  цього методу до льодовиків експериментально досліджував німецький вчений В.  Штерн (1929 р.), а для визначення рівня ґрунтових вод у пустині – Ель-Саід (1956 р.) [3].

***Фізична сутність георадіолокації.***

У 1873 році шотландський математик-фізик Джеймс Клерк Максвелл узагальнив експериментальні закони Кулона, Біо-Савара-Лапласа, Ампера, Фарадея і сформулював рівняння які стали фундаментом всієї електродинаміки. Максвелл запропонував теорію електромагнітного поля, яка класифікує світло як електромагнітне явище так само, як електрика і магнетизм. Закон Кулона показує, що електричний заряд оточений електричним полем, який діє на інші заряди, змушуючи їх пересуватися, якщо вони вільно це роблять. Закон Ампера показує, що електричний заряд (або струм), що рухається в провіднику, створює магнітне поле, пропорційне швидкості заряду. Якщо електричне поле збільшується, так що заряд прискорюється, його швидкість зміни призводить до зміни магнітного поля, що, у свою чергу, індукує інше електричне поле в провіднику (закон Фарадея) і тим самим впливає на рух прискореного заряду. З’єднання електричного та магнітного полів називається електромагнетизмом. Якщо два прямі провідники покладені наскрізними і поєднані послідовно, вони діють як електричний диполь. Змінне електричне поле, що застосовується до провідників, призводить до коливання диполя, що діє як антена для випромінювання хвилі EM. Електромагнітні хвилі складаються з магнітного поля Н та електричного поля Е, які змінюються з частотою осцилятора та орієнтовані під прямим кутом один до одного у площині, перпендикулярній напряму поширення рис.2.

У методі георадіолокації поширення електромагнітних хвиль в середовищі описується фундаментальними рівняннями електродинаміки Максвелла (1–4), щоб отримати повну систему рівнянь електромагнітного поля до рівнянь (1–4) додають матеріальні рівняння (5–7), що враховують властивості середовища:

 (1)

 (2)

 (3)

 (4)

 (5)

 (6)

 (7)

де  – напруженість магнітного поля, А/м;

 – електрична індукція, Кл/м2;

 – щільність струму провідності, А/м2;

 – напруженість електричного поля, В/м;

 – магнітна індукція, Тл;

 – щільність електричного заряду, Кл/м3;

 – диференціальний оператор Набла;

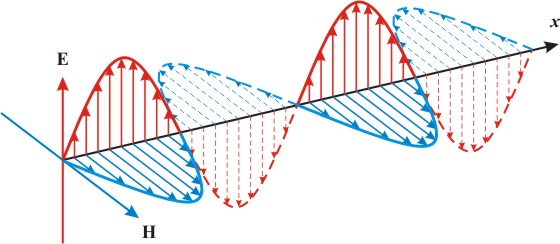
 – відносна діелектрична проникність середовища;

 – електрична постійна, 8.854∙10-12Ф/м;

 – відносна магнітна проникність середовища;

 – магнітна постійна, 1.257 10-6 Гн/м;

 – питома провідність середовища, См/м (сіменс на метр).



***Рисунок 2*** – Електромагнітна хвиля

***Урахування електофізичних характеристик гірських порід.***

При застосуванні радіолокаційних досліджень необхідно враховувати загасання, швидкості поширення радіовипромінювання, частотну дисперсію та інші параметри у різних середовищах: ґрунті, піску, суглинку, воді, повітрі, льоді, конструкційних матеріалах, середовищах з різною вологістю тощо [2, 7, 8].

Питоме загасання, яке визначає глибинність зондування, та швидкість поширення електромагнітних хвиль в середовищі визначаються її електричними властивостями і є найбільш важливими параметрами, які характеризують можливості застосування методу георадіолокації. Оскільки всі речовини, окрім металів, можуть бути віднесені до діелектриків із кінцевою провідністю, то вводиться комплексна відносна діелектрична проникність:

 (8)

де  – комплексна відносна проникність,

 – дійсна частина, пов'язана з поляризацією діелектрика під дією прикладеного поля;

 – уявна частина, пов'язана з кінцевою провідністю діелектрика (в Ом/м):

 (9)

де  – частота прикладеного електромагнітного поля.

Для характеристики діелектричних втрат застосовують тангенс кута діелектричних втрат, яка визначається як відношення уявної та дійсної частини відносної діелектричної проникності:

 (10)

де *tg δ* – тангенс кута діелектричних втрат.

Для георадіолокації необхідно також знати дисперсію діелектричної проникності її залежність від частоти прикладеного електромагнітного поля. Цю складову визначають експериментальним шляхом. Від діелектричної та магнітної проникності залежить швидкість поширення електромагнітних хвиль в діелектриках. Оскільки для більшості гірських порід [7] значення магнітної проникності приблизно становить 1 і не залежить від частоти, то фазова швидкість поширення хвилі становитиме

 (11)

де *с* – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Співвідношення (12) – одне з найбільш важливих для радарних досліджень, оскільки *V* – вимірювана величина, а  – властивість речовини.

При цьому коефіцієнт загасання буде

 (12)

довжина хвилі в середовищі дорівнюватиме

 (13)

звідси питоме загасання, тобто загасання хвилі на одиницю довжини шляху в децибелах на  метр  (дБ / м) буде

 (14)

Для практичного застосування формулу (15) розбивають на дві – для випадків з малими діелектричними втратами коли *tg δ*< 0.3 і з великими діелектричними втратами *tg δ* ≥ 0.3 [7]

 (15)

Швидкість поширення імпульсу визначається як групова швидкість хвилі за рівнянням Релея

 (16)

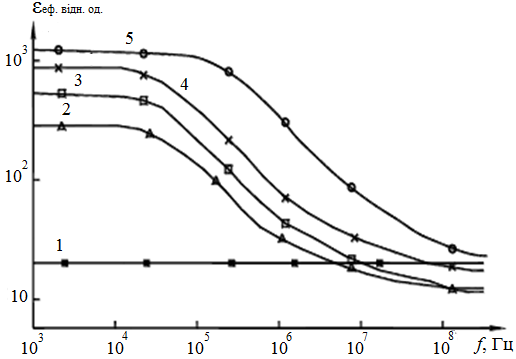
де *n* – комплексний коефіцієнт заломлення.

У слабо поглинальних середовищах відмінності між фазової і групової швидкостями будуть невеликі. Отже, у результаті припущень про малість втрат, час пробігу хвилі через шар товщиною *h* буде визначатись за формулою 2*h*/*V* (а не за формулою – 2*h*/*V*ф), де *V* – швидкість пробігу зондувального сигналу в шарі.

Проте аналіз показав, що залежність комплексної діелектричної проникності від частоти, визначається часом поляризації *τ* [41].

На рис. 3 показано кілька експериментальних залежностей, де для хвиль метрового діапазону – *f* ≈108 Гц і більше значення діелектричної проникності вже практично не змінюються.

У результаті аналізу великої кількості лабораторних та натурних експериментів встановлено, що у діапазоні метрових хвиль дійсна частина комплексної діелектричної проникності ε', а отже і швидкість поширення електромагнітних хвиль, практично не залежать від частоти і типу ґрунтів, а дуже сильно залежать від їх вологості. Вченими встановлено, що величина питомого опору породи також залежить від частоти електромагнітної хвилі, типу породи, її вологовмісту і мінералізації. Загальною закономірністю є зменшення питомого опору з ростом частоти, вологості і мінералізації води в породі глинястості породи.



***Рисунок 3*** – Залежність діелектричної проникності різнихпорід від частоти [42]: 1 – пісок; 2 – суглинок (вологість 10%); 3 – суглинок (вологість 20%); 4 – суглинок (вологість  30%); 5 – глина

***Поширення електромагнітних хвиль в середовищі.***

Поширення електромагнітних хвиль метрового діапазону, характерного для георадарних досліджень, розглядається в рамках законів геометричної оптики відповідно для плоских хвиль на великих віддалях від джерела і для сферичних хвиль на малих віддалях від джерела.Враховуючи контраст по діелектричній проникності штучних або природних шарів, можна їх відрізнити один від одного. Встановивши взаємозв’язок між діелектричною проникністю та характеристиками речовин стало можливим розв’язати інженерні задачі георадіолокації.

При визначенні швидкостей поширення і амплітуд хвиль у рамках допустимих похибок, діють принципи Ферма, Гюйгенса, Френеля і закон Снеліуса. Згідно [7] припускається, що в ізотропному середовищі промінь перпендикулярний фронту хвилі, і можливі геометричні побудови шляхів хвиль в середовищі з подальшим обчисленням параметрів середовища за виміряними кінематичними і динамічними характеристиками записів хвиль (радарограм).

Хвиля, що поширюється, відбивається тільки від границь поділу різних середовищ, в яких спостерігається зміна відносної діелектричної проникності або провідності. Коефіцієнт відбиття при нормальному падінні хвилі на границю поділу між середовищами з різною діелектричною проникністю, буде визначатись за виразом:

 (17)

Коефіцієнт заломлення (проходження через границю) буде рівний:

 (18)

При дворазовому проходженні через границю, наприклад, при відбитті від більш глибокої границі, сумарне зменшення амплітуди сигналу буде дорівнює .

Надзвичайно важливим для георадіолокаційних досліджень є явище дифракції, яке виникає у результаті опромінення об’єкта електромагнітними хвилями, розміри якого менші за довжину хвилі. Дифракція може вплинути на розпізнавання хвильових картин, так як пошук локальних об’єктів зводиться до пошуку вторинних джерел випромінювання на записах, що впливає на визначення глибини залягання об’єкта та швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в середовищі над об’єктом.

Факторами, що впливають на зменшення амплітуди зондувального сигналу (загасання сигналу), є [7]: відбиття і заломлення на проміжних границях; втрати, пов’язані з загасанням сигналу в середовищі;геометричне розсіювання фронту хвилі.

Останній фактор має значення на невеликих віддалях від джерела коливань в перші періоди хвиль, коли хвилю можна вважати сферичною і щільність потоку енергії від джерела зменшується обернено пропорційно площі поверхні фронту, а амплітуда, відповідно, обернено пропорційна радіусу сфери або відстані до джерела:

 (19)

де *R* – відстань до джерела.

Для розрахунку зменшення амплітуди відбитої хвилі за рахунок розбіжності сферичного фронту *R* дорівнюватиме подвоєній глибині границі відбиття.Необхідно також враховувати, що в різних середовищах швидкість поширення хвиль різна.

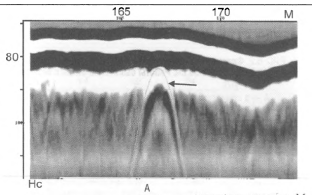
Згідно [9] задачі, які вирішуються за допомогою георадіолокації, можна об’єднати в чотири основні групи: 1) вивчення геологічної будови перерізу; 2) пошук різноманітних об’єктів; 3) дослідження різних конструкцій; 4) вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів і об’єктів.

**Приклади застосування георадіолокаційного обстеження в різних галузях**

***При пошуку різноманітних об’єктів*.**

Задачі з пошуку різних об’єктів є одними із основних напрямків георадіолокаційних досліджень. До них відносяться пошук трубопроводів, кабелів, валунів, залишки будівельних конструкцій, ємностей, порожнин, археологічних об’єктів і ін. більше інформації в даному напрямку наведено у [7, 9, 11, 43 та інші].

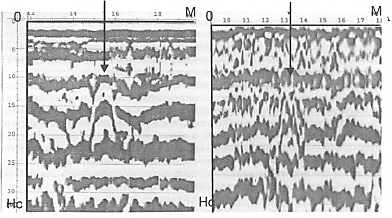
Найбільш проста хвильова картина спостерігається при георадіолокаційному профілюванні над трубами, як правило на радарограмі видно тільки теоретична вершини гіперболи (рис. 4)*.* Аналіз досвіду дослідників, які займаються питаннями георадіолокації, показує, що інформативність георадарного знімання залежить не тільки від складу породи, але і від її зволоженості та погодніх умов. На рис. 5. наведено фрагмент георадіолокаційного профілю, виконаний над трубою діаметром 20 см, яка знаходиться на глибині 50 см. *а –* в суху погоду, *б –* після дощу. Вимірювання проводили з інтервалом у 2 тижні, використовували антену 500 МГц. Стрілками показано положення труби. З рисунку видно, що осі синфазності від труби добре простежуються в сухому грунті *а*, ніж у вологому *б* [9].



***Рисунок 4*** – Фрагмент георадіолокаційного профілю, стрілкою показана теоретична гіпербола, це свідчить про наявність труби [9]

***При обстеженнях дорожнього покриття та злітно-посадкових смуг*.** Дане  георадіолокаційне дослідження включає в себе: пошук порожнин під покриттями; пошук місць з підвищеною вологістю; пошук ділянок розущільнення; пошук тріщин в покриттях і основах; визначення товщини покриття; визначення внутрішнього стану покриття і ін., більше інформації в даному напрямку наведено у [9, 11, 35, 43, 44, та інших].

Як зазначено у [11], однією з проблем експлуатації доріг є ліквідація просадок і провалів дорожнього полотна, що викликають, як правило, порушення режимів руху, а в деяких випадках і серйозні аварії. Причин утворення просадок і провалів досить багато, але основними є: порушення технології спорудження грунтової основи і дорожнього одягу, неякісно проведена зворотна засипка при прокладці комунікацій відкритим способом, аварії і нештатні ситуації під час прокладання під дорогою комунікацій за допомогою безтраншейних технологій, аварії на підземних водоносних комунікаціях, прояви карстово-суффозійних і зсувних процесів. Виявлення конкретних причин просадок дорожнього полотна сприяють прийняттю найбільш раціональних інженерних рішень для їх ліквідації.



*a) б)*

***Рисунок 5*** – Фрагмент георадіолокаційного профіля [9]: *a)* – суха погода; *б)* – після дощу

На рис. 6 приведено приклад георадіолокаційного зондування ділянки провалу на автодорозі та результат обробки.

|  |  |
| --- | --- |
| 1003 | 1003 |

***Рисунок 6*** – Зондування місця провалу на автодорозіта його результат [43]

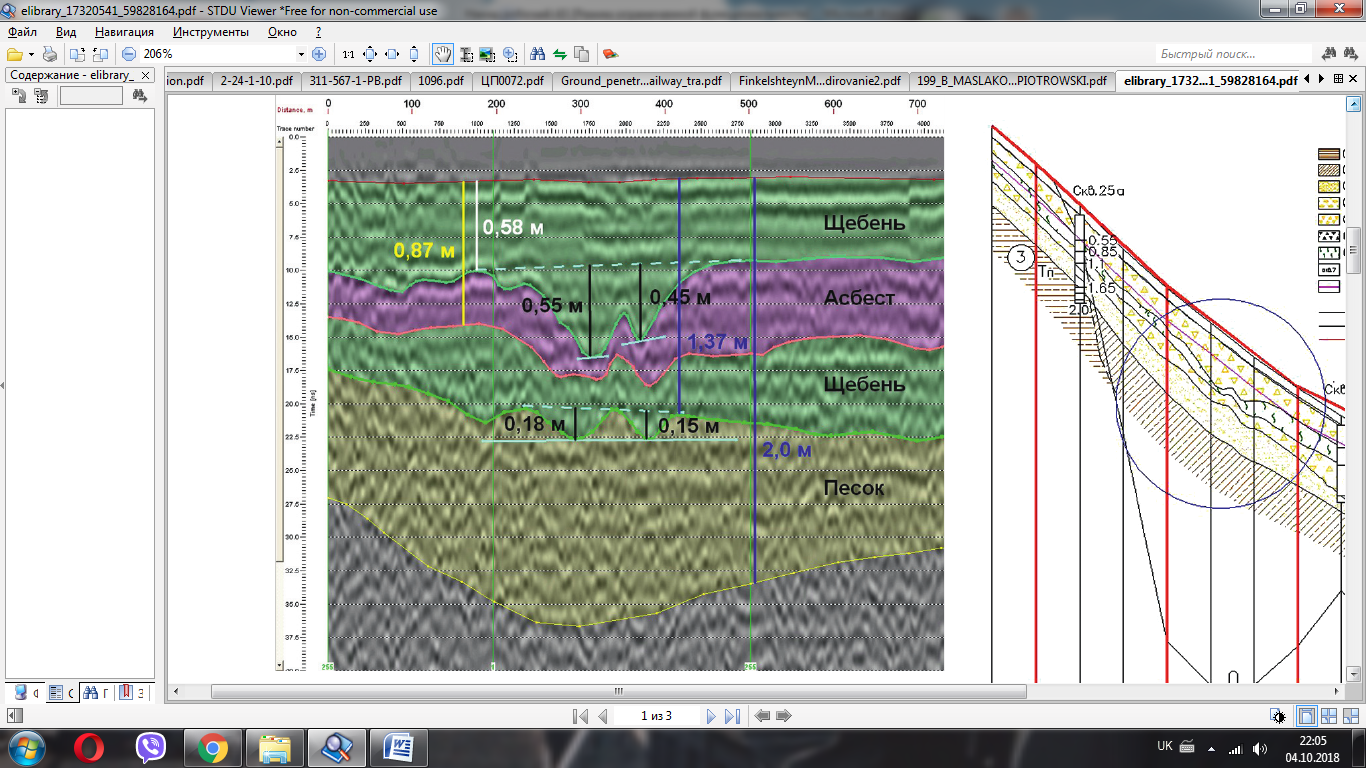
Із матеріалів, приведених у [9], видно, що використання антен з різною частотою дозволяє успішно визначати причини деформацій покриттів і за необхідності проводити моніторинг як дорожнього так і злітно-посадкового полотна.

***При обстеженнях залізничного земляного полотна.*** В процесі експлуатації земляного полотна залізниці та підвищення навантаження в ньому виникають деформаційні процеси. Метою георадіолокаційних досліджень є пошук та попередження причин деформаційних процесів для їх уникнення та усунення. Задачі, що вирішуються при дослідженні: визначення товщини основних шарів земляного полотна; вивчення контурів шарів для виявлення просідань, баластних заглиблень, корит і ін..; виявлення місць скупчення грязевих гнізд або лінз, що приводять до утворення виплесків; пошук місць локального перезволоження; визначення товщини баластних шлейфів на відкосах; та ін.. більше інформації в даному напрямку наведено у [9, 10, 11,15, 16, 43, 44, 45, 46, 47 та інших].

Поширеним дефектом баластної призми є утворення грязевих гнізд або лінз, що в подальшому веде до перезволоження, та під дією динамічного навантаження утворюється виплеск. На рис. 7. приведено забруднений баласт та радарограму на якій виділені місця забрудненого баласту (стрілкою на радарограмі показано верх забрудненого баласту, що відповідає лінії на фото).

|  |  |
| --- | --- |
| *a)* | *б)* |
| ***Рисунок 7*** – Фрагмент радарограми і розкопаний забрудненийбаластний шар [9]: *a* ) – радарограма; *б)* – забруднений баластний шар | |

Однією з головних переваг георадіолокації у порівнянні з бурінням є можливість вести неперервну зйомку, тобто отримані дані становлять просторово–часовий переріз рис. 8.



***Рисунок 8*** – Фрагмент радарограми насипу залізничної колії після інтерпретації [46]

Це дозволяє простежити стан і потужність ґрунтів насипу вздовж усього профілю, а не в його окремих точках. На даній ділянці наявні деформації земляного полотна, що становлять, в основному, просадки залізничної колії та розповзання насипу. Дані деформації усувались шляхом підсипання щебеню, що добре простежується на радарограмі. Щоб отримати дані про товщину щебеню класичним методом, довелося би пробурити не один десяток свердловин, які потребують значних витрат коштів і часу.

**Висновки**

На даний момент як на автомобільних, так і на залізничних дорогах найпоширенішими методами оцінки їх стану є візуальні огляди, які не завжди ефективні та надійні, їх результати у значній мірі залежать від кваліфікації інженера, що здійснює огляд.Дану ситуацію можна покращити методами використання засобів неруйнівного контролюоцінки технічного стану транспортних споруд, які експлуатуються на залізничних та автомобільних дорогах України.

Як показує аналіз застосування георадарів у країнах ЄС вони можуть ефективно використовуватися для загального обстеження протяжних ділянок земляного полотна автомобільних доріг та залізничних перегонів. Їх основними перевагами є оперативність проведення робіт і низька трудоємкість. Вони сприяють підвищенню достовірності інженерно-геологічної інформації і тим самим покращують якість і знижують вартість як проектної документації, так і будівельних, ремонтних і експлуатаційних робіт.

Застосування георадара, зокрема в інженерно-геологічних умовах залізниць Українидозволить виявляти в земляному полотні дефекти різного типу і прийматисвоєчасні рішення із метою усунення хворих місць. Використання георадіолокації дозволить простежити стан і потужність ґрунтів насипу вздовж усього профілю, а не в його окремих точках.

На сьогоднішній день немає практичних рекомендацій із оцінки технічного стану земляного полотна георадіолокаційним методом. Тому напрямком подальшої науково-дослідної роботи є проведення фундаментальних досліджень, щодо ефективності застосування георадарних технологій в різних середовищах при різній температурі, щільності та вологості грунту.

У зв’язку з цим актуальною науково-технічною задачею є проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо георадіолокаційного моніторингу і оцінки технічного стануземляного полотна.

**Список літератури**

1. Wait J. R. Electromagnetic Waves in Stratified Media. *Macmillian*. New York, 1962. Ch. 2. 515 p.
2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Москва, 1973. 344 с.
3. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. Москва, 1986. 128 с.
4. Cook J. C. Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks*. Geophysics*. United States, 1975. Vol. 40. N 5. P. 865-885. URL: <https://doi.org/10.1190/1.1440573> (дата звернення: 26.02.2019).
5. Lambert T. Dolphin, Robert L. Bollen, and George N. Oetzel. An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics.* United States, 1974. Vol. 39. N 1. P. 49-55. URL: <https://doi.org/10.1190/1.1440411> (дата звернення: 26.02.2019).
6. Annan A. P., Davis J. L. Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Science*. 1976. Vol. 11. Issue 4. P. 383-394. URL: <https://doi.org/10.1029/RS011i004p00383> (дата звернення: 26.02.2019).
7. Владов М. Л. Введение в георадиолокацию. Москва, 2004. 153 с.
8. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная радиолокация. Москва, 1994. 216 с.
9. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. Москва, 2008. 192 с.
10. Гринев А. Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. Москва, 2005. 416 с.
11. Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С. Теория и методы георадиолокации. Москва, 2008. 196 с.
12. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. А., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. Москва, 1977. 176 с.
13. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. *Institution of Electrical Engineers*. London, 2009. 734 p.
14. Jol H. M. Ground penetrating radar: theory and applications. Amsterdam: *Elsevier Science*, 2008. 508 p.
15. Петренко В. Д., Харлан В. И., Косяк В. Н., Ковалевич В. В. Применение георадиолокационного метода при исследовании дефектов высоких насыпей железнодорожного земляного полотна. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск, 2011. Вып. 61. С. 312-316.
16. Petrenko V. D., Kovalevych V. V. The results of the defect places investigation ofDonetsk railway road bed by ground penetrating radar complex. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту.* Дніпропетровськ,2014. N 5 (53). С. 83-91. URL: <https://studfiles.net/preview/8163899/> (дата звернення: 26.02.2019).
17. Батракова А. Г., Процюк В. О. Визначення вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням польового георадару. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2017. Вип. 100. С. 48-56. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/048-056.pdf> (дата звернення: 26.02.2019).
18. Benedetto A, Pajewski L.  Civil engineering applications of ground penetrating radar.  Springer: Transactions in Civil and Environmental Engineering. 2015. 371 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0> (дата звернення: 26.02.2019).
19. Бондар К. М., Бобровський Т. А., Цюпа І. В. Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника «Софія Київська» для вирішення археологічних завдань. *Геоінформатика*. Київ, 2016. N 4(60). С. 75-82. URL: <http://www.geology.com.ua/UK/geoinformatika-2016-460-75-82/> (дата звернення: 26.02.2019).
20. Бобров, Н. Ю., Крылов С. С., Киселев Е. Ю., Пряхина Г. В., Федорова И. В. Применение георадиолокации в гидрологии. *Записки Горного института*. Санкт-Петербург, 2009. Том 183. С. 219-223. URL: <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/1884/1959> (дата  звернення: 26.02.2019).
21. John J. Schultz, Mary E. Collins, Anthony B. Falsetti. Sequential Monitoring of Burials Containing Small Pig Cadavers Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Forensic Sciences*. United States, 2006. Vol. 53. Issue 3. p. 607-616. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00129.x> (дата звернення: 26.02.2019).
22. Ашпиз Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог: монография. Москва, 2002. 112 с.
23. Коншин Г. Г. Методы и средства диагностики земляного полотна. Москва, 2004. 213 с.
24. Фоменко Н. Е., Гапонов Д. М., Капустин В. В., Попов В. В., Фоменко Л. Н. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. Томск, 2017. Том. 328. N 3. С. 37-45. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (дата  звернення: 26.02.2019).
25. Казарин А. Б., Казарин Б. А., Гусев Д. Е., Пастушков Г. П., Пастушков В. Г., *Жихарев* Д. В. Практика использования георадарных технологий при обследовании тоннелей. *Наука та прогрес транспорту*.Дніпропетровськ, 2008. Вип. 21. С. 113-116. URL:  <http://stp.diit.edu.ua/article/view/16294/15006> (дата звернення: 26.02.2019).
26. Набатов В. В., Гайсин Р. М., Вознесенский А. С. Георадиолокационная оценка качества контакта «грунт-обделка» в условиях тоннелей метрополитенов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Москва, 2013. N 9. С. 157-163. URL: <http://www.giab-online.ru/catalog/10794> (дата звернення: 26.02.2019)
27. Benedetto A, Manacorda G, Simi A, Tosti F. Novel perspectives in bridges inspection  using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2012. Vol. 27. Ussue 3. P. 239-251. URL: <https://doi.org/10.1080/10589759.2012.694883> (дата звернення: 26.02.2019).
28. Amir A. M., Aboutalebi M., *Kilic* G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in  bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics.* 2013. Vol. 97. P. 45-54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.009> (дата звернення: 26.02.2018).
29. Su J., Zhang W, Xiang H, Guo X. Application and Analysis of Ground Penetrating Radar in Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Airport Runway. *Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 153. 2: 032011. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/3/032011> (дата звернення: 26.02.2019).
30. Масалов С. О., Почанін Г. П., Рубан В. П., Холод П. В. Радіолокаційний моніторинг технічного стану підповерхневої частини інженерних споруд. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. Kyiv, 2016. N 1. С. 17-23. URL: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.01.03> (дата звернення: 26.02.2019).
31. Фоменко Н. Е., Гапонов Д. А., Капустин В. В., Попов В. В., Фоменко Л. Н. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций. *Известия Томского политехнического университета.* *Инжиниринг георесурсов*. Томск, 2017. Т. 328. N 3. С. 37-45. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (дата  звернення: 26.02.2019)
32. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource  evaluations. Journal of Applied Geophysics. 2012. Vol. 81. P. 29-37. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.020> (дата звернення: 26.02.2019)
33. Peter Hatherly. Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology.* 2013. Vol. 114. P. 74-84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.02.006> (дата звернення: 26.02.2019)
34. Медяник В. Ю., Довбніч М. М., Янкін Д. В. Моніторінг структур масивів гірських порід із застосуванням георадарів нового технічного рівня при підземній розробці газовугільних родовищ. Форум гірників - 2017: матеріали міжнародної конференції (4-7.10.2017 р., м. Дніпро,). Дніпро, 2017. C. 46-50.
35. Семашкин К. В. Практика инженерно-геологического обследования подтопленной дорожной насыпи методом георадиолокации. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. *Серия:* *Строительство и архитектура*. Волгоград, 2013. Вып. 30 (49). С. 320-327. URL: <http://vgasu.ru/attachments/30_49-03-2013.pdf> (дата звернення: 26.02.2019)
36. Греховодов А. А. Практика применения георадара при обследовании земляного полотна. *Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов  ОАО Гипродорнии*. 2012. N. 3. С. 34-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18068529> (дата звернення: 26.02.2019)
37. Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н., Шеремет Р. Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов. *Инженерный вестник Дона.* Ростов-на-Дону, 2016. N 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3724> (дата звернення: 26.02.2019).
38. Лаломов Д. А., Артюгин А. И. Особенности совместной обработки и интерпретации  данных электротомографии и георадиолокации в условиях влияния техногенных помех на объектах транспортного строительства. *Георесурсы*. Казань, 2014. N 3 (58). С. 37-40. URL: <http://dx.doi.org/10.18599/grs.58.3.7> (дата звернення: 26.02.2019).
39. Шаповалов В. Л., Явна В. А., Окост М. В., Хакиев З. Б., Морозов А. В. Подходы к определению плотности грунтов земляного полотна георадиолокационным методом при его строительстве. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения.* Ростов-на-Дону, 2018. N 1. С. 100-110.
40. Аузин А. А., Зацепин С. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости *геологической* среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации). *Вестник  Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. Воронеж, 2015. N 4. С. 122-127. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/content/heologia/2015/04/toc_ru.asp> (дата звернення: 26.02.2019).
41. Талалов А. Д., Даев Д. С. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород. *Физика Земли*. Москва, 1996. N 8. С. 56-66.
42. Изюмов С. В., Дручинин С. В. Использование георадаров серии «ТР-ГЕО» в  инженерной геофизике и строительстве. *Техника и технология: подземное пространство мира.* Санкт-Петербург, 2005. N 6. С. 14-21. URL: <http://www.trgeo.ru/article_wus_6N_05_rus.htm> (дата звернення: 26.02.2019).
43. Maślakowski Maciej, Zbiciak Artur, Józefiak Kazimierz, Piotrowski Tomasz. Diagnostyka stanu podłoża i podtorza kolejowego metodą georadarową (GPR). *Technika Transportu Szynowego.* 2015. Vol. 22. P. 1045-1048.
44. Явна В. А., Шаповалов В. Л., Морозов А. В., Ермолов К. М. Определение засоренности балластного материала железнодорожного пути методом георадиолокации.  *Инженерные изыскания*. Москва, 2015. N 10-11. С. 60-65. URL: <http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-10-112015/> (дата звернення: 26.02.2019).
45. Жуков О. Х., Дмитриевцев Д. В. Применение георадара для изучения состояния земляного полотна. *Путь и путевое хозяйство*. Москва, 2011. N. 12. С. 27-29.
46. Лучко Й. Й., Кравець І. Б. Застосування георадіолокаційного методу на залізницях України. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2018. Вип. 71. С. 169-175. URL: <http://odaba.edu.ua/library/periodicals/professional-editions/bulletin-of-the-odaba/issue-archive> (дата звернення: 26.02.2019).

**REFERENCES**

1. Wait J. R. Electromagnetic Waves in Stratified Media. *Macmillian*. New York, 1962. Ch. 2. 515 p. [in English].
2. Brehovskih L. M. Volnyi v sloistyih sredah (Waves in layered media.). Moscow, 1973. 344 p. [in Russian].
3. Finkelshteyn M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. Primenenie radiolokatsionnogo podpoverhnostnogo zondirovaniya v injenernoy geologii (The use of radiolocation subsurface sensing in engineering geology). Moscow, 1986. 128 p. [in Russian].
4. Cook J. C. Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks. Geophysics. United States, 1975. Vol. 40. N 5. P. 865-885. URL: <https://doi.org/10.1190/1.1440573> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
5. Lambert T. Dolphin, Robert L. Bollen, and George N. Oetzel. An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics.* United States, 1974. Vol. 39. N 1. P. 49-55. URL:  <https://doi.org/10.1190/1.1440411> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
6. Annan A. P., Davis J. L. Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Science*. 1976. Vol. 11. Issue 4. P. 383-394. URL: <https://doi.org/10.1029/RS011i004p00383> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
7. Vladov M. L. Vvedenie v georadiolokatsiyu (Introduction to georadiolocation). Moscow, 2004. 153 p. [in Russian].
8. Finkelshteyn M. I., Kutev V. A., Metelkin V. N. Podpoverhnostnaya radiolokatsiya (Subsurface radiolocation). Moscow, 1994. 216 p. [in Russian].
9. Starovoytov A. V. Interpretatsiya georadiolokatsionnyih dannyih (Interpretation of to georadiolocation data). Moscow, 2008. 192 p. [in Russian].
10. Grinev A. Yu. Voprosyi podpoverhnostnoy radiolokatsii (Issues of subsurface radiolocation). Moscow, 2005. 416 p. [in Russian].
11. Izyumov S. V., Druchinin S. V., Voznesenskiy A. S. Teoriya i metodyi georadiolokatsii (Theory and methods of georadiolocation). Moscow, 2008. 196 p. [in Russian].
12. Finkelshteyn M. I., Mendelson V. A., Kutev V. A. Radiolokatsiya sloistyih zemnyih pokrovov (Radiolocation of layered earth covers). Moscow, 1977. 176 p. [in Russian].
13. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. Institution of Electrical Engineers. London, 2009. 734 p. [in English].
14. Jol H. M. Ground penetrating radar: theory and applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2008. 508 p. [in English].
15. Petrenko V. D., Harlan V. I., Kosyak V. N., Kovalevich V. V. Primenenie georadiolokatsionnogo metoda pri issledovanii defektov vyisokih nasyipey jeleznodorojnogo zemlyanogo polotna (The use of georadiolocation method in the study of defects in high embankments of railway subgrade). Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie (Construction, materials science, engineering). Dnepropetrovsk, 2011. Vol. 61. P. 312-316. [in Russian].
16. Petrenko V. D., Kovalevych V. V. The results of the defect places investigation of Donetsk railway road bed by ground penetrating radar complex. *Nauka ta progres transportu*. Dnipropetrovsk, 2014. N 5 (53). P. 83-91. URL: <https://studfiles.net/preview/8163899/> (Last accessed: 26.02.2019) [in English]
17. Batrakova A. Gh. Procjuk V. O. Determination of moisture content of the soil subgrade  with the use of field GPR. *Avtomobìlʹnì dorogi ì dorožnê budìvnictvo*. Kyiv, 2017. 100. P. 48-56. URL:  <http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/048-056.pdf> (Last accessed: 26.02.2019) [in Ukrainian].
18. Benedetto A, Pajewski L.  Civil engineering applications of ground penetrating radar.  Springer: Transactions in Civil and Environmental Engineering. 2015. 371 p. URL:  <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0> (Last accessed: 26.02.2019).
19. Bondar K., Bobrovskyi T., Tsiupa І. Efficiency of gpr survey for archaeological targets  detection in the national conservation area of “St. Sophia of Kyiv”. *Geoìnformatika* Kyiv, 2016.  N 4(60). P. 75-82. URL: <http://www.geology.com.ua/UK/geoinformatika-2016-460-75-82/> (Last  accessed: 26.02.2019) [in Ukrainian].
20. Bobrov N. Yu., Krylov S. S., Kiselev E. Yu., Priakhina G. V., Fedorova, I. V. Application of georadiolocation in hydrology. *Zapiski Gornogo instituta*. St. Petersburg, 2009. Vol. 183. P. 219-223. URL: <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/1884/1959> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
21. John J. Schultz, Mary E. Collins, Anthony B. Falsetti. Sequential Monitoring of Burials Containing Small Pig Cadavers Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Forensic Sciences*. United States, 2006. Vol. 53. Issue 3. p. 607-616. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00129.x> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
22. Ashpiz E. S. Monitoring zemlyanogo polotna pri ekspluatatsii jeleznyih dorog (Monitoring subgrade during the operation of railways): monograph. Moscow, 2002. 112 p. [in Russian].
23. Konshin G. G. Metody i sredstva diagnostiki zemlyanogo polotna (Methods and tools for the diagnosis of earthen cloth instruments). Moscow, 2004. 213 p. [in Russian].
24. Fomenko N. Ye., Gaponov D. A., Kapustin V. V., Popov V. V., Fomenko L. N. Vozmozhnosti georadarnogo metoda pri obsledovanii podpornykh sten i ograzhdayushchikh konstruktsiy. *Izvestiâ Tomskogo politehničeskogo universiteta. Inžiniring georesursov*. Tomsk, 2017 Vol. 328. N 3. P. 37-45. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (Last accessed: 26.02.2019) [inRussian].
25. Kazarin O., Kazarin B., Husiev D., Pastushkov H., Pastushkov V., Zhykharev D. The  practice of using GPR technology in the examination tunnel**.***Nauka ta progres transportu**(Science  and  Transport Progress)*. Dnipropetrovsk, 2008. Vol. 21**.** P. 113-116. URL:  <http://stp.diit.edu.ua/article/view/16294/15006> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
26. Nabatov V. V., Gaysin R. M., Voznesenskiy A. S. Geo radar data-based assessment of ground–and-lining contact surface quality in underground railway tunnels. *Gornyj informacionno-analitičeskij bûlletenʹ*. Moscow, 2013. Vol. 9. P. 157-163. URL: <http://www.giab-online.ru/catalog/10794> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
27. Benedetto A, Manacorda G, Simi A, Tosti F. Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2012. Vol. 27. Ussue 3. P. 239-251. URL: <https://doi.org/10.1080/10589759.2012.694883> (Last accessed: 26.02.2019) [inEnglish].
28. Alani A. M., Aboutalebi M., Kilic G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics.* 2013. Vol. 97. P. 45-54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.009> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
29. Su J., Zhang W, Xiang H, Guo X. Application and Analysis of Ground Penetrating Radar in Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Airport Runway. *Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 153. 2: 032011. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/3/032011> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
30. Masalov S. O., Pochanin Gh. P., Ruban V. P., Kholod P. V. Radiolokacijnyj monitoring htekhnichnogho stanu pidpoverkhnevoji chastyny inzhenernykh sporud. Tehničeskaâ diagnostika i  nerazrušaûŝij kontrolʹ (*Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing).* Kyiv, 2016. Vol. 1. P. 17-23. [in Ukrainian].
31. Fomenko N. Ye., Gaponov D. A., Kapustin V. V., Popov V. V., Fomenko L. N. Vozmojnosti georadarnogo metoda pri obsledovanii podpornyih sten i ograjdayuschih konstruktsiy (Possibilities of the georadar method when examining retaining walls and enclosing structures). Izvestiâ Tomskogo politehničeskogo universiteta. Inžiniring georesursov. Tomsk, 2017. T. 328. N 3. P. 37-45. <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
32. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource  evaluations. *Journal of Applied Geophysics*. 2012. Vol. 81. P. 29-37. URL:  <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.020> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
33. Peter Hatherly. Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology.* 2013. Vol. 114. P. 74-84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.02.006> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
34. Medjanyk V. Ju., Dovbnich M. M., Jankin D. V. Monitoringh struktur masyviv ghirsjkykh  porid iz zastosuvannjam gheoradariv novogho tekhnichnogho rivnja pry pidzemnij rozrobci  ghazovughiljnykh rodovyshh (Monitoring of structures of rock masses with the use of new technical level radar radars in the underground development of coal fields). Forum hirnykiv (Miners'  Forum) - 2017: a collection of International Conference (4-7 October 2017, Dnipro, Ukrainian). Dnipro, 2017. P. 46-50 [in Ukrainian].
35. Semashkin K. V. Praktika injenerno-geologicheskogo obsledovaniya podtoplennoy dorojnoy nasyipi metodom georadiolokatsii (Practice of engineering-geological survey of submerged road embankment by the method of georadiolocation). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitelʹnogo universiteta. Seriâ: Stroitelʹstvo i arhitektura*. Volgograd, 2013. Is. 30 (49). P. 320-327. URL: <http://vgasu.ru/attachments/30_49-03-2013.pdf> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
36. Grehovodov A. A. Praktika primeneniya georadara pri obsledovanii zemlyanogo  polotna  (Practice of use of a georadar at survey of a ground cloth). *Aktualʹnye  voprosy  proektirovani avtomobilʹnyh dorog.*Yekaterinburg, 2012. N. 3. P. 34-41. URL:  <https://elibrary.ru/item.asp?id=18068529> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
37. Gaponov D. A., Fomenko L. N., SHeremet R. D. Primenenie georadara dlya kontrolya  kachestva *zakrepleniya* gruntov (The use of georadar to control the quality of soil  consolidation).  *Inženernyj vestnik Dona.* Rostov-on-Don, 2016. N 3. URL:  <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3724> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
38. Lalomov D. A., Artiugin A. I. Combined data processing and interpretation of electrical resistivity tomography and ground penetrating radar (GPR) under the influence of anthropogenic interference on the facilities of transport construction. *Georesursy.* Kazan, 2014. N 3 (58). P. 37-40. URL: <http://dx.doi.org/10.18599/grs.58.3.7> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
39. Shapovalov V. L., Yavna V. A., Okost M. V., Khakiev Z. B., Morozov A. V. Approaches to determination of the density of soils by gpr method during its construction. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobŝeniâ*. Rostov-on-Don, 2018. N 1. P. 100-110 [in Russian].
40. Auzin A. A., Zatsepin S. A. About the dispersion of dielectric permeability of the geological environment (in connection with interpretation of gpr materials). *Vestnik Voronežskogo  gosudarstvennogo universiteta. Geologiâ.* Voronezh, 2015. N 4. P. 122-127. URL:  <http://www.vestnik.vsu.ru/content/heologia/2015/04/toc_ru.asp> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
41. Talalov A. D., Daev D. S. O strukturnom mekhanizme chastotnoy dispersii elektricheskikh *svoystv* *geterogennykh* gornykh porod (On the structural mechanism of the frequency dispersion of the electrical properties of heterogeneous rocks). *Fizika zemli.* Moscow, 1996. N 8. P. 56-66 [in Russian].
42. Izumov S. V., Drouchinin S. V. Implementation of TR-GEO tipe georadars in engineering  geophysics and in construction. *Tehnika i tehnologiya: podzemnoe prostranstvo mira (Technique and technology: world underground spase)*. St. Petersburg, 2005. N 6. P. 14-21. URL: <http://www.trgeo.ru/article_wus_6N_05_rus.htm> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
43. Maślakowski Maciej, Zbiciak Artur, Józefiak Kazimierz, Piotrowski Tomasz. Examination of railway subgrade conditions using ground penetrating radar. *Technika Transportu Szynowego.* 2015. Vol. 22. P. 1045-1048. [in Polish].
44. Yavna V. A., Shapovalov V. L., Morozov A. V., Ermolov K. M. Determination of cloggion of railway ballast material by ground penetrating radar. *Inženernye izyskaniâ.* Moscow, 2015. N 10-11. P. 60-65. URL: <http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-10-112015/> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian]
45. Zhukov O. Kh., Dmitrievtsev D. V. Primenenie georadara dlya izucheniya sostoyaniya zemlyanogo polotna (The use of GPR to study the condition of the subgrade). Putʹ i putevoe hozâjstvo (*Railway Track and Facilities).* Moscow, 2011. N 12. P. 27-29 [in Russian].
46. Luchko J. J., Kravets I. B. Application of the ground penetrating radar method for the ukrainian railways. *Vìsnik* Odesʹkoï *deržavnoï akademìï budìvnictva ta arhìtekturi* *(Bulletin of the  Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)*. Odesa, 2018. Vol. 71. P. 169-175. URL:  <http://odaba.edu.ua/library/periodicals/professional-editions/bulletin-of-the-odaba/issue-archive> (Last accessed: 26.02.2019) [in Ukrainian].

*1***Vitalii Kovalchuk**, *Ph.D*, [*https://orcid.org/0000-0003-4350-1756*](https://orcid.org/0000-0003-4350-1756)

*2* **Ivan Kravets**, [*https://orcid.org/0000-0002-2239-849X*](https://orcid.org/0000-0002-2239-849X)

*3***Josef Luchko**, *D.Sc., Professor,* [*https://orcid.org/0000-0002-3675-0503*](https://orcid.org/0000-0002-3675-0503)

*1Lviv branch Dniprovsky National University of Railway Transport named after Academican V. Lazaryan, Lviv, Ukraine*

*2Dniprovsky National University of Railway Transport named after Academican V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine*

*3Lviv National Agrarian University, Dubliany, Ukraine*

**GPR method AS A NON-Destructive METHOD for SUBGRADE MONITORING**

***Abstract***

Introduction. The introduction briefly describes the main factors influenced the subgrades of railways and roads which cause the formation and distribution of various defects and strains. A brief description of the GPR method is provided, the general principle of the Ground-penetrating radar (GPR) operation is described.

Problem Statement. The use of destructive methods of subgrade monitoring doesn’t allow detecting the formation of defects in the subgrade on early stages which in the future leads to emergencies and increases costs for current maintenance. At the same time, the use of non-destructive methods is complicated due to the insignificant experience of their application. One of such non-destructive methods is GPR method.

Purpose. The purpose of the work is to review and analyze existing research related to the GPR method as one of the prospective non-destructive methods for subgrade diagnostics.

Materials and methods. The methods of analysis and synthesis are used in the study of existing experience of the use of GPR researches which are presented in the literature.

Results. On the basis of the research analysis of the use of GPR method, it was determined the historical development and the physical nature of the indicated method. The features of wave’s distribution in rocks taking into account their characteristics were given. The main dependencies and assumptions used during surveys (researches) of various facilities and objects by GPR method were considered. The results of surveys using GPR method were described and analyzed. The possibility of quality control of performed work and comparison with design decisions is shown.

Conclusions. Analysis of the world and national experience of the use of GPR method shows, firstly, that GPR can be effectively used for general survey of extended sections of subgrades. Their main advantages are efficiency of work performance and low laboriousness. Secondly, the use of GPR method, in particular during the study of railway haul is an effective tool for detecting various types of defects in the subgrades and timely eliminating the identified disadvantages.

У зв’язку з цим актуальною науково-технічною задачею є проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо георадіолокаційного моніторингу і оцінки технічного стану земляного полотна.

Due to this, the actual scientific and technical task is carrying out the research and developing recommendations for GPR monitoring and evaluation of subgrades technical state.

***Key words:*** GPR method, monitoring, ground-penetrating radar (GPR), subgrades, electromagnetic wave.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.7/.8

## *1*Семененко В. С.*,* [*https://orcid.org/0000-0002-9549-8264*](https://orcid.org/0000-0002-9549-8264)

## *2*Смірнова Н. В., *д-р техн. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0001-8458-1954*](https://orcid.org/0000-0001-8458-1954)

*1ТОВ «БК «Фортіс Груп», м. Харків, Україна*

*2Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна*

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УКОЧУВАНОГО НАДЖОРСТКОГО ЦЕМЕНТОБЕТОНУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

***Анотація***

Вступ. Встановлено, що зростання вартості бітуму та збільшення навантаження на конструкцію дорожнього одягу спонукає, використання цементобетону для дорожніх покриттів. Аналіз проектів будівництва, реконструкції та капітального ремонту автомобільних доріг загального користування показав, що збільшується кількість проектів з використанням як цементобетонних покриттів, так і конструкцій дорожнього одягу з використанням цементобетонних шарів.

Проблематика. Пошук технологічних та економічних рішень влаштування шарів покриття автомобільних доріг потребує вивчення досвіду застосування нетрадиційних для України технологій, у даному випадку –укочуваного наджорсткого цементобетону. Кожна нетрадиційна та «нова» для України технологія потребує її додаткового вивчення при застосуванні в місцевих умовах. Це і дослідження впливу на довговічність обладнання та механізмів для влаштування покриттів, дослідження місцевих матеріалів, дослідження умов експлуатації тощо.

Мета. Метою дослідження є контент-аналіз світового досвіду досліджень технологій і можливостей використання укочуваного цементобетону в галузях промислового та цивільного будівництва, а також постановка завдань аналогічного застосування матеріалів і технологій в умовах України.

Матеріали та методи. Виконано аналіз публікацій щодо досвіду використання укочуваного цементобетону в різних галузях промислового та цивільного будівництва.

Результати. З’ясовано, що дороги з цементобетону спроможні сприймати навантаження від великовагового транспорту без утворення колійності та руйнування. Проведений аналіз показав, що технологія укочуваного наджорсткого цементобетону дозволяє виконати влаштування цементобетонного покриття з високими експлуатаційними характеристиками із застосуванням асфальтоукладальників і котків та можливістю відкриття руху по влаштованому цементобетонному покриттю через 1-3 доби. Таким чином, у випадках потреби швидкого введення в експлуатацію дороги або майданчика для стоянки автомобілів, технологія укочуваного наджорсткого цементобетонну є найбільш ефективною. Проведений аналіз дозволив сформувати нові задачі дослідження технології укочуваного наджорсткого цементобетону для будівництва автомобільних доріг, а саме – вивчення властивостей укоченого цементобетону у конструкціях автомобільних доріг України та встановлення економічного ефекту від використання місцевих українських матеріалів.

Висновки. Огляд досліджень та досвіду використання укочуваного цементобетону підтвердив ефективність та перспективу використання цієї технології в Україні.

***Ключові слова:*** укочуваний наджорсткий цементобетон, цементобетонне покриття, великоваговий транспорт, шари дорожнього одягу з цементобетону, RCC, Roller Compacted Concrete.

**Вступ**

Збільшення кількості великовагових автомобілів, постійне збільшення навантаження на вісь стимулює застосовувати в якості покриття цементобетон. Особливо великі навантаження від транспорту відбуваються на дорогах та промислових майданчиках, в портах та під’їздах до них. Застосування бетоноукладальних комплексів потребує значних фінансових вкладень.Технологія будівництва цементобетонних доріг із застосування бетоноукладальних комплексів передбачає перекриття руху на значний час до досягнення бетоном показників міцності, достатніх для відкриття руху. Актуальність проблеми обумовлена зростаючим обсягом вантажних перевезень сільськогосподарської продукції від ланів по місцевих дорогах до елеваторів та портів, ростом інтенсивності руху, використанням сучасних вантажних автомобілів та постійним пошуком здешевлення будівництва цементобетонних покриттів. Для вирішення питання цементобетонних доріг необхідна технологія, яка дозволяє отримати цементобетонне покриття та відкрити рух транспорту на 1-3 добу, що значно перевищує цей показник для цементобетонного покриття з суміші з осадкою конуса 1-3 см (відкриття руху по ділянці через 7-14 діб), стійке до великих навантажень, атмосферних коливань, безпечне та економічне. Ця задача потребує уважного підходу для складових цементобетону, складу цементобетонної суміші та правильного застосування шару з укочуваного цементобетону при проектуванні конструкції дорожнього одягу. Такою технологією може бути технологія укочуваного наджорсткого цементобетону.

В Україні відсутній досвід використання укочуваного цементобетону, тому необхідно виконати контент-аналіз світового досвіду досліджень технологій і можливостей використання укочуваного цементобетону в галузях промислового та цивільного будівництва, а також зробити постановку завдань аналогічного застосування матеріалів і технологій в умовах України.

**Виклад основного матеріалу**

У радянські часи цементобетонна суміш, що укладається асфальтоукладальниками та укочується котками, почала масово використовуватись у 1984-1985 роках для улаштування основ  асфальтобетонних доріг. Максимальна марка цього бетону, що використовується, досягає  М150 (межа міцності на стиск у кг/см2). У той же час марка за міцністю цементобетонного покриття сучасних доріг складає М400 – М450. На даний час щебенево-пісчана суміш, що укріплена цементом, широко використовується для влаштування основ дорожніх одягів з цементобетону та асфальтобетону. Також пісний бетон застосовується для влаштування міських вулиць та доріг з подальшим перекриттям асфальтобетоном або використовується бітумомінеральна суміш. При цьому марка за міцністю не перевищує М150 [1]. Технологія пісного бетону, що укладається асфальтоукладальником, є різновидом укочуваного бетону, але тільки у тому, що використовується ті самі компоненти та приготування відбувається у бетонозмішувачі. Як верхній шар дорожнього одягу укочуваний бетон на території України не використовувався [2].

Використання укочуваного цементобетону для покриття майданчиків та доріг має свій початок ще у 1930-х роках у Швеції. У США укочуванийцементобетон вперше був застосований в аеропорту Якіма, Вашингтон на початку 1940-х. В аеропорту було споруджено злітно-посадкову смугу. Але найбільшого розвитку технологія укочуваного цементобетону набула у 1970-х у Канаді [3], на площадках для сортування деревини на лісозаготівлях. Основною вимогою було швидке влаштування покриття для проїзду лісовозів та роботи перевантажувачів. При цьому біли відсутні вимоги до швів та комфортності проїзду (рівності). У 1980-х роках Інженерний корпус армії США провів масштабні дослідження укочуваногоцементобетону на морозостійкість та витривалість у різних природних умовах. Перший великий проект – стоянка для важкої військової бронетехніки був реалізований в Форт Худ, Техас [4]. Звіти по цих випробуваннях дали «зелене світло» для використання цього цементобетону у цивільному будівництві. У 1990-ті роки промисловість почала випускати асфальтоукладальники з важкою віброплитою та котки, що дозволяють ущільнення жорстких цементобетонних сумішей. Зростаюче навантаження на покриття автомобільних доріг та майданчиків дало поштовх у пошуку покриття, стійкого до навантажень та у той же час економічного. Укочуваний цементобетон RCC (Roller Compacted Concrete) став відповіддю на це питання.

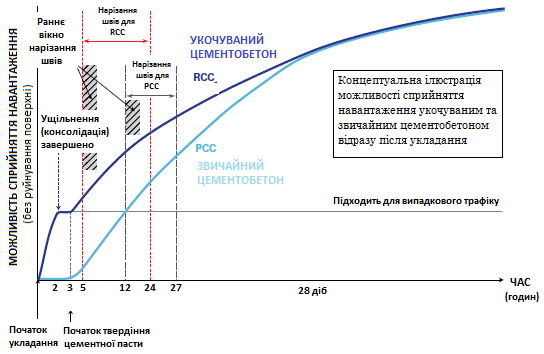
У 1990-х у США було реалізовано лише 22 проекти (418063 м2) із застосуванням укочуваного цементобетону [4]. У першому десятиріччі XXI сторіччя (2000-2010 роки) їх було вже 70 (7,4 млн. м2) [5]. Це в основному були проекти промислові, військові та портові. На початку другої декади укочуваний бетон отримав нові сфери застосування: велодоріжки, місцеві дороги та проїзди, комерційні парковки, сектор газо- та нафтовидобування. Також продовжилось використання його на промислових майданчиках. З 2011 по 2016 було вже влаштовано 8,4 млн. м2 покриттів з укочуваного цементобетону в США [6].

Щільна структура укочуваної цементобетонної суміші дозволила зменшити використання в’яжучого у складі без втрати міцносних та технологічних характеристик. Граничні вимоги до властивостей суміші дозволяють використовувати місцеві матеріали та відходи виробництв [7].

Укочуваний цементобетон, відповідно до термінології ACI (Американський Інститут Бетону, США [8]) це «бетон, що укочується котками; бетон, що у неущільненому стані витримує під час укочування, вагу катка». Особливості технології влаштування покриттів зукочуваного цементобетону базується на граничних поняттях, що відрізняються від звичайного цементобетону. Довговічність та міцність укочуваного цементобетону спирається на особливості добору складу, що потребує тільки достатньої кількості частини розчину для заповнення простору між кам’яним заповнювачем [9].

Укочуваний цементобетон є результатом пошуку спрощення існуючих технологій влаштування бетонних покриттів та доріг, пошуку методів будівництва без використання бітумовмісних матеріалів, намаганням використання місцевих матеріалів та відходів виробництва.

Технологія приготування суміші для укочуваного цементобетону дозволяє використання змішувачей великої продуктивності для забезпечення роботи асфальтоукладальників. Це дозволяє задавати великий темп укладання цементобетонної суміші, скорочуючи час на реалізацію проекту та витрати на експлуатацію обладнання. Для завдання необхідного темпу роботи асфальтоукладальника на великих об’єктах у США рекомендується використання змішувачів з продуктивністю 250 тонн/годину. Відповідно швидкість влаштування цементобетонного покриття велика. Разом із раннім набором міцності та збільшенням вікном можливості нарізання швів дає змогу пришвидшити відкриття руху транспорту по покриттю (Рисунок 1).



***Рисунок 1*** – Порівняння у часі можливості сприйняття навантаження покриттям з укочуваного та звичайного цементобетону [10]

Транспортування, укладання та ущільнення укочуваної цементобетонної суміші відбувається розповсюдженою технікою: автосамоскидами, асфальтоукладальниками, котками. Можливість транспортувати великими автосамоскидами допомагає підтримувати темп укладання. Сучасні асфальтоукладальники допомагають досягти 90 – 98 % ущільнення, надати необхідний ухил та уникнути сегрегації цементобетонної суміші (Рисунок 2). Ущільнення котками різного типу та маси надають поверхні необхідної гладкості та доущільнюють верхній шар.



***Рисунок 2*** – Влаштування покриття з укочуваного наджорсткого цементобетону з формуванням кромки

Знижений вміст цементу в укочуваному цементобетоні дає змогу збільшити відстань між деформаційними швами. [11] Коли не потрібне досягнення рівності та високого комфорту проїзду великовагового та технологічного транспорту при укладанні укочуваного цементобетону шви не влаштовуються.

Покриття з укочуваного цементобетону влаштовують найчастіше товщиною до 20 см в  один шар. При необхідності влаштування покриття більшої товщини укладання відбувається  у  2  шари. Напівсуха консистенція цементобетонної суміші дозволяє укладання послідовно двох шарів.

Типи кінцевої обробки покриття укочуваного цементобетону залежать від вимог комфортності проїзду, швидкості руху, наявної техніки та типу об’єкта. Сучасні підходи до складу суміші та сучасне обладнання дозволяє отримати якісне покриття без додаткової обробки. Для надання рівності укладеному покриттю проводяться додаткові операції. Перший варіант це фрезерування бетонної поверхні: вирівнює профіль укладеного покриття та надає необхідної шорсткості. Другий варіант це укладання додаткового бітумовмістного шару: надає рівності покриттю, працює як шар зносу. Третій варіант це обробка затиральною машиною та надання шорсткості спеціальними щітками (Рисунок 3).



***Рисунок 3 –*** Обробка покриття з укочуваного цементобетону затиральною машиною

Основними перевагами цієї технології є вартість улаштування, швидкість запуску руху транспорту, застосування місцевих матеріалів та наявного обладнання для укладання та ущільнення. Основним недоліком є рівність укладеного покриття, але світовий досвід його використання дозволяє заздалегідь передбачити усунення цього недоліку.

В результаті ми отримуємо цементобетонне покриття без армування, що витримує великі навантаження та стійке до атмосферного впливу, а також відкрите до експлуатації за кілька днів.

Фахівцями кафедри «Будівництва та експлуатації автомобільних доріг» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та «Будівельної компанії «Фортіс Груп» був розроблений нормативний документ – Технічні умови. Суміші цементобетонні і цементобетон наджорсткі укочувані [12].

Авторами було проведено лабораторні дослідження місцевих матеріалів (цементу, щебеню, піску). Зроблений добір складу укочуваного цементобетону та заформовані зразки для випробування на характеристики міцності укочуваного цементобетону.

Основними об’єктами, де застосовується укочуваний цементобетон, є автомобільні дороги, логістичні центри, порти, майданчики для стоянки великовагового транспорту, під’їзні та внутрішні дороги промислових підприємств, з’їзди та розділювальні смуги автомагістралей, комплекси заготівлі та складування та інше.

**Висновки**

1. Аналіз існуючого досвіду використання укочуваногоцементобетону довів його економічну ефективність при влаштуванні доріг та майданчиків для руху великовагового транспорту.
2. Основними перевагами використання укочуваного цементобетону є зменшений вміст цементу, відсутність армування, можливість застосування місцевих матеріалів, швидкість влаштування покриття, швидкість введення в експлуатацію, стійкість до великих навантажень та атмосферного впливу.
3. Зроблений добір складу укочуваного цементобетону та виготовлені зразки для випробування на міцністьскладають передумови застосування даної технології в Україні
4. Розроблені ТУ У 42.1-40708558/02071168-001:2019 «Суміші цементобетонні і цементобетон наджорсткі укочувані» дають можливість застосування цієї технології в Україні, а також дослідити технічні показники покриття, влаштованого за зазначеною технологією, що в подальшому дозволить розробити в Україні галузеві норми застосування сумішей цементобетонних і цементобетону наджорсткого укочуваного.

**Список літератури**

1. Технологічний регламент будівництва та ремонту міських вулиць та доріг з використанням пісного бетону (КТМ 204 України 011-95): технологічний регламент Державного комітету України по житлово-комунальному господарству. Київ, 1995. 12 с. (Інформація та документація).
2. Современное состояние и перспективы применения технологии укатываемого бетона. Обзорная Информация. Автомобильные дороги и мосты. 6-2004. Москва, 2004. 87 с.
3. Пижжо Р. Укатанный бетон дорожных покрытий в провинции Британская Колумбия (Канада): перевод с француского (под редакцией Акуловой). Москва, 1984. 21 с.
4. Pittman D. W., Anderton G. L. The Use of Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements  in the United States. Mairepav 6. (Turin, Italy, 8-10.07.2009). 2009. URL: <https://trid.trb.org/Results?q=&serial=%22Sixth%20International%20Conference%20on%20Maintenance%20and%20Rehabilitation%20of%20Pavements%20and%20Technological%20Control%20(MAIREPAV6)%22#/View/899345> (дата звернення 13.04.2019).
5. Pittman D. W., Anderton G. L. Characteristics of roller compacted concrete pavements in the United States. Seventh International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (Auckland, New Zealand, 28-30.08.2012). 2012. URL: <https://trid.trb.org/Results?q=&serial=%22Seventh%20International%20Conference%20on%20Maintenance%20and%20Rehabilitation%20of%20Pavements%20and%20Technological%20Control%22#/View/1224171> (дата звернення 13.04.2019).
6. Zollinger C. Recent advances and uses of roller compacted concrete pavements in the united states. URL: <http://www.rollconllc.com/wp-content/uploads/Recent-Advances-Uses-of-RCC-in-US.pdf> (дата звернення 13.04.2019).
7. Reporton Roller-Compacted Mass Concrete (ACI 207.5R-11). USA, 2011. 73 p. URL: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=207511&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_AND_METRIC> (дата звернення 13.04.2019).
8. American Concrete Institute. URL: <https://www.concrete.org/aboutaci.aspx> (дата звернення 01.06.2019).
9. Guide for roller-compacted concrete pavements. USA, 2010. 105 p. URL: <https://www.irmca.com/wp-content/uploads/2014/12/cp_tech_center_-_rcc_guide.pdf> (дата звернення 13.04.2019).
10. Dale Harrington, Fares Abdo, Wayne Adaska, Chetan V. Hazaree, Halil Ceylan. Guide  for  Roller Compacted Concrete Pavements. USA, 2010. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1100&context=intrans_reports> (дата звернення 13.04.2019).
11. Ebrahim. Khalilzadeh Vahidi, Maryam. Mokhtari Malekabadi. Joints in roller compacted concrete pavements. International Conference on Transport, Environment and Civil Engineering - ICTECE 2012 (Kuala Lumpur, Malaysia, 25-26.08.2012). 2012. URL: <http://psrcentre.org/images/extraimages/27%20812511.pdf> (дата звернення 13.04.2019).
12. ТУ У 42.1-40708558/02071168-001:2019 Суміші цементобетонні і цементобетон наджорсткі укочувані. Технічні умови. Харків, 2019. 17 с. (Інформація та документація).

# REFERENCES

1. Tekhnolohichnyi rehlament budivnytstva ta remontu miskykh vulyts ta dorih z vykorystanniam pisnoho betonu (KTM 204 Ukrainy 011-95) (Technological regulation of construction and repair of city streets and roads using lean concrete (KTM 204 of Ukraine 011-95)): technological regulations of the State Committee of Ukraine for Housing and Communal Services. Kyiv, 1995. 12 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. Sovremennoe sostoyanie i perspektivyi primeneniya tehnologii ukatyivaemogo betona. Obzornaya Informatsiya. Avtomobilnyie dorogi i mostyi (The current state and prospects of using roller compacted concrete technology. Overview Information. Highways and bridges). 6-2004. Moscow, 2004. 87 p. [in Russian].
3. Pijjo R. Ukatannyiy beton dorojnyih pokryitiy v provintsii Britanskaya Kolumbiya (Kanada): perevod s frantsuskogo (pod redaktsiey Akulovoy) (Roller compacted concrete paving in the province of British Columbia (Canada): translation from French (edited by Akulova)). Moscow, 1984. 21 p. [in Russian].
4. Pittman D. W., Anderton G. L. The Use of Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements  in the United States. Mairepav 6. (Turin, Italy, 8-10.07.2009). 2009. URL: <https://trid.trb.org/Results?q=&serial=%22Sixth%20International%20Conference%20on%20Maintenance%20and%20Rehabilitation%20of%20Pavements%20and%20Technological%20Control%20(MAIREPAV6)%22#/View/899345> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
5. Pittman D. W., Anderton G. L. Characteristics of roller compacted concrete pavements in the United States. Seventh International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (Auckland, New Zealand, 28-30.08.2012). 2012. URL: <https://trid.trb.org/Results?q=&serial=%22Seventh%20International%20Conference%20on%20Maintenance%20and%20Rehabilitation%20of%20Pavements%20and%20Technological%20Control%22#/View/1224171> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
6. Zollinger C. Recent advances and uses of roller compacted concrete pavements in the united states. URL: <http://www.rollconllc.com/wp-content/uploads/Recent-Advances-Uses-of-RCC-in-US.pdf> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
7. Reporton Roller-Compacted Mass Concrete (ACI 207.5R-11). USA, 2011. 73 p. URL: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=207511&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_AND_METRIC> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
8. American Concrete Institute. URL: <https://www.concrete.org/aboutaci.aspx> (Last accessed 01.06.2019) [in English].
9. Guide for roller-compacted concrete pavements. USA, 2010. 105 p. URL: <https://www.irmca.com/wp-content/uploads/2014/12/cp_tech_center_-_rcc_guide.pdf> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
10. Dale Harrington, Fares Abdo, Wayne Adaska, Chetan V. Hazaree, Halil Ceylan. Guide  for  Roller Compacted Concrete Pavements. USA, 2010. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1100&context=intrans_reports> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
11. Ebrahim. Khalilzadeh Vahidi, Maryam. Mokhtari Malekabadi. Joints in roller compacted concrete pavements. International Conference on Transport, Environment and Civil Engineering - ICTECE 2012 (Kuala Lumpur, Malaysia, 25-26.08.2012). 2012. URL: <http://psrcentre.org/images/extraimages/27%20812511.pdf> (Last accessed 13.04.2019) [in English].
12. Technical terms (TU U 42.1-40708558/02071168-001:2019). Sumishi tsementobetonni i tsementobeton nadzhorstki ukochuvani. Tekhnichni umovy (Concrete mixes and rolled compacted extrastiff concrete. Technical terms). Kharkiv, 2019. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

*1***Vyacheslav Semenenko**,[*https://orcid.org/0000-0002-9549-8264*](https://orcid.org/0000-0002-9549-8264)

*2***Nataliya Smirnova**, *D.Sc., Professor,* [*https://orcid.org/0000-0001-8458-1954*](https://orcid.org/0000-0001-8458-1954)

*1LLC «BC «Fortis Group», Kharkiv, Ukraine*

*2Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

**ROLLED EXTRA HARD CEMENT CONCRETE APPLICATION FOR ROAD CONSTRUCTION**

***Abstract***

Introduction. It was established that the increase of the bitumen cost and the load on the pavement design prompts the use of cement concrete for road pavement. Analysis of construction, reconstruction and overhaul projects of public roads has showed that the number of projects using both the cement concrete pavement and pavement designs using cement concrete layers is increased.

Problem statement. The search for technological and economic solutions for arrangement of road pavement layers requires to study the experience of using the non-traditional technologies for Ukraine, in this case – rolled extra hard cement concrete. Each non-traditional and «new» technology for Ukraine needs for further studied during application in the local conditionals. It is also a study of the impact on the durability of equipment and mechanisms for pavement arrangement, study of local materials, study of operational conditions, etc.

Purpose. The purpose of the article is content analysis of world experiences of the research of technologies and possibilities for using the rolled cement concrete in industrial and civil construction, as well as the task statement for the application of the same materials and technologies in Ukraine.

Materials and methods. Provided domestic and foreign Analysis of publications related to experience of using the rolled cement concrete in industrial and civil construction.

Results. It is established that cement concrete roads are able to take the loads from heavy good vehicles without rutting and destruction. The analysis showed that the technology of rolled extra hard cement concrete allows carrying out the arrangement of cement concrete pavement with high operational performance using the asphalt pavers and rollers and the possibility to carry out the movement on the cement concrete pavement after 1-3 days. Thus, in cases of the need for the rapid commissioning of a road or a parking, the technology of rolled extra hard cement concrete is most effective. The analysis allows forming the new tasks of research of the technology of rolled extra hard cement concrete for road construction, namely, the study of the properties of rolled cement concrete in the Ukrainian highway structures and the establishment of the economic effect of the use of local Ukrainian materials.

Conclusions. Review of the research and experience of using the rolled cement concrete has confirmed the efficiency and prospects of using this technology in Ukraine.

***Key words:*** rolled extra hard cement concrete, cement concrete pavement, high good vegicle, cement concrete pavement layers, RCC, Roller Compacted Concrete.

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК:517.912

## Карабин О. О., *канд. фіз.-мат. наук,* [*https://orcid.org/0000-0002-9287-376X*](https://orcid.org/0000-0002-9287-376X)

## Тацій Р. М., *д-р фіз.-мат. наук, професор,* [*https://orcid.org/0000-0001-8805-6305*](https://orcid.org/0000-0001-8805-6305)

## Чмир О. Ю., *канд. фіз.-мат. наук,* [*https://orcid.org/0000-0002-6340-9888*](https://orcid.org/0000-0002-6340-9888-)

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

## СХЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ КОЛИВАНЬ СТРИЖНЯ

## З ЧОТИРЬОХ КУСКІВ КУСКОВО-СТАЛОГО ПЕРЕРІЗУ

***Анотація***

Вступ. Проектування будівельних конструкцій мостів пов’язане із математичним моделюванням коливальних процесів, що виникають в таких конструкціях. Такі математичні моделі описуються диференціальними рівняннями гіперболічного типу. Методи розв’язання таких задач поділяють на прямі та наближені. Основою прямих методів є метод відокремлення змінних, метод функції Гріна, метод інтегральних перетворень.

Постановка проблеми. Проблемою в таких задачах є проблема множення узагальнених функцій. В запропонованій схемі така проблема з узагальненими функціями усувається шляхом зведення диференціального рівняння до системи диференціальних рівнянь та використання матричного числення.

Мета роботи. Одержання аналітичного вигляду розв’язку задачі поздовжніх коливань стрижня, що складається з чотирьох кусків кусково-сталого перерізу.

Методи вирішення. Запропонований метод вирішення задачі належить до прямих методів, які дозволяють отримати аналітичний вигляд розв’язку. В основу методу вирішення поставленої задачі покладено концепцію квазіпохідних, метод зведення вихідної задачі до розв’язування двох простіших, але взаємозв’язаних задач, сучасну теорію систем лінійних диференціальних рівнянь, класичний метод Фур’є та модифікований метод власних функцій. Перевагою методу є можливість розглянути задачу на кожному відрізку розбиття, а потім за допомогою матричного числення записати аналітичний вираз розв’язку. Такий підхід дозволяє застосовувати програмні засоби до процесу вирішення задачі та графічної ілюстрації розв’язку.

Результати роботи. Основним результатом роботи є аналітичний вигляд розв’язку задачі поздовжніх коливань стрижня що складається з чотирьох кусків кусково-сталого перерізу циліндричної форми та отримання необхідної кількості власних значень та власних функцій за допомогою програмного математичного пакету Maple.

Висновки. Отримані результати можуть бути використані в проектування будівельних конструкцій мостів та опор.

***Ключові слова:*** квазідиференціальне рівняння, крайова задача, матриця Коші, функція Дірака, задача на власні значення, метод Фур’є та метод власних функцій.

**Вступ**

В проектуванні будівельних конструкцій мостів обов’язковим є врахування коливних процесів, що виникають в їх опорах. Математичне моделювання коливних процесів пов’язане із розв’язуванням диференціальних рівнянь гіперболічного типу.

Методи розв’язування нестаціонарних крайових задач можна поділити на прямі, основу яких становить метод відокремлення змінних, метод джерел (метод функції Ґріна), метод інтегральних перетворень, наближені та числові методи.

Запропонована у цій роботі схема належить до прямих методів розв’язування крайових задач. В основу реалізації цієї схеми покладено концепцію квазіпохідних [1], метод зведення вихідної задачі до розв’язування двох простіших, але взаємопов’язаних задач, сучасну теорію систем лінійних диференціальних рівнянь, класичний метод Фур’є та модифікований метод власних функцій.

У роботі [2] розглянуто загальну схему дослідження поздовжніх коливань стрижнів кусково-сталого перерізу. Отримано явні формули для обчислення розв’язку та його квазіпохідної такої задачі для будь-якого підінтервалу основного проміжку, які є справедливими для довільної скінченної кількості точок розриву першого роду у функціях – коефіцієнтах задачі.

У роботі [3] розглядається гіперболічне рівняння з кусково-неперервними за просторовою змінною коефіцієнтами та правими частинами з найбільш загальними локальними крайовими умовами. Виділено випадок кусково-сталих коефіцієнтів та правих частин, коли розв’язки вихідної задачі можуть бути отримано в замкненій формі.

В цій роботі досліджуються поздовжні коливання стрижня з чотирьох кусків кусково-сталого перерізу. За допомогою методу редукції дослідження зводиться до знаходження розв’язку двох задач: стаціонарної неоднорідної крайової задачі з вихідними крайовими умовами та мішаної задачі з нульовими крайовими умовами для певного неоднорідного рівняння.

**Основні позначення, формулювання задачі та допоміжні твердження**

Нехай  – відкритий інтервал дійсної осі ,  – відрізок дійсної осі;  – довільне розбиття відрізка  дійсної осі *Ox* на дві частини.

Введемо основні позначення:

 – характеристична функція проміжку , тобто .

Нехай **, , , ** – сталі. Покладемо .

Розглянемо рівняння поздовжніх коливань стрижня

, , ,

з крайовими умовами

та початковими умовами

 ,

де , , ,  – кусково-неперервні на .

Метод редукції відшукання розв’язку задачі детально описаний, наприклад, в [4, 5]. Згідно з цим методом, розв’язок задачі - шукаємо у вигляді суми двох функцій

.

Одну з функцій, наприклад , сконструюємо спеціальним способом, тоді функцію  визначимо, використавши побудовану функцію .

**Побудова функції **

Визначимо функцію **** як розв’язок крайової задачі

,

 .

Зауважимо, що змінна  тут вважається параметром.

В основі методу розв’язування задачі , лежить концепція квазіпохідних, викладена в [6].

Визначимо квазіпохідну функції , як добуток функції  та похідної по змінній  функції , тобто . Введемо вектор . За таких позначень квазідиференціальне рівняння зводиться до еквівалентної системи диференціальних рівнянь першого порядку

.

Під розв’язком системи розуміємо абсолютно-неперервну вектор-функцію , що за змінною  справджує її майже скрізь (див. [6]).

Крайові умови запишемо у векторній формі

,

де , , .

Нехай  та  визначені на проміжку , . Покладемо

.

На проміжках ,  система відповідно набуває вигляду

.

Матриці Коші ,  таких систем відповідно матимуть вигляд

, де .

Позначимо

,

,

,

.

Структура матриць,  дає можливість встановити структуру матриць

, ,

, ,

причому , , де *I* – одинична матриця.

Розв’язки систем на проміжках  відповідно мають вигляд

,

де ,  – поки що невідомі вектори [1].

В точках  повинні виконуватись умови спряження, а саме  (див. [7]), в результаті чого одержимо рекурентне співвідношення . Тоді, використовуючи , одержуємо

, ,

де  – початковий (невідомий) вектор.

Для знаходження  використаємо крайові умови (8), в яких покладемо . Використовуючи та , визначаємо



.

Підставимо визначені таким чином  та  в крайові умови (8) в результаті чого вони набудуть вигляду , звідки одержуємо

.

Виконавши дії над матрицями, визначаємо, що

.

Підставимо у та

,

, .

На основі формул , після перетворень отримаємо вектор - функції ,  на проміжках , відповідно:





,

.

Перші координати векторів ,  в є шуканими функціями  відповідно. Підставляючи їх у , отримуємо розв’язок на всьому проміжку .

**Побудова функції** 

Запишемо мішану задачу для функції . Підставляючи в та враховуючи, що функція  задовольняє , одержуємо неоднорідне рівняння

, , .

Підставимо в початкові умови . Одержимо для функції  початкові умови

 ,

де , .

Оскільки функція  справджує крайові умови , то із випливають крайові умови для функції 

 .

Отже, за умови, що розв’язок  задачі , є відомим, функція  є розв’язком мішаної задачі - .

**Метод Фур’є та задача на власні значення**

Для рівняння розглянемо відповідне однорідне рівняння

.

з крайовими умовами (22).

Його нетривіальні розв’язки шукаємо у вигляді

,

де  – параметр,  – константа,  – невідома функція.

Підставимо в рівняння . Одержимо квазідиференціальне рівняння

,

де .

Підставимо в умови . Одержимо крайові умови



Під розв’язком рівняння розуміємо абсолютно-неперервну на  функцію , що справджує його майже скрізь [6].

Ввівши квазіпохідну , вектор  та матрицю , запишемо задачу - у матричному вигляді

,

.

Безпосередньою перевіркою переконуємось, що матриці Коші  системи відповідно на проміжках  мають вигляд .

Фундаментальна матриця (аналог матриці Коші на всьому проміжку) системи має структуру



де, аналогічно, як і в формулі , , .

Позначимо також

.

Нетривіальний розв’язок  системи шукаємо у вигляді , де  – деякий ненульовий вектор.

Вектор-функція  має задовольняти крайові умови , тобто

,

врахувавши, що  прийдемо до рівності

.

Для існування ненульового вектора  в необхідно і досить виконання умови

.

Конкретизуємо вигляд лівої частини характеристичного рівняння , врахувавши вигляд матриць *P*, *Q* та



.

Сформулюємо наступне твердження.

**Твердження 1.** *Характеристичне рівняння задачі на власні значення , має вигляд*



Як відомо (див. [8]), корені  характеристичного рівняння , які є власними значеннями задачі , , є додатними та різними.

Для знаходження ненульового вектора  підставимо в рівність  замість . Тоді прийдемо до векторної рівності

,

яка еквівалентна системі рівнянь



Оскільки виконується , то , а , наприклад, , тобто .

Нехай  – нетривіальний власний вектор, що відповідає власному значенню . Справедливим є твердження.

**Твердження 2**. *Власні вектори системи диференціальних рівнянь з крайовими умовами мають структуру*

*, .*

**Наслідок.** *Власні функції , як перші координати власних векторів , можна записати у вигляді*

*, .*

Зокрема, оскільки

,

то з та випливає, що

, .

**Побудова розв’язку  мішаної задачі -**

Для розв’язання задачі - застосуємо метод власних функцій [5], який полягає в тому, що розв’язок задачі - шукаємо у вигляді

,

де  – поки що невідомі функції.

Оскільки  входить в праву частину рівняння , то розкладеио її в ряд Фур’є за власними функціями  крайової задачі ,

.

Підставляючи вираз у та враховуючи , отримаємо рівність

.

Враховуючи, що власні функції  задовольняють рівняння , приходимо до рівності

.

Прирівнюємо коефіцієнти Фур’є

, .

Загальний розв’язок кожного з диференціальних рівнянь має вигляд

,

де ,  – невідомі сталі [9].

Позначимо . Зауважимо, що ,  [10].

Для визначення сталих ,  розвинемо в ряди Фур’є за власними функціями  праві частини початкових умов

,

,

де ,  – відповідні коефіцієнти Фур’є.

З випливає, що

,

,

звідки

.

З , першої умови в , та врахувавши , одержуємо

. Звідки, використовуючи , маємо

.

Аналогічно з , другої умови в , врахувавши , маємо

. Звідки, використовуючи , знаходимо

, або .

Отже, остаточно отримуємо розв’язок мішаної задачі - у вигляді ряду

.

Враховуючи та те, що , де  визначені відповідно на проміжках , одержуємо

,

де функції  обчислюються за формулою .

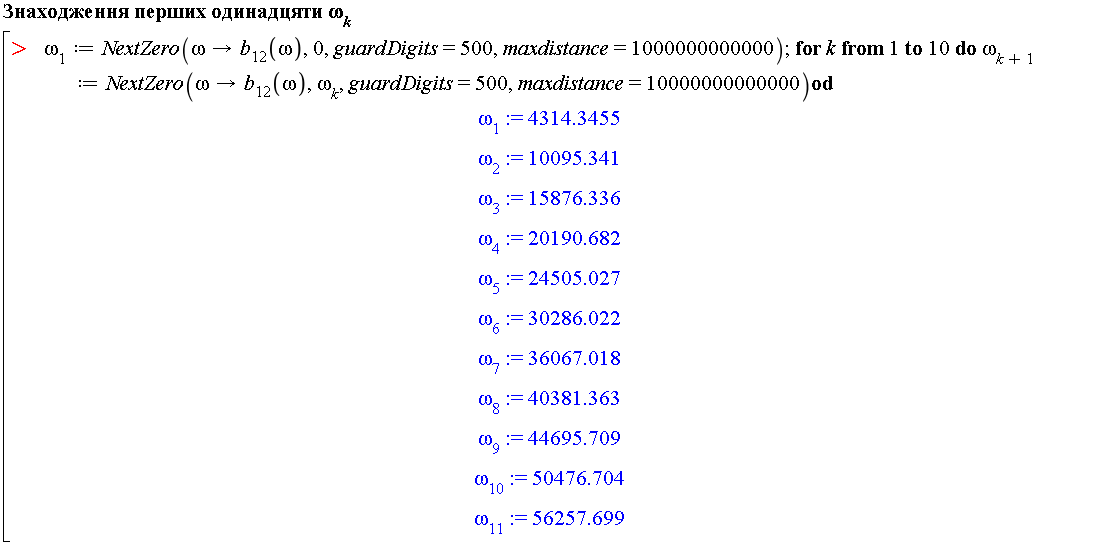
Врахувавши перші координати векторів  в та , отримаємо розв’язок задачі -

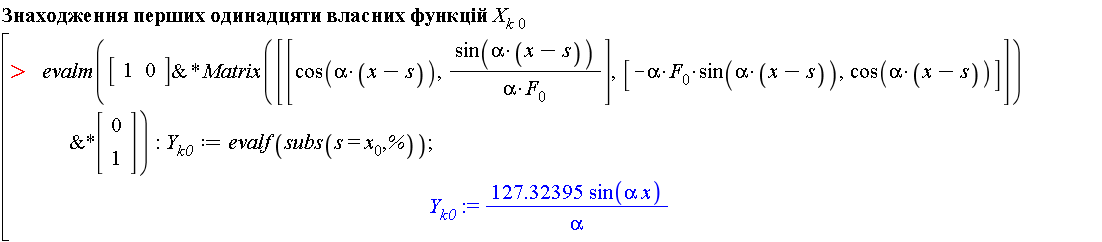
.

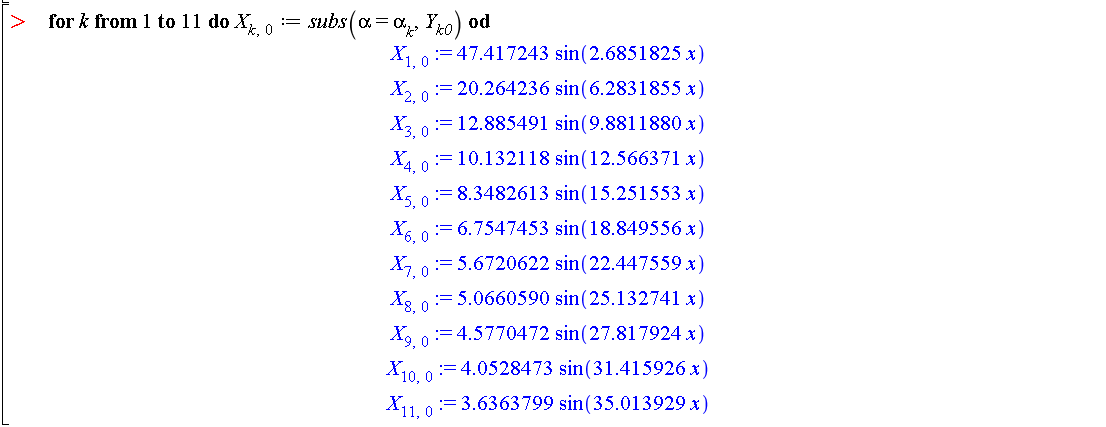
**Застосування пакета Maple до знаходження власних значень та власних**

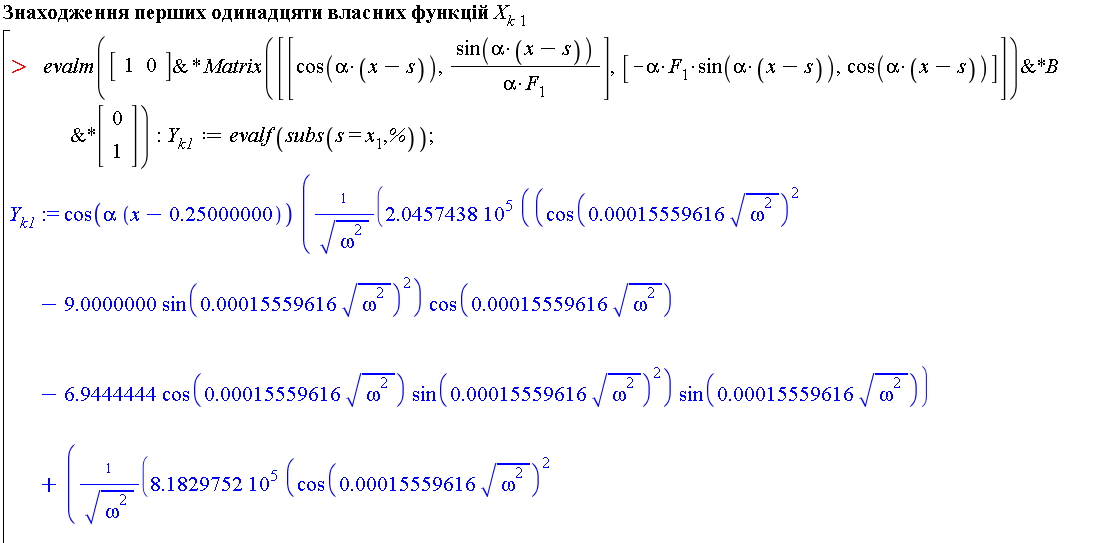
**функцій задачі -**

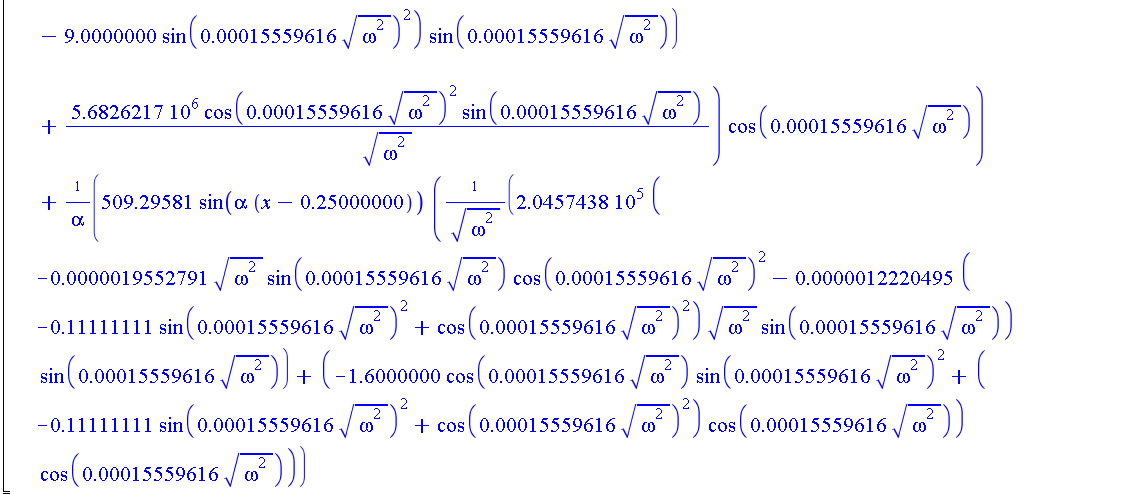
Сучасні програмні засоби дають змогу отримати необхідну кількість власних значень та власних функцій, що забезпечує відповідну точність розв’язку. Розглянемо результат застосування пакету Maple для отримання розв’язку поставленої задачі. Для прикладу розглянемо сталевий стрижень довжиною 1 м, що складається з чотирьох циліндричних кусків однакової довжини, площі поперечних перерізів яких відповідно становлять  м2, , ,  м2. За таких умов , , , , . Модуль Юнга для сталі становить *Е*=203943242590 Н/м2, густина  кг/м3. Обчислено перші одинадцять власних значень та власних функцій:

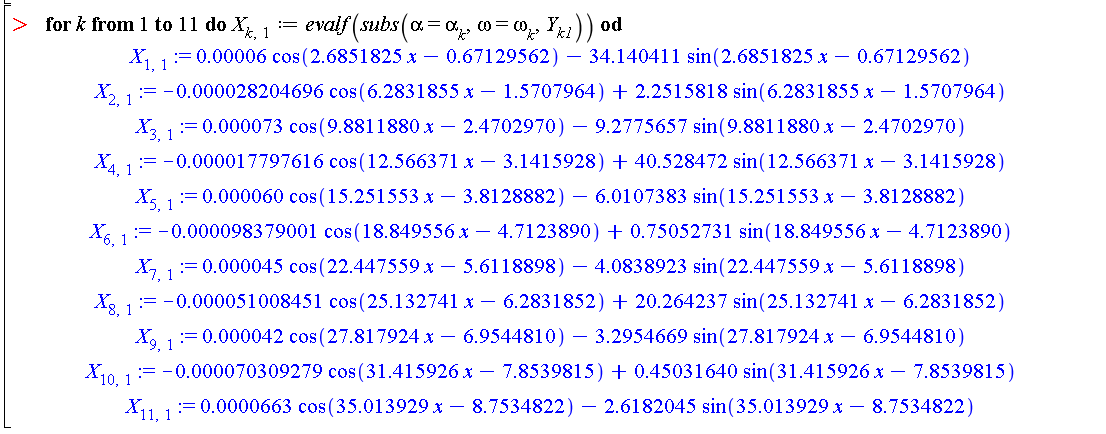


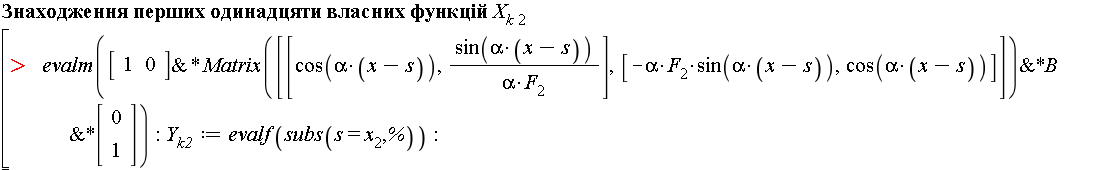


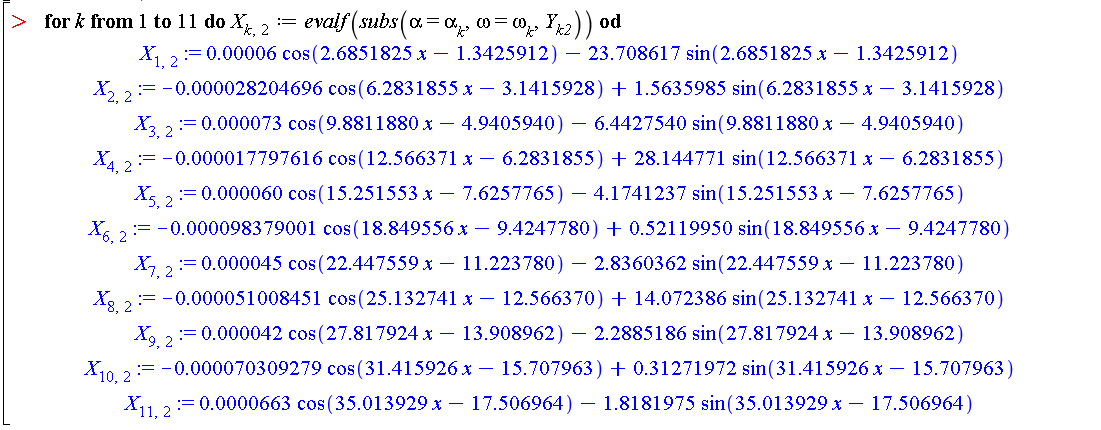


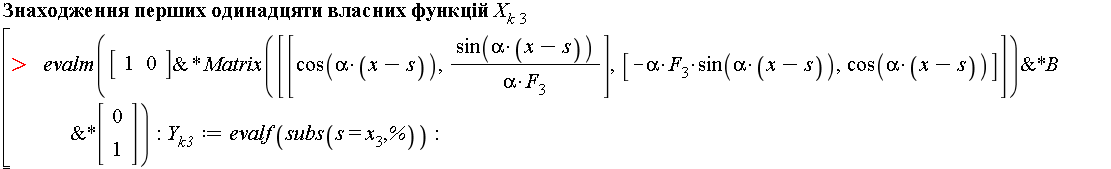












**Висновки**

Теорему про розвинення за власними функціями адаптовано для випадку диференціальних рівнянь з кусково-сталими (за просторовою змінною) коефіцієнтами.

Отримано явні формули для обчислення розв’язку та його квазіпохідної для будь-якого підінтервалу основного проміжку, які є справедливими для довільної скінченної кількості точок розриву першого роду згаданих вище коефіцієнтів.

Перевагою методу є можливість розглянути задачу на кожному відрізку розбиття, а потім за допомогою матричного числення записати аналітичний вираз розв’язку.

Такий підхід дає змогу застосовувати програмні засоби до процесу вирішення задачі та графічної ілюстрації розв’язку. Отримані результати мають безпосереднє практичне застосування в теорії коливань стрижнів з кусково-змінним розподілом параметрів.

Наведено приклад застосування пакету Maple до знаходження власних значень та власних функцій задачі коливання сталевого стрижня довжиною 1 м, що складається з чотирьох кусків однакової довжини.

**Список літератури**

1. Тацій Р. М, Власій О. О., Стасюк М. Ф. Загальна перша крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-змінними коефіцієнтами. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Фізико-математичні науки».* Львів, 2014. N 804. С. 64-69.
2. Тацій Р. М., Карабин О. О., Чмир О. Ю. Загальна схема дослідження поздовжніх коливань стрижнів кусково-сталого перерізу. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп’ютерне моделюваня» (14-19 травня 2018 р. м. Івано-Франківськ). Івано-Франківськ, 2018. С. 386-391.
3. Тацій Р. М., Чмир О. Ю., Карабин О. О. Загальні крайові задачі для гіперболічного рівняння із кусково-неперервними коефіцієнтами та правими частинами. *Дослідження в математиці і механіці*. Одеса, 2017. Том. 22. Вип. 2(30). С. 55-70. URL: <http://liber.onu.edu.ua/pdf/rmm_2017_2(30).pdf> (дата звернення: 21.03.2019).
4. Арсенин В. Я. Методы математической физики. Москва, 1974. 432 с.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Москва, 1977. 735 с.
6. Тацій Р. М., Стасюк М. Ф., Мазуренко В. В, Власій О. О. Узагальнені квазідиференціальні рівняння. Дрогобич, 2011. 297 с.
7. Власій О. О., Стасюк М. Ф., Тацій Р. М. Структура розв’язків узагальнених систем з кусково-змінними коефіцієнтами. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Фізико-математичні науки».* Львів, 2009. N 660. С. 34-38.
8. Тацій Р. М., Мазуренко В. В. Дискретно-неперервні крайові задачі для квазідиференціальних рівнянь парного порядку. *Математичні методи та фізико-механічні поля*. Львів, 2001. Том 44. N 1 С. 43-53.
9. Каленюк П. І., Рудавський Ю. К., Тацій Р. М., Клюйник І. Ф., Колісник В. М., Костробій П. П., Олексів І. Я. Диференціальні рівняння: навч. посібник. Львів, 2014. 380 с.
10. Мартыненко В. С*.* Операционное исчисление: уч. пос. Київ, 1990. 359 с.

**References**

1. Tatsij R. M., Vlasij O. O., Stasjuk M. F. Zagalna persha krayova zadacha dlya rivnyannya teploprovidnosti z kuskovo-zminnymy koefitsiyentamy. *Bulletin of the University «Lviv Polytechnic». Series «Physics and mathematics»*. Lviv, 2014. N 804. P. 64-69 [in Ukrainian].
2. Tatsij R. M., Chmyr O. Yu., Karabyn O. O. Zagalna schema doslidzhennya pozdovzhnikh kolyvan stryzhniv kuskovo-stalogo pererizu. The materials of the international scientific conference  «Information technologies and computer modelling» (14-19 may 2018, Ivano-Frankivsk) Ivano-Frankivsk, 2018. P. 386-391 [in Ukrainian].
3. Tatsij R. M., Chmyr O. Yu., Karabyn O. O. The total boundary value problems for hiperbolic equation with piecewise continuous coefficients and right parts. *Researches in mathematics and mechanics.* Odesa, 2017. Book 22. N 2(30). P. 55-70. URL: <http://liber.onu.edu.ua/pdf/rmm_2017_2(30).pdf> (Last accessed: 21.03.2019) [in Ukrainian].
4. Arsenin V. Ya. Metodyi matematicheskoy fiziki (Methods of mathematical physics). Moscow, 1974. 432 p. [in Russian].
5. Tihonov A. N., Samarskiy A. A. Uravneniya matematicheskoy fiziki (Mathematical physics equations). Moscow, 1977. 735 p. [in Russian].
6. Tatsii R. M., Stasiuk M. F., Mazurenko V. V, Vlasii O. O. Uzahalneni kvazidyferentsialni rivniannia (Generalized quasi-differential equations). Drogobych (Ukrainian), 2011. 297 p. [in Ukrainian].
7. Tatsii R. M., Mazurenko V. V. Dyskretno-neperervni kraiovi zadachi dlia kvazidyferentsialnykh rivnian parnoho poriadku (Discrete-continuous boundary value problems for quasi-differential equations of even order). *Bulletin of the University «Lviv Polytechnic». Series «Physics and mathematics»*. Lviv, 2009. N 660. P. 34-38 [in Ukrainian].
8. Tatsij R. M., Mazurenko V. V. Dyskretno-neperervni krayovi zadachi dlya kvazi-dyfererentsialykh rivnyan dovilnogo poryadku (Discrete-continuous boundary value problems for quasi-differential equations of even order). *Matematičeskie metody i fiziko-mehaničeskie polâ*. Lviv, 2001. Book 44. N 1. P. 43-53. [in Ukrainian].
9. Kaleniuk P. I., Rudavskyi Yu. K., Tatsii R. M., Kliuinyk I. F., Kolisnyk V. M., Kostrobii P. P., Oleksiv I. Ya. Dyferentsialni rivniannia (Differential equations): tutorial. Lviv, 2014. 380 p. [in Ukrainian].
10. Martyinenko V. S. Operatsionnoe ischislenie (Operational calculus): tutorial. Kyiv, 1990, 359 p. [in Russian].

**Oksana Karabyn**, *Ph.D. in Physics and Maths,* [*https://orcid.org/0000-0002-9287-376X*](https://orcid.org/0000-0002-9287-376X)

**Roman Tatsii**, *D.Sc. in Physics and Maths, Рrofessor,* [*https://orcid.org/0000-0001-8805-6305*](https://orcid.org/0000-0001-8805-6305)

**Oksana Chmyr**, *Ph.D. in Physics and Maths,* [*https://orcid.org/0000-0002-6340-9888*](https://orcid.org/0000-0002-6340-9888-)

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

**The scheme FOr investigation for longitudinal oscillations of rod of a piecewise-constant section**

Introduction. Design of bridges' constructional structures relates to the mathematical modeling of oscillatory processes that arise in such structures. Such mathematical models are described by differential equations of hyperbolic type. Methods of solving such problems are divided into direct and approximate. The basis of direct methods is the method of separating variables, the Green's method of function, the method of integral transformations.

Problem statement. An issue in these tasks is the problem of multiplying the generalized functions. In the proposed scheme, this problem with generalized functions is eliminated by reducing the differential equation to the system of differential equations and using the matrix calculation.

Purpose. The purpose of work is to obtain analytical form of solution of the problem of longitudinal vibrations of a rod consisting of four fragments of piecewise-constant section.

Methods. The proposed method of problem solving belongs to direct methods, which allow getting an analytical form of solution. The basis for solving the task includes the concept of quasi-derivatives, a modern theory of systems of linear differential equations, the classical Fourier method and a modified method of autofunctions. The advantage of this method is a possibility to examine a problem on each breakdown segment and then to combine the obtained solutions on the basis of matrix calculation. Such an approach allows the use of software tools for solving the problem.

Results. The main result of the work is analytical presentation the problem of longitudinal oscillations of the rod consisting of four parts of piecewise-stable section of cylindrical shape and obtaining the required number of its own values and its functions with the help of Software mathematical Package Maple.

Conclusion. The obtained results can be used in designing of building structures of bridges and supports.

***Key words:*** quasi-fferential equation, the boundary value problem, the Cauchy matrix, the Dirac function, the eigenvalues problem, the method of Fourier and the method of autofunctions

<https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.000>

УДК 625.7

## Міненко Є. В., [*https://orcid.org/0000-0001-8547-9089*](https://orcid.org/0000-0001-8547-9089)

## Нагребельна Л. П*.,* [*https://orcid.org/0000-0002-5615-9075*](https://orcid.org/0000-0002-5615-9075)

*Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені  М. П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), м. Київ, Україна*

## НЕДОЛІКИ В ДОРОЖНІХ УМОВАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ВИНИКНЕННЯ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНИХ ПРИГОД

***Анотація***

Вступ. Окреслено основні причини виникнення дорожньо-транспортних пригод. Представлено рейтинг країн за смертністю в дорожньо-транспортних пригодах (ДТП). Проаналізовано роботи науковців стосовно зменшення рівня аварійності та тяжкості наслідків від дорожньо-транспортних пригод.

Проблематика. Відсутність або недостатня кількість інформації про рівень аварійності, причини їх скоєння не дає можливості визначити місця їх локалізації для обґрунтованого планування заходів виявлення недоліків в дорожніх умовах.

Мета. Метою роботи є виявлення та аналіз недоліків в дорожніх умовах, які призводять до виникнення того чи іншого виду ДТП.

Матеріали й методи. При визначенні переліку недоліків, які впливають на виникнення дорожньо-транспортних пригод, було використано методи порівняння і ототожнення, та матеріали галузевої Бази даних обліку та аналізу ДТП (Road Safety Management (RSM), яка була створена в ДП«ДерждорНДІ».

Результати. Надано перелік недоліків в дорожніх умовах, які призводять до виникнення даного виду ДТП. Проведено аналіз статистичних даних щодо визначення найчастіших видів ДТП. В результаті проведеного аналізу ДТП та недоліків які впливають на їх виникнення, визначено, що ДТП виникають при цілком певних обставинах, які постійно повторюються, і кожному виду ДТП властиві одні й ті ж аварійні ситуації. Досягти зниження дорожньо-транспортних пригод та тяжкості їх наслідків можливо шляхом покращення дорожніх умов.

Висновки. Одним із пріоритетних напрямків роботи щодо зменшення кількості і тяжкості дорожньо-транспортних пригод є покращення дорожніх умов на існуючій мережі автомобільних доріг. Це можливо шляхом удосконалення організації дорожнього руху та розробки і впровадження заходів з підвищення безпеки дорожнього руху.

Для визначення впливу недоліків в дорожніх умовах необхідно використовувати статистичний аналіз даних про дорожньо-транспортні пригоди.

Для отримання позитивного результату із зменшення кількості ДТП та їх наслідків необхідно вивчати причини виникнення аварійності, визначати ділянки їх локалізації та обґрунтовано планувати заходи із ліквідації недоліків, які збільшують імовірність виникнення ДТП.

Результати щодо визначення недоліків у дорожніх умовах можуть бути впровадженно в роботі з проведення Аудиту безпеки автомобільних доріг. Це допоможе зменшити кількість конфліктних точок на автомобільних дорогах та оцінити ефективність впроваджених заходів щодо підвищення безпеки дорожнього руху.

Зазначене вище забезпечить необхідну систему у вирішенні питань безпеки дорожнього руху і створить певні гарантії ефективності розроблюваних заходів.

***Ключові слова:*** безпека дорожнього руху, дорожньо-транспортні пригоди, автомобільна дорога.

**Вступ**

Протягом останніх десятиліть у світі спостерігається стрімке збільшення кількості транспортних засобів та підвищення інтенсивності дорожнього руху, що призводить до збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод та тяжкості їх наслідків [1]. Резолюція Генеральної Асамблеї ООН 58/289 від 14.04.2004 р. «Поліпшення глобальної безпеки дорожнього руху» [2] затвердила концепцію: «Не можна досягти мобільності ціною здоров’я і життя людей». За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я [3] щорічно жертвами дорожньо-транспортних пригод (далі - ДТП) у всьому світі стають 1,2 млн. осіб, а близько 50 млн. отримують поранення або залишаються інвалідами.

Дослідницька організація [World life expectancy](http://www.worldlifeexpectancy.com/world-road-traffic-accidents-report), за даними Всесвітньої організації здоров’я, склала рейтинг країн за смертністю у ДТП (таблиця 1) [4].

***Таблиця 1***

***Кількість смертей у ДТП на 100 тисяч населення у країнах Європи станом на 2018 рік***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Країна | Кількість смертей на  100 тис. осіб. | Країна | Кількість смертей на  100 тис. осіб. |
| Швеція | 2,49 | Сербія | 6,38 |
| Великобританія | 2,58 | Болгарія | 6,40 |
| Нідерланди | 2,81 | Бельгія | 6,61 |
| Швейцарія | 2,82 | Люксенбург | 6,71 |
| Данія | 2,89 | Греція | 7,00 |
| Норвегія | 2,93 | Македонія | 7,02 |
| Іспанія | 2,94 | Словаччина | 7,30 |
| Ісландія | 3,24 | Румунія | 7,89 |
| Німеччина | 3,54 | Польща | 7,93 |
| Фінляндія | 3,73 | Хорватія | 8,22 |
| Ірландія | 4,01 | Туреччина | 8,85 |
| Італія | 4,72 | Латвія | 8,85 |
| Австралія | 4,74 | Чорногорія | 9,01 |
| Франція | 4,86 | **Україна** | **9,11** |
| Словенія | 5,75 | Молдова | 9,90 |
| Естонія | 5,94 | Білорусь | 11,16 |
| Чехія | 5,97 | Литва | 11,34 |
| Португалія | 6,11 | Албанія | 12,32 |
| Угорщина | 6,22 | Росія | 15,85 |

Україна має показники кількості смертей у ДТП на 100 тис. осіб гірші ніж у країн Європи.

Дорожньо-транспортний травматизм обходиться країнам в 518 млрд. дол. в рік, що складає в середньому від одного до двох відсотків їх валового національного продукту. Найбільший тягар несуть на собі країни з низьким і середнім рівнем доходів на душу населення. За оцінками експертів якщо найближчим часом не будуть зроблені рішучі кроки по поліпшенню ситуації на дорогах, то до 2020 р. в цих країнах кількість смертей в результаті ДТП зросте на 80%, а у 2030 році дорожньо-транспортні пригоди можуть стати однією з основних п’яти причин смертності людей у світі.

У доповіді Всесвітньої організації охорони здоров'я для Євросоюзу називаються причини виникнення дорожньо-транспортних пригод: водії нових країн - учасників ЄС схильні перевищувати швидкісний режим, ігнорувати ремені безпеки і спеціальні засоби безпеки для дітей (дитячі крісла). Ще одна причина високої смертності на дорогах - неготовність до оперативної роботи існуючих служб порятунку в умовах збільшення кількості аварій, віддаленість медичних пунктів від аварійних ділянок дороги.

У більшості країн Східної Європи, які мають прискорений розвиток автомобілізації, інфраструктура дороги, дорожні служби та медичні установи не витримують збільшеного навантаження. У Великобританії і США автомобілізація йде вже більше 40 років і розвивається разом з дорожньою інфраструктурою та системою надання медичної допомоги постраждалим в автомобільних аваріях.

Проведені дослідження щодо рівня аварійності на автомобільних дорогах України показують що в порівнянні з Європейськими країнами стан безпеки дорожнього руху в Україні є вкрай незадовільним через високий рівень смертності та дорожньо-транспортного травматизму. Відносна кількість загиблих в Україні у 7-10 разів більша, ніж у економічно-розвинених країн Європейського союзу [2, 5].

Завдання безпеки дорожнього руху в Україні полягає у забезпеченні зниження аварійності і зменшення тяжкості наслідків від дорожньо-транспортних пригод, а особливо зменшення ДТП із смертельними випадками до мінімуму. Досягти зниження рівня аварійності та тяжкості наслідків від ДТП можна завдяки детальному вивченню причин виникнення ДТП на автомобільних дорогах та вживши відповідні заходи для їх запобігання.

Саме тому встановлення недоліків в дорожніх умовах, які впливають на виникнення різних видів ДТП, дозволить розробити відповідні заходи щодо запобігання їх виникненню.

Аналіз аварійності та способи зниження ДТП запропоновано у роботах багатьох науковців. В Україні ці питання у своїх роботах висвітлювали Поліщук В. П., Єресов В. І., Лановий О. Т., Дзюба О. П., Пальчик А. М. У своїх роботах вони аналізували та надавали рекомендації стосовно зменшення рівня аварійності та тяжкості наслідків від ДТП [1, 5-8].

В роботі [8] було проведено глибокий аналіз обставин скоєння ДТП на автомобільних дорогах загального користування в Україні. Представлений аналіз показав, що в багатьох з дорожньо-транспортних пригод був присутній вплив недоліків умов руху автомобільними дорогами, що в свою чергу призводить до помилок водіїв та ускладнення керування автомобілями.

В зазначених роботах описано дослідження закономірностей зміни аварійності на автомобільних дорогах України та стверджується, що для досягнення зниження рівня аварійності доцільним є розробка програм розвитку автомобільних доріг загального користування на основі методики управління безпекою дорожнього руху в України.

Білоруський вчений Капський Д. В. у роботі [9] розглядає виникнення дорожньо-транспортних пригод як стрибкоподібний перехід від нормального процесу руху до аварій через виникнення конфліктної ситуації, коли водій приймає неправильне рішення та змінюються параметри руху.

Таким чином є вкрай важливим проаналізувати недоліки в дорожніх умовах, які сприяють виникненню різних видів ДТП та розробити заходи для зниження рівня аварійності на автомобільних дорогах України та зменшення тяжкості наслідків від ДТП, у тому числі зменшення кількості ДТП із смертельними випадками до мінімуму.

**Виклад основного матеріалу**

Для виявлення недоліків у дорожніх умовах слід знати, що дорожні умови це – сукупність геометричних параметрів, транспортно-експлуатаційних якостей дороги, дорожнього покриття, елементів обстановки і облаштування, які безпосередньо впливають на умови руху транспортних потоків. Дорожні умови постійно впливають на безпеку дорожнього руху. Характеристику видів ДТП слід використовувати як інформацію, яка допомагає встановити роль дорожніх умов у виникненні ДТП.

На сьогоднішній день існує ряд недоліків в дорожніх умовах які впливають на виникнення тих чи інших видів ДТП (таблиця 2).

***Таблиця 2***

***Недоліки в дорожніх умовах, які сприяють виникненню окремих видів ДТП***

|  |  |
| --- | --- |
| Вид ДТП | Недоліки в дорожніх умовах, які призводять до виникнення даного виду ДТП |
| Зіткнення | Невідповідність ширини проїзної частини;  невідповідність радіуса кривої в плані;  невідповідність відстані видимості нормативним вимогам для доріг даної категорії;  рівень завантаження дороги перевищує оптимальне;  відсутність розподільчої смуги або бар’єрного огородження на розподільчій смузі в залежності від категорії дороги;  невідповідність типу перехрещення і примикання інтенсивності руху транспортного потоку;  відсутність перехідно-швидкісних смуг на в’їздах і з’їздах дорожніх розв’язок. |
| Наїзд на перешкоду | Близьке розташування від кромки проїзної частини дерев; неогороджені опори електричного освітлення та інших перешкод; незадовільний стан узбіччя. |
| Перекидання | Відсутність або невідповідність поперечного похилу віражу на кривих у плані нормативним вимогам щодо проектування автомобільних доріг;  радіус кривої у плані та розширення проїзної частини не відповідають нормативним вимогам для доріг даної категорії; відсутність огородження в потрібних місцях;  незадовільний стан і відсутність укріплення узбіччя;  відсутність твердого покриття на з’їздах. |
| Наїзд на пішохода | Відсутність облаштованих пішохідних переходів в необхідних місцях;  відсутність чи незадовільний стан тротуарів і пішохідних доріжок в населених пунктах;  невідповідність відстані видимості нормативним вимогам для доріг даної категорії;  відсутність в необхідних місцях автобусних зупинок;  відсутність освітлення в населених пунктах;  незадовільний стан узбіч. |
| Наїзд на транспортний засіб, що стоїть | Недостатня ширина узбіччя;  недостатня ширина зупинкового майданчика;  невідповідність відстані видимості нормативним вимогам для доріг даної категорії;  відсутність стоянок біля об’єктів сервісу. |

Перелік недоліків визначено шляхом порівняння показників експлуатаційного стану дороги з нормативними вимогами. Основні вимоги до доріг, їх технічного стану, рівня утримання і облаштування регламентовано рядом нормативних документів. Зокрема це державні будівельні норми ДБН В.2.3-4-2015 «Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво» [10], ДБН В.2.3-5-2018 «Вулиці та дороги населених пунктів» [11] та інші.

При виявленні конкретних недоліків слід розробляти відповідні заходи з безпеки дорожнього руху для їх ліквідації. Правильно запропоновані заходи з покращення дорожніх умов є дуже ефективними з точки зору безпеки руху [12].

За даними Галузевої бази даних обліку та аналізу ДТП (Road Safety Management) авторами було проведено аналіз статистичних даних для визначення найчастіших видів ДТП.

Проведений аналіз свідчить, що до найчастіших видів ДТП відносяться зіткнення, наїзд на перешкоду, перекидання, наїзд на пішохода (рисунок 1).

***Рисунок 1*** – Розподіл ДТП за видами пригод на автомобільних дорогах державного значення за 2018 рік

Зіткнення

Основними причинами зіткнень транспортних засобів є порушення правил при обгоні або об'їзді транспортних засобів, виїзд на зустрічну смугу дороги при русі в крайньому лівому ряду, самовпевненість водіїв, відсутність на ділянках доріг осьової лінії, орієнтуючись за якою, водій не виїжджає на смугу зустрічного руху.

Окрім дотримання правил дорожнього руху при обгоні, необхідними умовами забезпечення безпеки руху є оцінка швидкості та відстані до автомобіля, що наближається з протилежного напряму, вибір правильного інтервалу між автомобілем, що обганяє, і автомобілем, що йде на обгін, оглядовість ділянки дороги.

Наїзд на перешкоду

До основних причин наїзду на перешкоду відносяться неогороджені опори електричного освітлення, неправильна організація дорожнього руху в місцях виконання дорожніх робіт, наявність на проїзній частині сторонніх предметів та близьке розташування дерев від кромки проїзної частини.

Перекидання

Переважна більшість цих пригод виникє через неправильні прийоми водіння автомобіля, а саме: рух на ухилах з вимкненою коробкою передач, виїзд на слизьке узбіччя, застосування гальмування при слизькості дорожнього покриття, різке маневрування і т.д.

Забруднена або обмерзла проїзна частина – аварійні умови для руху транспортних засобів. Багато водіїв неправильно вибирає швидкість руху при русі на слизькій проїзній частині.

Водії недооцінюють той факт, що дорожній пил на початку дощу створює на дорозі плівку, яка значно знижує зчеплення колеса з покриттям дороги. Тому при різкому гальмуванні або різкому маневрі автомобіль втрачає стійкість, збільшуючи його гальмівний шлях.

Наїзд на пішохода

До причин наїзду на пішохода відноситься неправильна організація дорожнього руху на пішохідному переході, або коли пішохід переходить дорогу у недозволеному місці. Значна частка ДТП відбулася, коли пішоходи переходять вулицю або дорогу поза межами пішохідного переходу. Нехтуючи правилами дорожнього руху, пішохід потрапляє в зону ризику.

Для збереження життя пішоходів необхідно влаштовувати пішохідні переходи, тротуари, пішохідні доріжки, автобусні зупинки відповідно до нормативних документів, а також слід приділяти увагу освітленню населених пунктів.

Спостереження за поведінкою пішоходів – одне з основних завдань водія. Найбільшу увагу водіям потрібно звертати на пішоходів, які знаходяться з правого боку по ходу руху автомобіля. Досить часто причинами наїздів на пішоходів є неуважність водіїв при об’їзді пішоходів, які стоять, або йдуть в попутному напрямі. Фахівцями відділу безпеки дорожнього рух ДП "ДерждорНДІ" було доведено, що значна частина ДТП з наїздом на пішохода відбулася коли пішохід рухався у попутному напрямку.

У багатьох випадках водії вважають, що безпека руху пішоходів буде забезпечена самими пішоходами. На жаль, це типова помилка водія.

Особливої обережності потрібно дотримуватися при появі дітей у полі зору водія. Якщо діти вже знаходяться на проїзній частині, водій зобов'язаний зупинитися і пропустити їх у потрібному напрямі. В окремих ситуаціях неуважного пішохода заздалегідь необхідно попередити звуковим сигналом і, якщо він на нього не реагує, понизити швидкість руху і збільшити боковий інтервал між автомобілем та пішоходом з тим, щоб при необачних діях пішохода можна було б запобігти наїзду.

Наїзд на транспортний засіб, що стоїть

Переважна більшість цих пригод виникє через недостатню ширину узбіччя, відсутність зупиночного майданчика та стоянки біля об’єктів сервісу. Ще однією з причин є автобусна зупинка біля примикання з відсутністю перехідно-швидкісної смуги. В таких випадках пасажирські транспортні засоби, що стоять на зупинці, постійно створюють аварійну ситуацію для інших транспортних засобів, закриваючи оглядовість.

Наїзд на велосипедиста

Основними причинами наїзду на велосипедиста є відсутність безпечних та комфортних умов для велосипедного руху, відсутність велосипедних доріжок.

Оскільки, велосипедисти їздять не тільки у великих містах, обласних центрах, а й у невеликих містах та містечках, а також у селах і селищах, то для них також потрібно створювати відповідні умови. У зв’язку з цим дуже важливо знати, які дорожні умови були на місці скоєння ДТП, і яким чином вони могли вплинути на виникнення аварійних ситуацій.

Отже, йдеться не тільки про будівництво велодоріжок та влаштування для велосипедистів виділених смуг на дорогах загального користування, а про значно ширше коло питань, які потребують дослідження і вирішення. До цих питань відноситься технічний стан велосипеда, одяг велосипедистів, засоби першої медичної допомоги та іншє.

Проаналізувавши найчастіші види ДТП, причини їх виникнення та недоліки в дорожніх умовах, що впливають на їх виникнення, автори стверджують, що забезпечити зниження кількості дорожньо-транспортних пригод та тяжкості їх наслідків можливо шляхом:

* покращення поведінки та дисципліни учасників дорожнього руху;
* покращення технічних характеристик транспортних засобів;
* покращення дорожніх умов;
* контролю за знанням правил дорожнього руху;
* зміни системи підготовки водіїв;
* зміни відповідних навчальних програм.

**Висновки**

1. Одним із пріоритетних напрямків роботи щодо зменшення кількості і тяжкості дорожньо-транспортних пригод є покращення дорожніх умов на існуючій мережі автомобільних доріг. Це можливо шляхом удосконалення організації дорожнього руху та розробки і впровадження заходів з підвищення безпеки дорожнього руху.
2. Для визначення впливу недоліків в дорожніх умовах необхідно використовувати статистичний аналіз даних про дорожньо-транспортні пригоди.
3. Для отримання позитивного результату із зменшення кількості ДТП та їх наслідків необхідно вивчати причини виникнення аварійності, визначати ділянки їх локалізації  та обґрунтовано планувати заходи із ліквідації недоліків, які збільшують імовірність  виникнення ДТП.
4. Результати визначення недоліків у дорожніх умовах можуть бути впровадженні у роботі з проведення Аудиту безпеки автомобільних доріг. Це допоможе зменшити кількість конфліктних точок на автомобільних дорогах та оцінити ефективність впроваджених заходів щодо підвищення безпеки дорожнього руху. Це забезпечить необхідну систему у вирішенні питань безпеки дорожнього руху і створить певні гарантії ефективності розроблюваних заходів.

**Список літератури**

1. Поліщук В. П.. Нагребельна Л. П. Аналіз факторів, що спричиняють ДТП на автомобільних дорогах загального користування та пропозиції по їх ліквідації. *Дороги і мости*. Київ, 2016. Вип. 16. С. 82-85. URL: <http://dorogimosti.org.ua/ua/analiz-faktoriv-scho-sprichinyayuty-dtp-na-avtomobilynih-dorogah-zagalynogo-koristuvannya-ta-propoziciyi-po-yih-likvidaciyi> (дата звернення: 23.02.2019).
2. Повышение безопасности дорожного движения во всем мире: Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей (ООН 58/289 від 14.04.2004). Организация Объединенных Наций. URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/58/289> (дата звернення: 23.02.2019).
3. Стратегія підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2020 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 червня 2017 року N 481-р. База  даних: Законодавство України, Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/481-2017-%D1%80/print> (дата звернення: 23.02.2019).
4. Road traffic accidents (World road traffic accident report. [World life expectancy](http://www.worldlifeexpectancy.com/world-road-traffic-accidents-report)). URL: <https://www.worldlifeexpectancy.com/world-road-traffic-accidents-report> (дата звернення: 23.02.2019).
5. Кужель В. П*.* Оцінка дальності видимості дорожніх об*'*єктів утемну пору доби  при  експертизі ДТП за допомогою нечіткої логіки*. Вестник Харьковского национального  автомобильно-дорожного университета*. Харків, 2008*.* Вип. 41. С. 91-95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/the-estimation-of-road-objects-distance-visibility-at-nighttime-during-the-traffic-accidents-review-using-fuzzy-logic> (дата звернення: 23.02.2019).
6. Гаврилов Е. В., Дмитриченко М. Ф., Доля В. К., Лановий О. Т., Линник О. Е., Поліщук В.П. Організація дорожнього руху: навч. посіб. Київ, 2006. 451 с.
7. Єресов В. І., Григор’єва О. В. Шляхи управління рухом в умовах перевантаження. Вісник *НТУ*. Київ, 2013. N 28. С. 169-176. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/28_2013/169-176.pdf> (дата звернення: 23.02.2019).
8. Поліщук В. П., Кутузов А. Є. До питання управління безпекою руху на автомобільних дорогах загального користування регіону. *Вісник НТУ*. Київ, 2013. Вип. 28. С. 380-385. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/28_2013/380-385.pdf> (дата звернення: 23.02.2019).
9. Капський Д. В. Теоретические основы прогнозирования аварийности на конфликтных объектах. *Дороги і мости*. Київ, 2008. Вип. 8. С.83-87. URL: <http://dorogimosti.org.ua/ua/vipusk-8> (дата звернення: 23.02.2019).
10. ДБН В.2.3-4-2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015. 104 с. (Інформація та документація).
11. ДБН В.2.3-5-2018 Вулиці та дороги населених пунктів Київ, 2018. 55 с. (Інформація та документація).
12. Бондар Т. В. Аналіз причин виникнення аварійності - шлях до обґрунтованого планування заходів з підвищення безпеки руху. *Автошляховик України*. Київ, 2010. N 4. С. 45-46.

**REFERENCES**

1. Volodymyr Polishchuk, Liudmyla Nagrebelna Analysis of the factorscausing accidents on public roads and proposals for their elimination. *Dorogi ì mosti*. Kyiv, 2016. 16. P. 82-85. URL:  <http://dorogimosti.org.ua/ua/analiz-faktoriv-scho-sprichinyayuty-dtp-na-avtomobilynih-dorogah-zagalynogo-koristuvannya-ta-propoziciyi-po-yih-likvidaciyi> (Last accessed: 23.02.2019) [in Ukraine].
2. Improving global road safety: Resolution adopted by the General Assembly on 14 April 2004. (58/289). United Nations. URL: <https://undocs.org/en/A/RES/58/289> (Last accessed: 23.02.2019) [in English].
3. Stratehiia pidvyshchennia rivnia bezpeky dorozhnoho rukhu v Ukraini na period do 2020 roku (Strategy for improving the level of traffic safety in Ukraine for the period up to 2020): Prescript Cabinet of Ministers of Ukraine 14.06.2017 N 481. Database: Laws of Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/481-2017-%D1%80/print> (Last accessed: 23.02.2019) [in Ukraine].
4. Road traffic accidents (World road traffic accident report. [World life expectancy](http://www.worldlifeexpectancy.com/world-road-traffic-accidents-report)). URL: <https://www.worldlifeexpectancy.com/world-road-traffic-accidents-report> (Last accessed: 23.02.2019) [in English].
5. Kuzhel V. P. Otsinka dalnosti vydymosti dorozhnikh obiektivu temnu poru doby pry ekspertyzi DTP za dopomohoiu nechitkoi lohiky (Assessment of the visibility of road objects in the  dark period of time during road accident expertice using fuzzy logic). *Vestnik Harʹkovskogo nacionalʹnogo avtomobilʹno-dorožnogo* universiteta. Kharkiv, 2008. 41. P. 91-95 URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/the-estimation-of-road-objects-distance-visibility-at-nighttime-during-the-traffic-accidents-review-using-fuzzy-logic> (Last accessed: 23.02.2019) [in Ukraine].
6. Havrylov E. V., Dmytrychenko M. F., Dolia V. K., Lanovyi O. T., Lynnyk O. E., Polishchuk V.P. Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu (Traffic organization): tutorial. Kyiv, 2006, P. 451 [in Ukraine].
7. Yeresov V. I., Grygoryeva O. V. Ways of traffic management in overload situations.  *Vìsnik*Nacìonalʹnogo *transportnogo unìversitetu*. Kyiv, 2013. N 28. P. 169-176. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/28_2013/169-176.pdf> (Last accessed: 23.02.2019) [in Ukraine].
8. Polishchuk V. P., Kutuzov A. E. To the question of traffic safety on public roads of region. *Vìsnik Nacìonal’nogo transportnogo unìversitetu*. Kyiv, 2013. N 28. P. 380-385. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/28_2013/380-385.pdf> (Last accessed: 23.02.2019) [in Ukraine].
9. Kapsky D. V. Theoretical bases of forecasting of brakedown susceptibility on disputed objects. Dorogi ì *mosti*. Kyiv, 2008. 8. P. 83-87 URL: <http://dorogimosti.org.ua/ua/vipusk-8> (Last  accessed: 23.02.2019) [in Russian].
10. State Building Norms DBN V.2.3-4-2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo. Kyiv, 2015. 104 s. (Information and documentation) [in Ukrainian].
11. State Building Norms DBN V.2.3-5-2018 Streets and roads settlements. Kyiv, 2018. 55 p. (Information and documentation) [in Ukraine].
12. Bondar T. V. Analiz prychyn vynyknennia avariinosti - shliakh do obgruntovanoho planuvannia zakhodiv z pidvyshchennia bezpeky rukhu (Analysis of the accidents causes is the way for reasonable planning of measures to improve the traffic safety). *Avtošlâhovik Ukraïni*. 2010 N 4. P. 45-46 [in Ukraine].

**Liudmyla Nagrebelna**, [*https://orcid.org/0000-0002-5615-9075*](https://orcid.org/0000-0002-5615-9075)

**Evgen Minenko**,[*https://orcid.org/0000-0001-8547-9089*](https://orcid.org/0000-0001-8547-9089)

*M. P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise – DerzdorNDI SE, Kyiv, Ukraine*

**ANALYSIS OF EMERGENCY AND ACCIDENT PREVENTION EVENTS IS STEP TO REDUCE EMERGENCY**

***Abstract***

Introduction. The main reasons for the occurrence of traffic accidents are outlined. The ranking of countries on mortality in road accidents (road traffic accidents) is presented. The work of scientists is analyzed in relation to the reduction of the accident rate and the severity of the consequences of traffic accidents.

Problem Statement. The absence or insufficient amount of information about the level of accidents, the reasons for their occurrence does not allow determining their location for a reasoned planning of measures to identify deficiencies in road conditions.

Purpose. The purpose of the work is to identify and analyze the disadvantages in road conditions that contribute to the occurrence of a particular type of accident.

Materials and methods. In determining the list of shortcomings that affect the occurrence of traffic accidents, the methods of comparison and identification were used, as well as the materials  of the Road Safety Management (RSM) branch database which was created in the State  Enterprise «DerzhDorNDI».

Results. The list of deficiencies in the road conditions which contribute to the occurrence of this type of road accident is given. The analysis of statistical data on determination of the most frequent types of accidents is carried out. As a result of the analysis of accidents and defects affecting their occurrence, it has been determined that accidents occur under well-defined circumstances that are constantly repeated and the same accident situations are common to each type of road accident. To achieve reduction of traffic accidents and severity of their consequences is possible by improving road conditions.

Conclusion. One of the priority areas for reducing the number and severity of road accidents is to improve road conditions on the existing network of highways. This is possible by improving the road traffic management and developing and implementing the road safety measures.

To determine the impact of deficiencies in road conditions, it is necessary to use a statistical analysis of road traffic accident data.

To obtain a positive result in reducing the number of accidents and their consequences, it is necessary to study the causes of accidents, determine the areas of their localization and reasonably plan measures to eliminate deficiencies that increase the probability of an accident.

Results for defining the road conditions can be implemented in the Road Safety Audit. This will help reduce the number of points of conflict on the roads and assess the effectiveness of the implemented road safety measures.

The above mentioned will provide the necessary system for solving the traffic safety issues and will create certain guarantees of the effectiveness of the measures being developed.

***Key words: r***oad safety, traffic accidents, road, public road.

Наукове видання

**ДОРОГИ І МОСТИ**

Збірник наукових праць

Випуск 19

Відповідальний редактор Бородіна Н.А.

Літературний редактор Дехтяр А.С.

03113, м. Київ, просп. Перемоги, 57, ДП «ДерждорНДІ»,

тел. +38 (044) 201-08-44

e-mail: [roads\_bridges@dorndi.org.ua](https://mail.ukr.net/desktop#sendmsg/f=to=JWVMFPvqt_sLFp0cJNCg94swFpgw94s_n_8M)

Підписано до друку \_\_\_\_\_\_\_

Формат 60х841/8. Папір офсетний. Друк цифровий.

Умовн.-друк. арк. 16,27. Фіз. друк. арк. 17,5.

Наклад 150 прим. Замовлення № 47.

ТОВ «САК ЛТД», м. Київ

(044) 501-94-34