

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

УРДЗІК СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 625.7/.8

**ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ
ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ГЕОРАДАРНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

Спеціальність 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

19 – архітектура та будівництво

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Батракова Анжеліка Геннадіївна,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет Міністерства освіти
і науки України, м. Харків,
завідувач кафедри проектування доріг,
геодезії і землеустрою

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гамеляк Ігор Павлович,
Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України, м. Київ;
завідувач кафедри аеропортів;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Вирожемський Валерій Костянтинович,
Державне підприємство «Державний дорожній науково-
дослідний інститут імені М.П.Шульгіна», м. Київ;
начальник центру стандартизації та міжнародного
співробітництва.

Захист відбудеться « 22 » жовтня 2020 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий « 16 » вересня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



Р.В. Смолянюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Курс України на інтеграцію національної транспортної мережі в Транс'європейську транспортну мережу передбачає розвиток та вдосконалення мережі автомобільних доріг загального користування з метою приведення у відповідність до стандартів ТЕН-Т. Разом з тим, близько 90 % автомобільних доріг загального користування мають незадовільний транспортно-експлуатаційний стан та не відповідають сучаснім вимогам: за міцністю – 39,2 %; за рівністю – 51,1 %. Тому Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року визначено першочергові завдання щодо введення європейських стандартів з проектування, будівництва автомобільних доріг з метою підвищення швидкості руху, екологічної безпеки, комфорту та безпеки дорожнього руху. Вирішення означених завдань можливо за наявності об'єктивної інформації щодо фактичного транспортно-експлуатаційного стану мережі автомобільних доріг, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення з проектування, будівництва та ремонту, розподілу матеріальних і фінансових ресурсів. Очевидною стає необхідність розвитку методів оцінювання стану автомобільних доріг, що базуються на найбільш повному та достовірному наборі даних про фактичний стан дорожнього одягу та земляного полотна, та впровадження сучасних методів та засобів неруйнівної діагностики. На додаток до інструментальних методів, що традиційно застосовуються під час діагностики автомобільних доріг, в останній час у світовій практиці набуває поширення метод георадарного зондування. Поширення даного методу пояснюється можливістю отримання у реальному масштабі часу безперервної у просторі інформації про стан дорожнього одягу, його неоднорідність за товщиною та фізико-механічними параметрами ґрунтів, про наявність прихованих неоднорідностей, що впливають на несучу здатність конструкції. Своєчасне виявлення прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи дозволяє попередити руйнування дорожнього одягу та істотно скоротити витрати на ремонті автомобільних доріг. Незважаючи на актуальність задач пошуку прихованих неоднорідностей у шарах конструкції дорожнього одягу, дефектоскопія із застосуванням методу георадарного зондування дорожнього одягу знаходиться у стадії становлення, що пов'язано зі складнощами інтерпретації георадарних даних та недосконалістю методів обробки результатів георадарного зондування. Подолання зазначених проблем дозволить вирішити завдання пошуку, позиціонування прихованих тріщин, що, у свою чергу, дозволить на якісно новому рівні оцінити фактичний стан нежорсткого дорожнього одягу.

Таким чином, **актуальність дисертаційного дослідження** обумовлена необхідністю вирішення важливої науково-практичної задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням даних георадарного зондування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати дисертаційного дослідження отримано у процесі виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за пріоритетною тематикою Міністерства освіти і науки України: «Розроблення методів і засобів георадарної діагностики та оцінки стану будівельних конструкцій з метою подовження їх залишкового ресурсу» (№ 02-53-17, РК 0117U002404); «Розроблення та удосконалення методів, моделей,

алгоритмів і засобів георадарної діагностики техніко-експлуатаційного стану транспортних споруд» (№ 02-53-19, РК 0119U001301), та з тематичним планом таких науково-дослідних робіт Державного агентства автомобільних доріг України, як: «Розробити методику дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування» (№ 116/37-45-11, РК 0111U005508); «Розробити дослідний зразок апаратного вимірювального комплексу для георадарного дослідження дорожніх одягів. Провести атестацію та метрологічну повірку» (№ 115/37-44-11, РК 0111U005507); «Провести дослідження та удосконалити апаратний вимірювальний комплекс «ОДЯГ-1» і програмне забезпечення до нього з метою забезпечення автоматичного визначення товщини шарів дорожнього одягу при русі пересувної лабораторії зі швидкістю транспортного потоку» (№ 131/37-56-14, РК 0114U004634); «Розробити методику комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування та концепцію дорожньої бази даних про стан дорожнього одягу за результатами обстежень методами підповерхневого зондування» (№ 64/37-52-12, РК 0112U004745).

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у розробленні методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що залучає результати георадарного зондування та враховує неоднорідність параметрів конструкції дорожнього одягу.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

– провести аналіз існуючих методів та критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів та інструментальних методів діагностики нежорсткого дорожнього одягу, обґрунтувати найбільш перспективні методи і засоби позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу;

– обґрунтувати порядок георадарної діагностики нежорсткого дорожнього одягу та розробити методи інтерпретації результатів георадарного зондування для вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу;

– експериментально дослідити вплив геометричних параметрів тріщин, відстані між тріщинами, жорсткості матеріалів шарів на напружено-деформований стан (НДС) конструкції дорожнього одягу та розробити способи врахування наскрізних тріщин у розрахунку нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності;

– розробити критерії оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, які враховують неоднорідність дорожнього одягу, та дослідити вплив показників неоднорідності на інтегральний показник стану і надійність нежорсткого дорожнього одягу;

– розробити метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що залучає результати георадарної діагностики, методи чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу та спирається на теоретичні положення теорії надійності та теорії ризику;

– провести перевірку адекватності теоретичних моделей і методик георадарних вимірювань за допомогою лабораторних експериментів та польових

випробувань на автомобільних дорогах загального користування, розробити методики з оцінювання стану та надійності нежорсткого дорожнього одягу.

Об'єкт дослідження – діагностування та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів із залученням результатів георадарного зондування.

Предмет дослідження – методики діагностування та закономірності змінювання показників стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів.

Методи дослідження. Теоретичні положення дослідження ґрунтуються на: фундаментальних положеннях теорії взаємодії надширокосмугових імпульсних сигналів георадару з конструкцією нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах покриття та основи під час вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин; методах математичної статистики, теорії ймовірностей та теорії надійності, що застосовані під час вирішення задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики. Основу експериментальної частини дослідження складають: залучення пакетів прикладних програм, що реалізують методи механіки деформуємого твердого тіла, до аналізу впливу тріщин на показники стану нежорсткого дорожнього одягу; застосування прикладних програм, що реалізують методи аналізу хвильових процесів у плоскошаруватих середовищах, до вирішення задач обробки результатів георадарного зондування; застосування методів математичної статистики до вирішення задач оцінювання адекватності теоретичних моделей і достовірності результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів:

– дістав розвитку метод георадарної діагностики нежорсткого дорожнього одягу, якій, на відміну від раніше відомих, спирається на спосіб застосування антенних блоків, що реєструють крос-поляризаційну компоненту сигналу, відбитого від порушень суцільності шарів з монолітних матеріалів, залучає результати аналізу поляризаційного стану імпульсних сигналів георадару та алгоритм обробки сигналів георадарного профілю, що дозволяє вирішувати завдання пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах з монолітних матеріалів нежорсткого дорожнього одягу;

– отримано значення коефіцієнту приведення фактичної товщини шару з тріщиною до еквівалентної товщини без тріщини та коефіцієнту приведення граничного напруження зсуву у шарах з незв'язаних матеріалів та ґрунтах земляного полотна до еквівалентних напружень у конструкції без тріщини залежно від відносної вологості ґрунту та джерел зволоження, що дозволяє врахувати наявність тріщини під час розрахунку нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності;

– розроблено показники та критерії оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу: індекс технічного стану, коефіцієнт варіації індексу технічного стану, що ґрунтуються на теоретичних положеннях теорії надійності та теорії ризику, залучають результати георадарної діагностики та дозволяють оцінити стан дорожнього одягу з урахуванням варіації геометричних, фізико-механічних параметрів і показників НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу;

– вперше розроблено метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що залучає результати георадарної діагностики, ґрунтується на системі показників і критеріїв оцінювання стану дорожнього одягу, які враховують його неоднорідність, та спирається на встановлений зв'язок між показниками стану дорожнього одягу і коефіцієнтом надійності та алгоритм статистичної обробки вибірки оцінок стану нежорсткого дорожнього одягу. Запропонований метод підвищує точність оцінки стану нежорсткого дорожнього одягу та обґрунтованість проєктних рішень завдяки залученню розширеного набору даних про будову та неоднорідність конструкції дорожнього одягу.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено методику пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, яка визначає порядок проведення георадарного обстеження та ґрунтується на алгоритмах обробки імпульсних сигналів георадару, що дозволяє вирішувати задачі дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу без руйнування конструкції та підвищує точність діагностики нежорсткого дорожнього одягу;

– дістали подальшого розвитку способи врахування наскрізних тріщин у розрахунку нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності через: приведення фактичної товщини шару покриття з тріщиною до еквівалентної товщини шару покриття без тріщини; зменшення граничного напруження зсуву у шарах з незв'язаних матеріалів та ґрунті земляного полотна залежно від вологості ґрунту та джерел зволоження;

– встановлено граничні значення показників стану конструкції дорожнього одягу – індексу технічного стану та коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу для автомобільних доріг різних категорій, що дозволяє кількісно оцінити стан нежорсткого дорожнього одягу;

– розроблено методику оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики, що дозволяє оцінити стан конструкції дорожнього одягу з урахуванням його неоднорідності, яка обумовлена, в тому числі, наявністю прихованих тріщин у шарах з монолітних матеріалів.

Методики розвивають методи передпроектних інженерних вишукувань, удосконалюють методи діагностики та неруйнівного контролю нежорсткого дорожнього одягу, підвищують точність і достовірність оцінки стану нежорсткого дорожнього одягу.

Розроблено та впроваджено:

а) нормативно-технічні документи: М 02071168-705:2012 «Методика дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування»; М 02071168-725:2013 «Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування»; АД А.2.4-37641918-004:2016 «Альбом типових конструкцій дорожніх одягів для доріг I – II категорій на навантаження 130 кН»;

б) георадарне обладнання: дослідний зразок апаратного вимірювального комплексу для георадарного дослідження дорожніх одягів «ОДЯГ»; апаратний

вимірювальний комплекс «ОДЯГ-1», що забезпечує георадарне зондування при русі пересувної лабораторії зі швидкістю транспортного потоку;

в) рекомендації з проєктування, будівництва та капітального ремонту нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах України: капітальний ремонт автомобільної дороги М-03 Київ – Харків – Довжанський у Харківській області (км 519 – км 528); поточний середній ремонт автомобільної дороги М-18 Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта в АР Крим (км 681 – км 686); будівництво автомобільної дороги Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка у Дніпропетровській області (7,480 км).

Результати наукових досліджень впроваджено у навчальний процес Харківського національного автомобільно-дорожнього університету під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» у лекційні курси з дисциплін «Комп'ютерні технології у будівництві та експлуатації автомобільних доріг», «Інноваційні методи проєктування автомобільних доріг», лабораторні та практичні заняття, курсове і дипломне проєктування, науково-дослідну роботу студентів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаним науковим дослідженням. Основним науковим результатом, що отриманий автором особисто, є розроблення, дослідження та практична апробація методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у покритті та зміцнених шарах основи, що залучає результати георадарної діагностики. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, викладених у дисертаційній роботі, полягає у виконанні теоретичних (постановка задач та розроблення теоретичних моделей) та експериментальних досліджень, аналізі та узагальненні отриманих результатів, встановленні закономірностей; розробленні й впровадженні практичних методик. У роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: аналіз методів та технічних засобів діагностики дорожніх одягів [3, 4, 16]; розроблення лабораторних моделей, проведення лабораторних георадарних вимірювань, розроблення методу оброблення імпульсних сигналів георадару [5, 14, 20, 23]; удосконалення алгоритму пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин [1, 15, 20]; постановка експерименту та проведення експериментальних досліджень на автомобільних дорогах загального користування з метою пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин, обробка результатів георадарних вимірювань, розроблення методики георадарної діагностики дорожнього одягу [3, 4, 6, 17, 18, 24]; чисельне моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у покритті та зміцнених шарах основи [19], встановлення параметрів розрахункових моделей [9], оцінювання впливу прихованих тріщин на НДС конструкції дорожнього одягу [6, 21], розроблення способу врахування прихованих тріщин у розрахунках нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності [11]; визначення показників стану дорожнього одягу, дослідження закономірностей їх змінювання та розроблення методики оцінювання стану дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики [7, 8, 13, 22].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідались і обговорювались: на Міжнародній науковій конференції молодих вчених та студентів «Будівництво, реконструкція та дизайн сучасного містобудування»

(Луцьк, 7 - 9 квітня 2011 р.); на міжнародній конференції молодих вчених «Science – Future of Lithuania. Transport engineering and management: 15th Conference for Lithuania Junior Researches» (Вільнюс, 4 травня 2014 р.); на міжнародній науково-практичній конференції за участю студентів та молодих вчених «Сучасні комп'ютерно-інноваційні технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг і аеродромів» (Харків, 1 - 4 листопада 2012 р.); на міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг» (Харків, 12-13 листопада, 2013 р.); на міжнародній науковій конференції «IRS-2014: 15th International Radar Symposium» (Гданськ, 16-18 червня 2014 р.); на міжнародній науково-практичній конференції «Модернізація і наукові дослідження у транспортному комплексі» (Перм, 24-25 квітня, 2014 р.); на міжнародній конференції «UWBUSIS – 2014: 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort impulse Signals» (Харків, 15-19 вересня 2014 р.); на міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг» (Харків, 4-5 листопада, 2016 р.); на всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва» (Луцьк, 27-28 жовтня 2016 р.); на міжнародній конференції «ESMT-2018: Electronic Systems, Micro- and Nanosystem Technique, and IoT Electronic Technology Symposium» (Київ, 10-12 жовтня 2018 р.), на щорічних науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів і студентів ХНАДУ (2010-2020 р.).

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 24 наукових праці, в тому числі: 12 статей у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (1 стаття включена до наукометричної бази Scopus); 2 статті у зарубіжних періодичних наукових виданнях; 7 статей у збірниках праць за матеріалами міжнародних наукових конференцій (1 стаття включена до наукометричної бази Scopus); один розділ у колективній монографії у виданні CRC-Press (включений до наукометричної бази Scopus), 2 патенти України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 386 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 300 сторінок, у тому числі: 165 сторінок основного тексту, 52 рисунки, 27 таблиць, список використаних джерел на 39 сторінках, додатки на 48 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету, задачі і методи дослідження. Визначено предмет і об'єкт дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів та їх впровадження у виробництво. Зазначено особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі здійснено аналіз існуючих теоретичних та експериментальних методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, визначено основні проблеми та шляхи їх вирішення.

Дослідженню методів оцінювання впливу тріщин у покритті та шарах основи нежорсткого дорожнього одягу на показники його міцності, довговічності й надійності присвячено численні роботи багатьох видатних вчених: Б.С. Радовського,

В.О. Золотарьова, І.І. Леоновича, В.А. Веренько, Л.Б. Гезенцевя, Н.В. Горелишева, В.Д. Казарновського, А.Е. Мерзлікіна, С.К. Іліополова, В.К. Жданюка, І.П. Гамеляка, О.С. Славінської, А.О. Белятинського, В.В. Мозгового, А.М. Онищенко, Д.О. Павлюка та інших. Серед зарубіжних досліджень слід відзначити роботи Д. Пайса и Д. Сауса, Е. Оскарсона, Р. Літтона, Ч.В. Гловера, Р. Файфа, М. Коні, Аль-Куаді, Д. Ріго. За результатами аналізу теоретичних методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у покритті, встановлено, що, незважаючи на практичну необхідність вирішення завдання про напружений стан суцільного шару, що спирається на основу з тріщинами, теоретичний розв'язок задачі відсутній. Емпіричні методи, основу яких складають моделі оцінювання і прогнозування стану дорожнього одягу, переважно, розроблені для конкретних дорожньо-кліматичних умов і конструкцій дорожнього одягу та відображають особливості регіону обстеження. Прийняті у нормативних документах припущення і спрощення фактично унеможливають оцінювання стану та прогнозування відмови нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами.

Доведено необхідність застосування методів, що спираються на ймовірнісний аналіз як інструмент оцінювання впливу руйнувань на стан нежорсткого дорожнього одягу та врахування неоднорідності що обумовлена, в тому числі, наявністю тріщин у шарах з монолітних матеріалів. Обґрунтовано, що оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу має спиратися на інформацію про всю сукупність параметрів, що визначають здатність конструкції дорожнього одягу опиратися впливу транспортного навантаження та погодно-кліматичних факторів, в тому числі про локалізацію тріщин у шарах з монолітних матеріалів, що вимагає розвитку інструментальних методів діагностики, найбільший потенціал серед яких мають георадари. Переваги георадарного зондування для вирішення зазначеного класу задач забезпечується безперервністю збору даних, кращою роздільною здатністю відносно інших геофізичних методів, високою швидкістю зйомки, можливістю застосування до широкого спектру дорожньо-будівельних матеріалів. Незважаючи на значний досвід застосування георадарів для діагностики нежорсткого дорожнього одягу, дослідження у галузі георадарної діагностики прихованих тріщин обмежені.

За результатами критичного аналізу досліджень, які присвячено вирішенню наукової задачі оцінювання стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу, та узагальнення результатів георадарної діагностики автомобільних доріг загального користування обґрунтовано основний напрямок розвитку методів діагностики та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу – розроблення критеріїв і методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що залучають результати георадарної діагностики та враховують неоднорідність конструкції дорожнього одягу, яка обумовлена, в тому числі, наявністю прихованих тріщин у шарах дорожнього одягу.

У другому розділі наведено теоретичні положення з оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики. Розроблено модель оцінювання стану дорожнього одягу, що спирається на основну робочу гіпотезу дослідження про наявність функціонального зв'язку між результатами інструментальної діагностики дорожнього одягу, в тому числі електрофізичними

параметрами матеріалів шарів дорожнього одягу та параметрами імпульсних сигналів георадару, і показниками міцності та надійності конструкції дорожнього одягу. Модель ґрунтується на:

а) методі георадарної діагностики, що дозволяє отримати вихідні дані про товщину конструктивних шарів дорожнього одягу, наявність та геометричні параметри тріщин у шарах з монолітних матеріалів;

б) методах чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу, що залучають інформацію про внутрішню будову та приховані неоднорідності шарів дорожнього одягу, яку отримано за результатами георадарної діагностики;

в) статистичних та ймовірнісних методах оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, що дозволяє врахувати неоднорідність геометричних і фізико-механічних параметрів дорожнього одягу.

Запропоновано розв'язок задачі пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах дорожнього одягу, що передбачає: визначення електрофізичних характеристик матеріалу шарів конструкції дорожнього одягу та їх геометричних параметрів; розроблення методів інтерпретації результатів вимірювань – перерахунку електрофізичних параметрів тріщин у геометричні параметри. Завдання пошуку прихованих тріщин у шарах з монолітних матеріалів вирішено методом аналізу поляризаційного стану сигналів георадару та методом пошуку та аналізу годографів дифрагованих хвиль. Завдання визначення діелектричної проникності шару з тріщиною та глибини її розташування – методом пошарового відновлення діелектричної проникності плоскошаруватого середовища. Завдання оцінювання ширини розкриття тріщини спирається на застосування компараційного алгоритму, що полягає у зіставленні сигналів, що відбиті від шарів з тріщиною, з модельними сигналами, що відбиті від тріщин з відомими параметрами. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень розроблено алгоритм пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин.

Інформація про підповерхневу будову дорожнього одягу у поєднанні з даними про вид і модуль пружності матеріалів шарів забезпечують можливість чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів. Обґрунтовано представницький об'єм розрахункових моделей: без порушень суцільності шарів покриття (без тріщин); з порушенням суцільності нижнього шару покриття (приховані тріщини); з порушеннями суцільності на всю глибину покриття (наскрізні тріщини). Результати чисельного моделювання НДС із залученням методу скінченних елементів створюють основу кількісної оцінки стану нежорсткого дорожнього одягу.

Запропоновано модель оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, що спирається на результати інструментальної діагностики (внутрішні параметри моделі), які функціонально пов'язані з показниками міцності та надійності конструкції дорожнього одягу (зовнішні параметри моделі):

$$F(H) = f[TCI(K_E, K_\tau, K_\sigma); CV(TCI) | \Phi(E_i, h_i, D_i, \mu_i, E_{zp}, \Phi_{zp}, c_{zp}, \mu_{zp}, R_u, m)p, N], \quad (1)$$

де H – надійність конструкції дорожнього одягу; TCI – індекс технічного стану; $CV(TCI)$ – коефіцієнт варіації індексу технічного стану; K_E, K_τ, K_σ – коефіцієнти запасу міцності за допустимим пружним прогином, за критерієм зсуву в

грунтах земляного полотна та шарах з незв'язаних матеріалів, за опором розтягу при згині у монолітних шарах дорожнього одягу відповідно; E_i – модуль пружності i -го шару конструкції, МПа; h_i – товщина i -го шару конструкції, см; D_i – наявність прихованих тріщин у i -му шарі конструкції; $E_{гр}$, $\varphi_{гр}$, $c_{гр}$ – відповідно модуль пружності (МПа), кут внутрішнього тертя (град.) і коефіцієнт зчеплення (МПа) ґрунту; $R_{зг}$, m – відповідно опір розтягу при згині монолітних матеріалів (МПа) і показник утоми; p – питомий тиск на покриття, що відповідає групі розрахункового навантаження, МПа; N – інтенсивність, приведена до розрахункового автомобіля, авт./добу.

Критерієм оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу є індекс технічного стану (TCI), що залучає методи статистичної обробки результатів інструментальних вимірювань, чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу і дозволяє оцінити надійність конструкції дорожнього одягу з врахуванням варіації параметрів шарів дорожнього одягу та показників НДС.

Надійність розглядається як ймовірність безвідмовної роботи конструкції дорожнього одягу, за якою не буде перевищено його граничний стан. Припустивши, що характеристикою міцності конструкції є граничне значення індексу технічного стану ($R = TCI_{зр}$), а характеристикою фактичного навантаження – фактичний індекс технічного стану ($Q = TCI_{ф}$), визначено запас безпеки:

$$S = R - Q = TCI_{зр} - TCI_{ф}. \quad (2)$$

Конструкція дорожнього одягу задовольняє вимогам міцності, якщо $S \leq 0$. Тоді ймовірність руйнування конструкції:

$$P(S) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{S - 0}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{S}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{-S}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta), \quad (3)$$

де $\Phi(\beta)$ – нормована функція Лапласа,

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (4)$$

де β – характеристика безпеки.

Запишемо отримане рівняння з урахуванням (2)

$$P(TCI) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{-(TCI_{зр} - TCI_{ф})}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{TCI_{ф} - TCI_{зр}}{\sqrt{(\sigma_{ф})^2 + (\sigma_{зр})^2}}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta); \quad (5)$$

$$\beta = \frac{TCI_{ф} - TCI_{зр}}{\sqrt{(\sigma_{ф})^2 + (\sigma_{зр})^2}}; \quad (6)$$

де $TCI_{ф}$, $TCI_{зр}$ – фактичний і граничний індекс технічного стану відповідно; $\sigma_{ф}$, $\sigma_{зр}$ – середньоквадратичне відхилення фактичного ($TCI_{ф}$) і граничного ($TCI_{зр}$) індексу технічного стану конструкції відповідно.

Тоді надійність можна представити у вигляді:

$$H(TCI) = 1 - P(TCI) = 0,5 + \Phi(\beta) = 0,5 + \Phi \left[\frac{TCI_{\phi} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right]. \quad (7)$$

Середньоквадратичне відхилення граничного та фактичного індексу технічного стану конструкції визначається за формулами:

$$\sigma_{zp} = CV_{zp} \cdot TCI_{zp}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\phi} = CV_{\phi} \cdot TCI_{\phi}, \quad (9)$$

де CV_{zp}, CV_{ϕ} – відповідно коефіцієнт варіації граничного індексу технічного стану та фактичний коефіцієнт варіації індексу технічного стану, що визначається за результатами діагностики:

$$CV_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TCI_i - \overline{TCI})^2}{n-1}} / \overline{TCI}, \quad (10)$$

де \overline{TCI} – математичне очікування (середнє значення) індексу технічного стану конструкції на випробуваній ділянці, що визначається за формулою:

$$\overline{TCI} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n TCI_i, \quad (11)$$

де n – загальна кількість значень, отриманих за результатами діагностики; TCI_i – значення TCI на i -й ділянці.

За умови порівнянності величин TCI_{zp} і TCI_{ϕ} передбачається, що коефіцієнт варіації $CV_{zp} = CV_{\phi}$, тобто дорожній одяг з граничним значенням індексу технічного

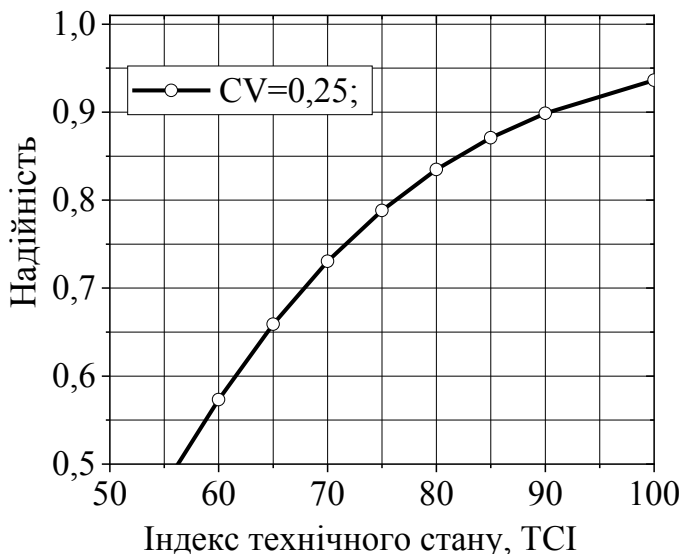


Рисунок 1 – Зв'язок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу з надійністю. Коефіцієнт варіації $C_{\phi} = 0,25$

стану має ту ж однорідність, що й дорожній одяг з фактичним індексом технічного стану. Запропонований підхід до оцінювання стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу дозволяє:

а) встановити функціональний зв'язок між індексом технічного стану і надійністю конструкції дорожнього одягу (рис. 1);

б) дослідити закономірності змінювання надійності конструкції дорожнього одягу залежно від коефіцієнту варіації індексу технічного стану (TCI), а також внутрішніх і зовнішніх параметрів моделі (1);

в) оцінити надійність дорожнього одягу за результатами діагностики.

Застосування теорії ризику до задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу дозволило визначити граничні значення індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу та його коефіцієнту варіації, за яких ймовірність відмови дорожнього одягу відповідає заданому ризику руйнування. Максимальний індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу $TCI_{\max} = 100$ відповідає потрібному значенню індексу технічного стану конструкції у перший рік експлуатації автомобільної дороги, за якого ризик руйнування $R(TCI) \xrightarrow{TCI} 0$. Граничний індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу – значенню, за якого ймовірність відмови (руйнування) дорожнього одягу відповідає граничному ризику руйнування $R_{cp}(TCI)$ для певної категорії автомобільної дороги.

Метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики складається з: комплексу методів й алгоритмів обробки результатів георадарного зондування та отримання даних про будову та стан конструктивних шарів дорожнього одягу; чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами та на тріщинуватій основі; показників і критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу (рис. 2).

У третьому розділі експериментальними дослідженнями підтверджено теоретичні положення методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, що залучає результати георадарної діагностики, та доведено адекватність розроблених моделей: пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу; оцінювання впливу тріщин на НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу та пов'язаний з ним стан конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів.

Лабораторні дослідження та георадарна діагностика нежорсткого дорожнього одягу проводилися із застосуванням апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ» та його модифікацій, що відрізняються типом антенних систем і технічними характеристиками георадару, зокрема центральною частотою. Застосовувалися антенні системи різних типів: планарна антена, блок дипольних антен; блок антен щілинного типу; білстатична щілинна антена. Вибір різних антенних блоків обумовлений як незначною контрастністю прихованих тріщин, так й різноманітністю конструкцій нежорсткого дорожнього одягу, що вимагає різних параметрів георадарів для їх пошуку та позиціонування.

У серії експериментів застосовані лабораторні моделі з конструкцією, що складалася з шарів асфальтобетону з тріщиною у нижньому шарі, шару сухого піску товщиною 17 см, шару суглинку товщиною 19 см. Розміри моделі у плані: ширина 0,60 м, довжина 1,2 м, глибина 0,6 м. Під час експериментів варіювалася кількість асфальтобетонних шарів, висота тріщини, заповнення тріщини: повітря, металевий стрижень, вода.

За експериментальними дослідженнями розроблено схему зондування конструкції дорожнього одягу та обробки сигналів георадару під час вирішення завдання дефектоскопії (рис. 3), обґрунтовано параметри георадарної зйомки та встановлено основні вимоги до георадарного зондування:

Отримання вихідних даних для оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики

$$F(H) = f[TCI(K_E, K_\tau, K_\sigma); CV(TCI) | \Phi(E_i, h_i, D_i, \mu_i, E_{zp}, \varphi_{zp}, c_{zp}, \mu_{zp}, R_u, m)p, N],$$

Інтенсивність та склад транспортного потоку

Інші методи інструментальної та візуальної оцінки

Механічні характеристики
 $E_i, \mu_i, E_{zp}, \varphi_{zp}, c_{zp}, \mu_{zp}$

Товщина шарів дорожнього одягу, неоднорідність
 h_i, C_{vh}

Георадарна діагностика із застосуванням антен різного типу

Тріщини у монолітних та зміцнених шарах
 h_{mp}, b_{mp}

Модель оцінювання поточного стану дорожнього одягу

Оцінка напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу з тріщинами

За допустимим пружним прогином

$$K_E = \frac{E_{заз}}{E_{номпріб}}$$

$$E_{заз} = \frac{p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{w} \cdot K$$

За опором розтягу при згині

$$K_\sigma = \frac{\sigma_r}{R_{дон}}$$

$$R_i = R_0 \left[1 - \frac{T_i}{T_0} \right]^{\frac{1}{b_i}}$$

За опором зсуву у ґрунті земляного полотна і шарах із незв'язаних матеріалів

$$K_\tau = \frac{\tau}{T_{дон}}$$

$$\tau_{акт} = \frac{[(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi]}{(2 \cdot \cos \varphi)}$$

Оцінювання за індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу

$$TCI = 100 \times \left[\frac{\alpha_E \times f_E + \alpha_\sigma \times f_\sigma + \alpha_\tau \times f_\tau}{\alpha_E + \alpha_\sigma + \alpha_\tau} \right]$$

Імовірнісна модель оцінки за індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу

Імовірність руйнування конструкції

$$P(TCI) = \frac{1}{2} - \Phi \left(\frac{TCI_\phi - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_\phi)^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta)$$

Надійність конструкції

$$H(TCI) = 1 - P(TCI) = 0,5 + \Phi \left[\frac{TCI_\phi - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_\phi)^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right]$$

$$TCI_{zp} = \frac{\sqrt{TCI_{max}^2 + (U^2 \cdot CV_{zp}^2 - 1) \cdot (TCI_{max}^2 - U^2 \cdot (\sigma_{max})^2)} - TCI_{max}}{U^2 \cdot CV_{zp}^2 - 1};$$

Граничний індекс технічного стану:

Коефіцієнт варіації TCI_{zp} :

$$CV_{max} = \frac{\sqrt{\alpha_E^2 \cdot CV_E^2 + \alpha_\tau^2 \cdot CV_\tau^2 + \alpha_\sigma^2 \cdot CV_\sigma^2}}{\alpha_E + \alpha_\tau + \alpha_\sigma};$$

$$CV_E = \sqrt{C_{заз}^2 + C_{номпр}^2};$$

$$CV_\tau = \sqrt{C_{Тдон}^2 + C_\tau^2};$$

$$CV_\sigma = \sqrt{C_{Rзз}^2 + C_\sigma^2}$$

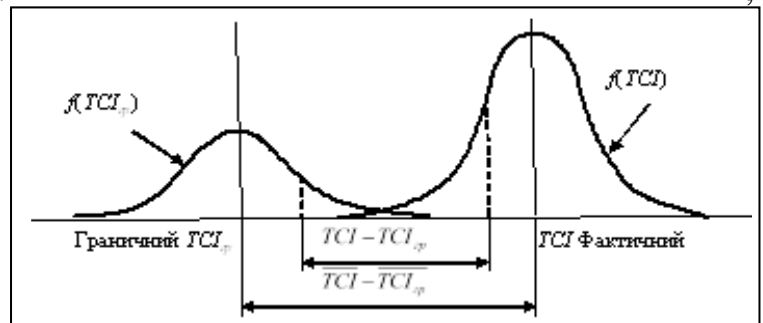


Рисунок 2 – Схема методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу

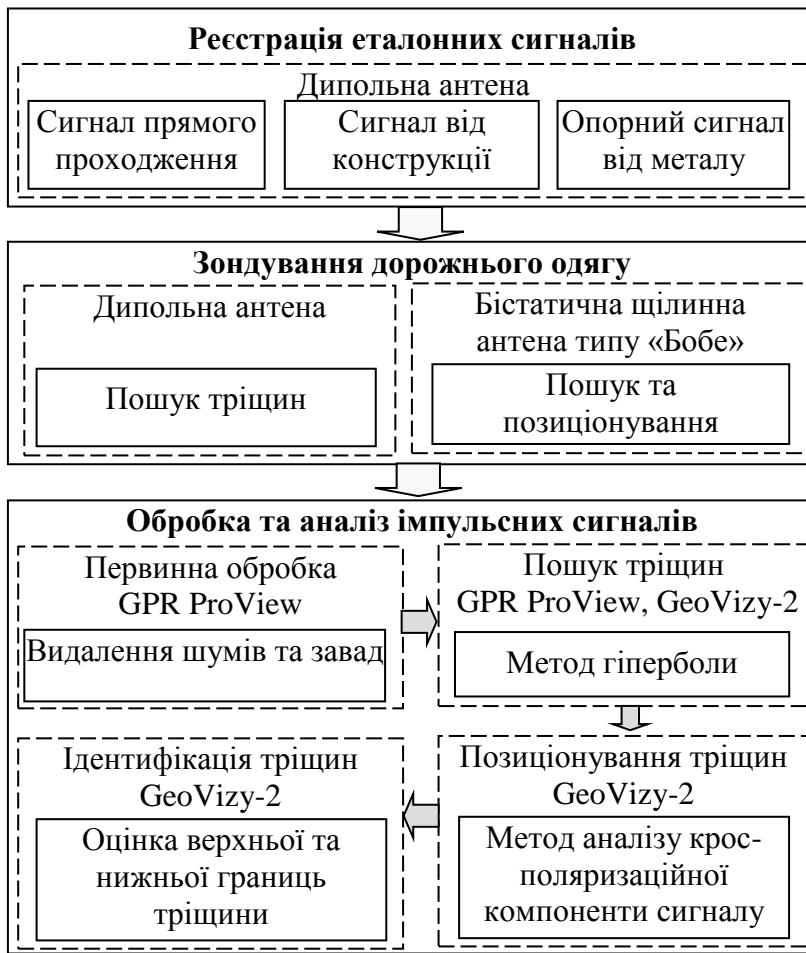


Рисунок 3 – Порядок отримання георадарних даних та їх інтерпретації

змінюється залежно від глибини розташування тріщини у шарах покриття, товщини шару покриття над тріщиною та збільшується зі збільшенням вологості шарів конструкції дорожнього одягу, що пов'язано із загасанням імпульсних сигналів георадару з глибиною. Відносна похибка визначення глибини розташування тріщин становить від 1 % до 7 %, що знаходиться у межах допустимих відхилень товщини шарів конструкції дорожнього одягу та свідчить про високу порівнянність результатів обробки імпульсних сигналів георадару фактичним геометричним параметрам тріщин, що визначені за результатами відбору кернів з конструкції дорожнього одягу (рис. 4).

За результатами чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу обґрунтовано параметри моделі оцінювання нежорсткого дорожнього одягу та визначено: найбільш небезпечне положення навантаження відносно наскрізної та прихованої тріщини; ширину розкриття тріщини та мінімальний модуль пружності матеріалу заповнення тріщини, за яких зменшуються напруження розтягу на нижній фібрі пакету монолітних шарів покриття. Встановлено, що:

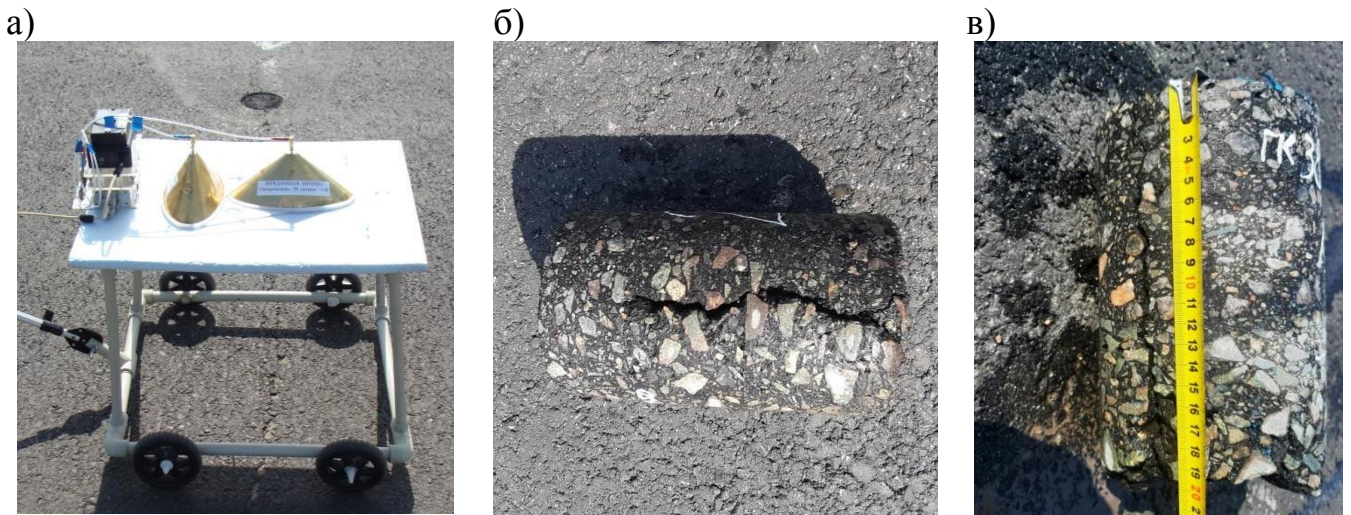
а) розрахунок НДС дорожнього одягу з наскрізними тріщинами слід проводити для найбільш небезпечного кутового положення навантаження відносно Т-подібної наскрізної тріщини, за якого горизонтальні напруження у монолітних шарах покриття на та дотичні напруження на верхній фібрі основи збільшуються майже у 2 рази відносно конструкцій без тріщини;

а) відстань до поверхні покриття від нижньої поверхні антенного блоку має становити 0,30 м;

б) швидкість горизонтального переміщення георадара не повинна перевищувати швидкість обробки і запису трас на реєструючий пристрій;

в) крок зондування для антенної системи з центральною частотою 1,2 ГГц та діаграмою спрямованості $117,4^\circ$ становить $\Delta = 0,01$ м під час вирішення завдання пошуку і позиціонування тріщин, у завданнях визначення геометричних параметрів тріщин $\Delta = 0,05$ м.

Лабораторними експериментами та випробуваннями на автомобільних дорогах загального користування встановлено, що максимальна відносна похибка вимірювань



а) георадарне зондування; б) керн;
в) вимірювання параметрів тріщини за керном
Рисунок 4 – Діагностика нежорсткого дорожнього одягу

б) на відміну від наскрізних тріщин, тип прихованих тріщин (одиночна або Т-подібна) не виявляє суттєвого впливу на НДС конструкції дорожнього одягу, тому розрахунок НДС доцільно проводити для одиночної тріщини за умови несиметричного положення навантаження відносно тріщини, вплив якого зростає зі збільшенням модулю пружності матеріалів шарів покриття;

в) ефективна ширина розкриття тріщини, за якою зменшуються напруження розтягу на нижній фібрі пакету монолітних шарів покриття становить 10 мм. Для запобігання зростання напружень розтягу заповнення тріщини повинно виконуватися матеріалами з модулем пружності понад 1000 МПа;

г) взаємний вплив прихованих тріщин на НДС конструкції дорожнього одягу слід враховувати, якщо відстань між ними становить менше за діаметр штампу рівновеликого відбитку колеса для відповідної групи розрахункового навантаження.

За результатами чисельного моделювання НДС удосконалено підходи до розрахунку нежорсткого дорожнього одягу з наскрізними тріщинами за критеріями міцності, вплив яких враховують: зменшенням фактичної товщини шару з тріщиною від 5,5 % до 8 %, зменшенням граничного напруження зсуву у шарах з незв'язаних матеріалів у 2,4 – 2,6 рази, зменшенням граничного напруження зсуву у ґрунті земляного полотна у 1,1 – 1,6 рази залежно від вологості ґрунту та джерел зволоження.

Перевірка адекватності моделей оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу здійснювалася шляхом зіставлення результатів вимірювання прогину під навантаженням на моделях конструкції дорожнього одягу з різною шириною розкриття тріщини з результатами чисельного моделювання НДС аналогічних моделей без тріщин. Геометричні параметри моделей обґрунтовано за умовою подібності та співрозмірності, виходячи зі співвідношення $L/D \geq 3$, де L – 1/2 ширини (довжини) моделі, D – діаметр штампу. За результатами лабораторних експериментів підтверджено адекватність розрахункових моделей за критерієм Фішера ($K_{fe} = 1,07 < K_{fm} = 5,85$).

Результати георадарної діагностики та чисельного моделювання НДС

створюють основу методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за показниками: індексом технічного стану, коефіцієнтом варіації індексу технічного стану та коефіцієнтом надійності нежорсткого дорожнього одягу. Критеріями оцінювання є граничні значення коефіцієнту варіації (CV_{zp}) та індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (TCl_{zp}) для автомобільних доріг різних категорій. Граничні значення показників стану нежорсткого дорожнього одягу визначено за умови рівності коефіцієнта варіації індексу технічного стану його граничним значенням для певної категорії автомобільної дороги, $CV = CV_{\max}$. Граничні значення індексу технічного стану дозволяють: оцінити стан конструкції дорожнього одягу за результатами діагностики; визначити надійність конструкції дорожнього одягу за заданим або визначеним за результатами діагностики коефіцієнтом варіації індексу технічного стану (табл. 1).

Таблиця 1 – Граничні значення показників стану нежорсткого дорожнього одягу

| Категорія дороги | Коефіцієнти варіації запасу міцності | | | Коефіцієнт варіації індексу технічного стану, CV_{\max} | Граничний індекс технічного стану, TCl_{zp} |
|------------------|--|--|---|---|---|
| | за опором розтягу при згині, CV_{σ} | за допустимим пружним прогином, CV_E | за опором зсуву в ґрунтах і шарах з незв'язаних матеріалів, CV_{τ} | | |
| Ia, Ib | 0,169706 | 0,187883 | 0,2 | 0,11 | 71 |
| II | 0,184391 | 0,197231 | 0,216333 | 0,12 | 71 |
| III | 0,19799 | 0,205913 | 0,244131 | 0,13 | 70 |
| IV | 0,226274 | 0,223607 | 0,288444 | 0,14 | 69 |

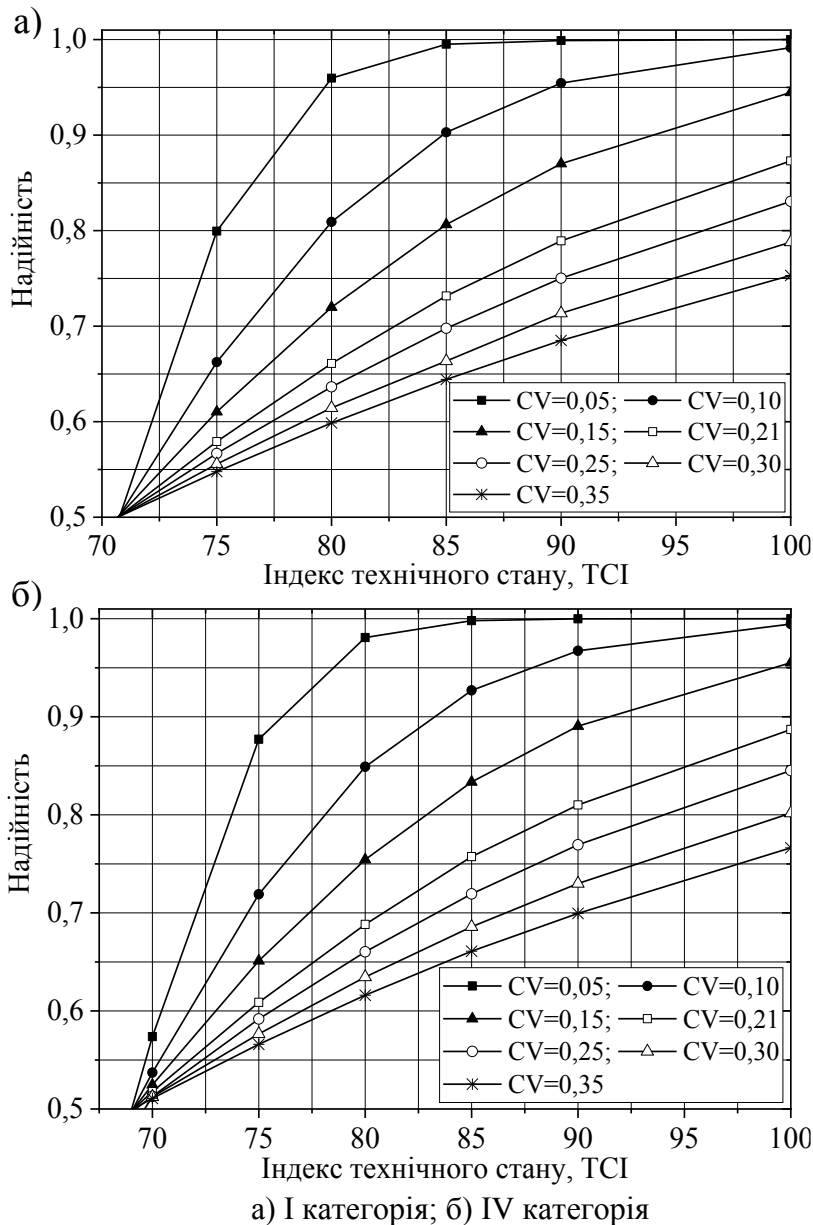
Показником неоднорідності конструкції дорожнього одягу відповідно до постановки задачі є коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (CV_{ϕ}), що визначається за результатами діагностики. Тому у процесі досліджень оцінювався вплив коефіцієнту варіації на надійність конструкції дорожнього одягу для автомобільних доріг різних категорій. За результатами чисельних експериментів встановлено зв'язок між показниками неоднорідності конструкції дорожнього одягу, що визначаються за результатами георадарної діагностики, індексом технічного стану та його граничними значеннями.

Аналіз результатів розрахунку надійності конструкції дорожнього одягу для автомобільних доріг I – IV категорій за умови змінювання коефіцієнту варіації в діапазоні від 5 % до 35 % доводить (рис. 5):

а) збільшення коефіцієнту варіації індексу технічного стану дорожнього одягу з 5 % до 10 % зменшує надійність конструкції до 15 %;

б) якщо коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу перевищує граничні значення для відповідної категорії автомобільної дороги, надійність конструкції дорожнього одягу не задовольняє нормативним вимогам;

в) якщо індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу перевищує граничне значення ($TCl \geq TCl_{zp}$), то збільшення коефіцієнту варіації призводить до зменшення надійності конструкції дорожнього одягу.



а) I категорія; б) IV категорія
Рисунок 5 – Вплив коефіцієнту варіації індексу технічного стану на надійність конструкції дорожнього одягу

індексу технічного стану, що отриманий методом генерації випадкових чисел для нормального закону розподілу.

Отже, експериментальні дослідження дозволили підтвердити теоретичні положення та довести адекватність розроблених моделей: пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу; оцінювання впливу тріщин на НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу та пов'язаний з ним стан нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами шарів з монолітних матеріалів.

У четвертому розділі розроблено методики георадарної діагностики та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із застосуванням даних георадарного зондування, визначено економічну ефективність від їх впровадження.

Методика пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу визначає порядок проведення георадарного

Оцінювання впливу коефіцієнту варіації індексу технічного стану на формування вибірки даних та перевірка адекватності моделі оцінювання стану дорожнього одягу за результатами діагностики проводилася на автомобільних дорогах загального користування. Адекватність моделі оцінювання стану дорожнього одягу за результатами георадарної діагностики підтверджено шляхом: формуванням великої вибірки фактичних значень індексу технічного стану дорожнього одягу з коефіцієнтом варіації вихідних даних від 7 % до 25 % та коефіцієнтом варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу від 2 % до 8 % та встановленням однорідності вибірки за непараметричним критерієм Вилкоксона (Манна - Уїтні) з рівнем значимості $\alpha=0,05$; зіставленням розподілу фактичних значень індексу технічного стану, що визначений за результатами діагностики, з теоретичним розподілом функції

обстеження та ґрунтується на алгоритмах обробки імпульсних сигналів георадару під час вирішення завдань дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу, що дозволяє отримувати вихідні дані для оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу без руйнування конструкції.

Методика оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із застосуванням даних георадарного зондування спирається на результати георадарної діагностики та чисельного моделювання НДС нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів та дозволяє оцінити стан нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням його неоднорідності за системою показників: індексом технічного стану; коефіцієнтом варіації індексу технічного стану; ризиком руйнувань; надійністю конструкції дорожнього одягу.

Очікувана економія від зниження вартості обстеження нежорсткого дорожнього одягу через застосування неруйнівного методу георадарної діагностики становить 690,04 грн./км. Якщо обсяг обстежень досягатиме 100 км/рік, очікуваний економічний ефект від впровадження методу георадарної діагностики становитиме 455,004 тис. грн./рік·100 км. Витрати на розроблення, тестування та налагодження георадарного комплексу окупаються за один рік за умови обстеження 35 км автомобільних доріг. Потенційний економічний ефект від впровадження методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики забезпечується розширеним набором даних про підповерхневу будову конструктивних шарів дорожнього одягу, що підвищує точність оцінки фактичного стану дорожнього одягу, сприяє розробленню обґрунтованих проєктних рішень, знижує транспортно-експлуатаційні витрати (207,763 тис. грн./км·рік.).

ВИСНОВКИ

Основний науковий результат дисертаційного дослідження полягає у розвитку теоретичних і практичних положень методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із застосуванням результатів георадарного зондування, які надають змогу вирішити завдання пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах дорожнього одягу та оцінити стан нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів.

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

1. Оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу має спиратися на:

а) статистичні та ймовірнісні методи, які дозволяють визначити надійність конструкції дорожнього одягу з урахуванням неоднорідності геометричних та фізико-механічних параметрів;

б) параметри, що визначають фактичний НДС конструкції дорожнього одягу, в тому числі її неоднорідність, що пов'язана із локалізацією тріщин у шарах покриття та шарах основи;

в) методи та засоби діагностики дорожнього одягу, серед яких найбільший потенціал стосовно вирішення задач пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу мають георадари.

2. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень:

а) науково обґрунтовано підхід до вирішення завдання пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах дорожнього одягу за результатами георадарної діагностики, основу якого складають: контраст у діелектричній проникності матеріалів шарів; здатність прихованих тріщин до утворення дифрагованих хвиль; поляризаційний стан сигналів, що відбиті від тріщин у шарах конструкції дорожнього одягу;

б) розроблено порядок проведення георадарної діагностики, обґрунтовано параметри георадарної зйомки та вимоги до георадарного зондування;

в) отримано рішення завдання пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах дорожнього одягу, що ґрунтується на:

1) способі застосування антенних блоків, що реєструють крос-поляризаційну компоненту сигналу, відбитого від прихованих тріщин;

2) методах аналізу поляризаційного стану імпульсних сигналів георадару та алгоритмах обробки сигналів георадарного профілю.

3. Експериментальними дослідженнями із застосуванням методів чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів:

а) обґрунтовано найбільш небезпечне розташування навантаження відносно тріщини: кутове розташування за наявності Т-подібної наскрізної тріщини, за якого збільшуються горизонтальні напруження у монолітних шарах покриття на 239 % та дотичні напруження на верхній фібрі основи на 234 %; несиметричне розташування за наявності прихованої тріщини, вплив якого збільшується зі збільшенням модулю пружності матеріалів шарів покриття;

б) визначено ефективну ширину розкриття тріщини, за якою зменшуються напруження розтягу на нижній фібрі пакету монолітних шарів покриття, та мінімальний модуль пружності матеріалу заповнення тріщини, за якого зменшуються напруження розтягу на границі між шарами покриття;

в) встановлено відстань між тріщинами, за якої необхідно враховувати взаємний вплив прихованих тріщин на НДС конструкції дорожнього одягу, – менше за діаметр штампку для відповідної групи розрахункового навантаження;

г) удосконалено підходи до розрахунку дорожнього одягу з наскрізними тріщинами у покритті за критеріями міцності через:

1) приведення фактичної товщини шару покриття з тріщиною до еквівалентної товщини шару шляхом зменшення фактичної товщини шару від 5,5 % до 8 % залежно від відносної вологості ґрунту;

2) зменшення граничного напруження зсуву у шарах з незв'язаних матеріалів у 2,4–2,6 рази, зменшення граничного напруження зсуву у ґрунті земляного полотна у 1,1–1,6 рази залежно від відносної вологості ґрунту та джерел зволоження.

4. Розроблено показники та критерії оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу – індекс технічного стану і коефіцієнт варіації індексу технічного стану, які ґрунтуються на положеннях теорії ризику й теорії надійності та залучають результати георадарної діагностики, що дозволило:

а) врахувати варіацію геометричних та фізико-механічних параметрів конструкції дорожнього одягу та неоднорідність показників його НДС;

б) визначити граничні значення індексу технічного стану та коефіцієнту

варіації індексу технічного стану для автомобільних доріг різних категорій, за яких імовірність відмови дорожнього одягу відповідає граничному ризику руйнування для відповідної категорії автомобільної дороги;

в) встановити зв'язок між індексом технічного стану, коефіцієнтом варіації індексу технічного стану та коефіцієнтом надійності, що дозволяє оцінити надійність конструкції дорожнього одягу за результатами інструментальних вимірювань;

г) підтвердити головну робочу гіпотезу дисертаційного дослідження щодо наявності зв'язку між інструментально вимірюваними параметрами конструкції нежорсткого дорожнього одягу і показниками її стану, в тому числі індексом технічного стану і надійністю конструкції дорожнього одягу.

5. Розроблено алгоритм та метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що враховує неоднорідність дорожнього одягу, та ґрунтується на:

а) інформації про підповерхневу будову конструкції дорожнього одягу, що визначена за результатами георадарного зондування;

б) показниках та критеріях оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу;

в) зв'язку індексу технічного стану та коефіцієнта варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу з коефіцієнтом надійності;

г) алгоритмі статистичної обробки вибірки оцінок стану нежорсткого дорожнього одягу, реалізація якого забезпечує достовірність оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за рівня довірчій імовірності 95 %.

6. Експериментальними дослідженнями та польовими випробуваннями на автомобільних дорогах підтверджено адекватність теоретичних моделей та практичних методик за рівня довірчої імовірності 95 %:

а) відносна похибка визначення глибини розташування тріщин становить від 1 % до 7 % , що відповідає допустимим відхиленням;

б) моделі оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу адекватні експериментальним даним з 95 % довірчою імовірністю за критерієм Фішера;

в) однорідність вибірки фактичних значень індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу ($TCl_{\phi i}$) відповідає рівню значимості $\alpha = 0,05$ за непараметричним критерієм Вилкоксона (Манна-Уїтні).

Теоретичні та експериментальні результати дисертаційного дослідження реалізовані у методиках: методика пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу; методика оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики.

7. Очікуваний економічний ефект від впровадження методик діагностики та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарного зондування становить:

а) від зниження вартості діагностики під час вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин – 690,04 грн./км, за умови діагностики 100 км/рік – 455,004 тис. грн./рік.;

б) від підвищення точності оцінювання фактичного стану нежорсткого дорожнього одягу та обґрунтованості проєктних рішень – 207,763 тис. грн./км.рік через зменшення транспортно-експлуатаційних витрат.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Sergey N.Urdzik, Gennadiy P. Pochanin, Sergey A. Masalov, Vadym P. Ruban, Pavlo V. Kholod et al. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying: [in the book of Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications]. London: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016. 476 p. (*Видання входить до наукометричної бази Scopus*).

2. Urdzik S.N., Batrakov D. O., Beloshenko K. S. Antyufeyeva M. S., Batrakov A. G. Comparative study of signal processing of two UWB GPR antenna units. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019. Vol. 78. № 2. PP. 109 – 116. (*Видання входить до наукометричної бази Scopus*)

Статті у наукових фахових виданнях:

3. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Галащук И.Б. Совершенствование георадарных технологий при обследовании дорожных одежд. *Автошляховик України: наук. - вироб. журн. К.*, 2010, №5. С. 36 – 42.

4. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Галащук И.Б. Обследование дорожных одежд методами подповерхностной радиолокации. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2010. Вип. 59. С. 283 – 288.

5. Урдзік С.М., Батракова А.Г., Процюк В.О. Дослідження електрофізичних характеристик дорожньо-будівельних матеріалів. *Містобудування та територіальне планування: наук. - техн. зб.* Київ, 2011. Вип. 40. Ч. I. С. 93 – 97.

6. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Процюк В.А. Применение георадаров для оценки влажности и инфильтрации в слоях конструкций дорожных одежд. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: зб. наук.пр.* Київ, 2012. Вип. 83. С. 13 – 18.

7. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Батраков Д.О. Операторная модель оценки текущего состояния дорожных одежд по результатам георадарного обследования. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2014. № 1 (75). С.174 – 177.

8. Урдзик С.Н. Батракова А.Г. Критерии оценки состояния дорожных одежд по результатам диагностики. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр.* Харків, 2015. Вип. 68. С. 92 – 98. (*Видання входить до наукометричної бази Index Copernicus*)

9. Урдзик С.Н., Батракова А.Г. Влияние положения нагрузки на напряженно-деформированное состояние конструкции дорожной одежды. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. пр.* Луцьк, 2017. Вип. 6. С. 16 – 25.

10. Урдзік С.М. Батракова А.Г. Моделювання впливу заходів щодо посилення конструкцій дорожніх одягів з підповерхневими тріщинами. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2018. № 4(94). С 110 – 116.

11. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Д.О. Батраков. Моделирование и оценка состояния дорожных одежд со сквозными трещинами в покрытии. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр.* Харків, 2019. Вип. 85. С. 49 – 58. (*Видання входить до наукометричної бази Index Copernicus*)

12. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Є.В. Дорожко. Геоінформаційне забезпечення систем управління станом покриття. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.* [Серія: Технічні науки]. Харків, 2019. № 147, С. 27-34.

13. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Д.О. Батраков. Динамические и эконометрические модели прогнозирования состояния автомобильных дорог. *Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. Харків*, 2019. Вип. 85, С. 59 – 65. (Видання входить до наукометричної бази *Index Copernicus*)

Список опублікованих праць апробаційного характеру:

14. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Процюк В.А. Исследование возможностей применения георадара «Одыг» для поиска и идентификации подповерхностных дефектов в конструкциях дорожных одежд. *Инженерия транспорта и организация перевозок: зб. стат. 15-ої конф. мол. вчен. Литви «Наука – будущее Литвы»*. 4 трав. 2012 г., Вільнюс, Литва. Вільнюс, 2012. С. 138 – 143.

15. Урдзік С.М., Батракова А.Г., Процюк В.О. Алгоритм позиціонування та ідентифікації підповерхневих дефектів в конструктивних шарах дорожніх одягів з використанням георадарного обладнання. *Сучасні комп'ютерно-інноваційні технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг і аеродромів: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків*, 1 - 4 листоп. 2012 р. Харків, 2012. С. 35 - 40.

16. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Галащук И.Б. Оценка состояния дорожных одежд в задачах превентивного обслуживания. *Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг: матеріали міжнар. наук. - техн. конф., м. Харків*, 12 - 13 листоп. 2013 р. Харків, 2013. С. 8 – 12.

17. Sergey N. Urdzik, Gennadiy P. Pochanin, and Vadim P. Ruban, Angelika G. Batrakova, Dmitry O. Batrakov. Measuring of Thickness of The Asphalt Pavement with use of GPR. *15th International Radar Symposium «IRS-2014»: Proceedings*, 16-18 June, 2014. Gdansk, Poland. PP. 452 – 455. (входить до наукометричної бази *Scopus*).

18. Urdzik S.N., Pochanin G.P., Ruban V.P., Kholod P.V., Shuba O.A., Pochanina I.Ye., Batrakova A.G., Batrakov D.O., Golovin D.V. Advances in ground penetrating radars for road surveying. *8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort impulse Signals «UWBUSIS – 2014» IEEE: Proceedings.*, Kharkov. 15 – 19 September, 2014. PP. 153 – 155.

19. Урдзик С.Н., Батракова А.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с сеткой подповерхностных трещин. *Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг: матеріали міжнар. наук. - техн. конф., м. Харків*, 4 – 5 листоп. 2016. Харків, 2016. С. 43 – 48.

20. Urdzik S.N., Batrakov D.O., Beloshenko K.S., Antyufeyeva M.S., Batrakova A.G. Comparative study of signal processing of two UWB GPR antenna units. *Electronic Systems, Micro – and Nanosystem Technique, and IoT Electronic Technology Symposium*. October 10 – 12, 2018. Kiev, Ukraine. PP.1 – 5.

Список опублікованих праць які додатково відображають наукові результати дисертації:

21. Урдзик С.Н., Батракова А.Г. Оценка влияния подповерхностных трещин и толщины слоев покрытия на напряженно - деформированное состояние конструкции дорожной одежды. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород*, 2014. №4. С. 73 – 78.

22. Урдзик С.Н., Батракова А.Г., Пархоменко А.А. Модель оценки текущего

состояния дорожных одежд по результатам георадарной диагностики. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Пермь, 2014. № 2. С. 14 – 29.

Свідоцтва та патенти:

23. Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці: пат. 108136 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) u201511193; заявл. 13.11.2015; опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13/2016. 4 с.

24. Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці: пат. 113916 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) / a201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Урдзік С.М. Оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми. (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-практичної задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів. Основний науковий результат дослідження полягає у розвитку теоретичних і практичних положень оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики. Розроблений метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що залучає методи обробки імпульсних сигналів георадару, методи чисельного моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу та спирається на: інформацію про підповерхневу будову конструкції дорожнього одягу; систему показників та критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу; зв'язок індексу технічного стану та коефіцієнта варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу з коефіцієнтом надійності; алгоритми статистичної обробки вибірки оцінок стану нежорсткого дорожнього одягу. Адекватність теоретичних моделей і методів підтверджено лабораторними експериментами та випробуваннями на автомобільних дорогах загального користування. Розроблено методику пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, методику оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики.

Ключові слова: конструкція нежорсткого дорожнього одягу, стан нежорсткого дорожнього одягу, прихована тріщина, георадар, діагностика, неоднорідність конструкції дорожнього одягу, індекс технічного стану, коефіцієнт варіації, надійність.

АННОТАЦИЯ

Урдзик С.Н. Оценка состояния нежесткой дорожной одежды с привлечением георадарной диагностики. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.11 – автомобильные дороги и аэродромы. (192 – Строительство и гражданская инженерия). – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи оценки состояния нежесткой дорожной одежды с трещинами в слоях из монолитных материалов. Основной научный результат исследования заключается в развитии теоретических и практических положений оценки состояния нежесткой дорожной одежды с привлечением результатов георадарной диагностики. Разработанный метод оценки состояния нежесткой дорожной одежды с трещинами в слоях из монолитных материалов, привлекает методы обработки импульсных сигналов георадара, методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды и опирается на: информацию о подповерхностном строении конструкции дорожной одежды; систему показателей и критериев оценки состояния нежесткой дорожной одежды; связь индекса технического состояния и коэффициента вариации индекса технического состояния конструкции дорожной одежды с коэффициентом надежности; алгоритмы статистической обработки выборки оценок состояния нежесткой дорожной одежды. Адекватность теоретических моделей и методов подтверждена лабораторными экспериментами и испытаниями на автомобильных дорогах общего пользования. Разработана методика поиска, позиционирования и идентификации скрытых трещин в слоях нежесткой дорожной одежды, методика оценки состояния нежесткой дорожной одежды с привлечением георадарной диагностики.

Ключевые слова: конструкция нежесткой дорожной одежды, техническое состояние, скрытая трещина, георадар, диагностика, индекс технического состояния, коэффициент вариации, надежность.

ABSTRACT

Urdzik S.M. Improving the method of non-rigid pavement technical condition assessment with the involvement of GPR diagnostics. - Manuscript.

Thesis for the degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy – PhD) on a specialty 05.22.11 – highways and airfields. (192 – Construction and Civil Engineering). – Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

Contains a model for assessing the technical condition of pavement, based on the main working hypothesis of the study on the existence of a functional relationship between the results of instrumental diagnostics of pavement, including electro-physical parameters of pavement materials and pulse signals of GPR, and road pavements design strength and reliability characteristics. The proposed model is based on: methods of GPR diagnostics of pavement; methods of numerical modeling of stress-strain state (SS-state) of the pavement construction; statistical and probabilistic methods for assessing the technical condition of

the pavement structure. The solution of the problem of detection, positioning and identification of subsurface cracks in the layers of pavement is proposed and criteria for assessing the technical condition of pavement - technical condition index by involving the theoretical and probabilistic approach and methods of statistical processing of instrumental measurements, which allowed to take into account variations in the parameters of pavement layers, heterogeneity of stress-strain and assess the reliability of pavement design.

Laboratory experiments and tests on public roads confirmed the theoretical provisions of the method of assessing the technical condition of non-rigid pavement, which involves the results of GPR diagnostics, and proved the adequacy of the developed models. The relative error in determining the depth of the cracks is from 1 % to 7 %.

According to the results of numerical modeling of SS-state of the pavement structure, it was possible to establish: the most dangerous position of the load relative to the through and hidden crack; the crack opening width and the minimum modulus of elasticity of the crack filling material, which reduces the tensile stresses on the soft fiber of the package of upper pavement layers. The connection between the indicators of heterogeneity of the pavement structure, are determined by the results of GPR diagnostics and numerical modeling, the index of the technical condition of the pavement structure and its limit values. Limit values of coefficient of variation and index of technical condition of road construction for roads of different categories are determined, based on the provisions of reliability theory, risk theory and regulatory documents requirements and allow to determine the reliability of road pavements with cracks in the upper layers and reinforced base layers.

Methods of GPR diagnostics and assessment of technical condition of non-rigid pavements with the use of GPR sounding data are developed. The practical method of searching, positioning and identification of the subsurface cracks in the upper layers of non-rigid pavement includes the procedure for GPR survey and processing of the pulsed signals of GPR during solving the problems of defectoscopy of non-rigid pavements. The method of assessing the condition of non-rigid pavement using GPR sounding data is based on the results of GPR diagnostics and numerical simulation of SS-state of non-rigid pavement with cracks in the upper layers and reinforced base layers and allows to assess the technical condition of pavement design taking into account its heterogeneity state; risk of destruction; reliability of construction of road pavements; the coefficient of variation of the pavement technical condition index.

The expected economic effect of reducing the cost of inspection of non-rigid pavement due to the use of non-destructive method of GPR diagnostics is 690.04 UAH / km. If the volume of surveys reaches 100 km / year, the expected economic effect from the introduction of the method of GPR diagnostics will be 455,004 thousand UAH / year 100 km. The potential economic effect of the introduction of the method of assessing the technical condition of pavement with the use of GPR sounding data is provided by reducing transport and operating costs (293,754 thousand UAH / km year), increasing the service life of pavement due to the completeness of GPR diagnostics, the ability to assess structural reliability road clothing.

Key words: construction of non-rigid pavement, technical condition, subsurface crack, GPR, diagnostics, technical condition index, coefficient of variation, reliability.

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

**ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ НЕЖОРСТКОГО
ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ
ГЕОРАДАРНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

УРДЗІК Сергій Миколайович

Відповідальний за випуск *Коваленко Л.О.*

Підписано до друку _____ 2020 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman Суг. Віддруковано на ризографі
Ум. друк. арк. 1,8.
Зам. № ___/14. Тираж 100 прим. Ціна договірна

ВИДАВНИЦТВО

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Ярослава Мудрого, 25.
Тел. /факс: (057)700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua**

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04 2002 р.