

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно - дорожній університет

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно - дорожній університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УРДЗІК СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 625.7/.8

ДИСЕРТАЦІЯ
ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ІЗ
ЗАЛУЧЕННЯМ ГЕОРАДАРНОЇ ДІАГНОСТИКИ

05.22.11 – Автомобільні шляхи та аеродроми

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.М. Урдзюк

Науковий керівник Батракова Анжеліка Геннадіївна, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Урдіз С.М. Оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики. – Кваліфікаційна наукова праця 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.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження; сформульовано наукове завдання дослідження, наведено мету та задачі, предмет та об'єкт дослідження; зазначено зв'язок роботи із науковими програмами (планами, темами); сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів; наведено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі за результатами критичного аналізу досліджень, які присвячені вирішенню наукової задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, та узагальнення результатів георадарної діагностики, що проведена автором (з 2010 р. по 2020 р.) на автомобільних дорогах загального користування, обґрунтовано основний напрямок розроблення моделей та методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу – розроблення критеріїв і методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у покритті та шарах основи, що спираються на:

а) інформацію про всю сукупність параметрів, що визначають здатність конструкції дорожнього одягу опиратися дії транспортного навантаження та погодно-кліматичних факторів, в тому числі про локалізацію тріщин у шарах з монолітних матеріалів та їх геометричні параметри, що вимагає розвитку інструментальних методів діагностики;

б) методи розрахунку показників напружено-деформованого стану дорожнього одягу з урахуванням наявних руйнувань;

в) положення теорії надійності та теорії ризику, які дозволяють врахувати неоднорідність конструкції дорожнього одягу, що обумовлена, в тому числі, наявністю тріщин у шарах з монолітних матеріалів.

Доведено, що найбільший потенціал стосовно вирішення завдання пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу мають георадари, переваги яких забезпечуються високою роздільною здатністю та швидкістю зйомки, безперервністю збору даних, можливістю застосування до широкого спектру дорожньо-будівельних матеріалів.

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

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

б) методах чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу, що залучають вихідні дані про внутрішню будову та приховані неоднорідності шарів дорожнього одягу, які отримані за результатами георадарної діагностики;

в) статистичних та імовірнісних методах оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, які дозволяють врахувати неоднорідність геометричних і фізико-механічних параметрів конструкції.

Запропоновано розв'язок задачі пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах дорожнього одягу, що передбачає розвиток та удосконалення методів застосування антенних блоків і методів обробки та аналізу поляризаційного стану імпульсних сигналів георадару.

Розроблено показники і критерії оцінювання стану дорожнього одягу

(індекс технічного стану і коефіцієнт варіації індексу технічного стану) шляхом залучення теоретико-імовірнісного підходу та методів статистичної обробки результатів інструментальних вимірювань, що дозволило врахувати варіацію параметрів шарів дорожнього одягу, неоднорідність показників напружено-деформованого стану та оцінити надійність конструкції дорожнього одягу, яка ґрунтується на встановленому зв'язку між коефіцієнтом надійності та індексом технічного стану дорожнього одягу. Застосування теорії ризику до задачі оцінювання стану дорожнього одягу дозволило встановити граничні значення індексу технічного стану і коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу, за яких імовірність відмови дорожнього одягу відповідає граничному ризику руйнування.

Метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики складається з: методів 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; критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу.

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.

Розроблено схему зондування дорожнього одягу та обробки сигналів георадару під час вирішення завдання дефектоскопії, обґрунтовано параметри георадарної зйомки та встановлено основні вимоги до георадарного зондування. Лабораторними експериментами та випробуваннями на автомобільних дорогах загального користування підтверджено адекватність моделей пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах з монолітних

матеріалів. Відносна похибка визначення глибини розташування тріщин становить від 1 % до 7 %.

За результатами чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу обґрунтовано параметри моделі оцінювання стану 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.

Запропоновано підходи до розрахунку дорожнього одягу з наскрізними тріщинами у покритті за критеріями міцності: 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.

Встановлено зв'язок між показниками неоднорідності конструкції дорожнього одягу, що визначаються за результатами георадарної діагностики і чисельного моделювання, індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу та його граничними значеннями. Визначено граничні значення коефіцієнту варіації (CV_{zp}) та індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (TCI_{zp}) для автомобільних доріг різних категорій, що спираються на положення теорії надійності, теорії ризику і вимоги нормативних документів та дозволяють визначити надійність конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів за заданим або встановленим за результатами діагностики коефіцієнтом варіації та індексом технічного стану.

Підтверджено адекватність моделі оцінювання стану дорожнього одягу за результатами георадарної діагностики шляхом: формування 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 встановлення

однорідності вибірки з рівнем значимості $\alpha=0,05$; зіставленням розподілу фактичних значень індексу технічного стану, що визначений за результатами діагностики, з теоретичним розподілом функції індексу технічного стану, що отриманий методом генерації випадкових чисел для нормального закону розподілу.

У четвертому розділі розроблено практичні методики георадарної діагностики та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із застосуванням даних георадарного зондування.

Методика пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу містить у собі порядок проведення георадарного обстеження та обробки імпульсних сигналів георадару під час вирішення завдань дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу. Методика оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики спирається на інформацію про будову та неоднорідність дорожнього одягу, чисельне моделювання НДС нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах покриття та основи і дозволяє оцінити стан конструкції дорожнього одягу з урахуванням його неоднорідності за системою показників: індексом технічного стану; коефіцієнтом варіації індексу технічного стану; ризиком руйнувань; надійністю конструкції дорожнього одягу.

Розроблено порядок обґрунтування обсягу вибірки оцінок стану дорожнього одягу, основу якого складають процедури оцінювання однорідності вибірки та визначення мінімальної кількості елементів вибірки, що забезпечує достовірність оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за заданій погрішності вимірювань і відповідає 0,95 довірчій імовірності за критерієм Стьюдента.

Очікуваний економічний ефект від зниження собівартості 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 дорожнього одягу із залученням даних георадарного зондування забезпечується скороченням транспортно-експлуатаційних витрат (207,763 тис. грн./км·рік.), збільшенням строку служби дорожнього одягу через повноту даних георадарної діагностики, можливістю оцінювання надійності конструкції дорожнього одягу, що забезпечує достовірність оцінки фактичного стану дорожнього одягу та сприяє розробленню обґрунтованих проєктних рішень.

Результати дисертаційного дослідження захищені двома патентами України та впроваджені у три нормативних документи Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор».

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

ABSTRACT

Urdzik S.M. Non-rigid pavement condition assessment with the involvement of GPR diagnostics. - Manuscript qualification scientific work.

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 Road University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

In the introduction relevance of the research topic is justified; the scientific objectives of the investigation are formulated, goals and objectives of the research are given; the connection of work with scientific programs (plans, topics) is noted; scientific novelty and practical relevance of the obtained results are formulated; the structure and scope of the dissertation are also given.

The first section substantiates the main direction of the investigation based on the results of critical analysis of research devoted to solving the scientific problem of assessing the condition of non-rigid pavement construction and generalizing the results of ground penetrating radars (GPR) diagnostics provided by the author (from 2010 to 2020) on the public roads of Ukraine; improvement of models and methods of the non-rigid pavement construction condition assessment - development of criteria and methods of assessment of condition of non-rigid pavement with cracks in the pavement and reinforced base layers, which are based on:

a) information on the whole set of parameters that determine the ability of road pavement to resist the influence of transport load and weather and climatic factors, including the location of cracks in monolithic upper layers and reinforced base layers and their geometric parameters, which requires the development of instrumental diagnostic methods;

b) methods of calculating the indicators of stress-strain condition of pavement, taking into account the existing distresses;

c) the provisions of the theory of reliability and the theory of risk, which allows to take into account the heterogeneity of the pavement construction, which is due,

inter alia, the presence of cracks in the pavement and reinforced layers of the base.

GPR have been shown to have the significant potential for solving the problem of finding, positioning and identifying cracks (including the subsurface ones) in layers of non-rigid pavement, the advantages of which are provided by high resolution and laboratory movement speed, data collection continuity, the ability to apply to a wide range of the investigated road construction materials.

The second section contains a model for assessing the 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:

a) methods of GPR diagnostics of pavement, which allows one to obtain initial data on the thickness of the structural layers of pavement, the presence of cracks in the monolithic layers of the pavements and reinforced layers of the base;

b) methods of numerical modeling of stress-strain state (SS-state) of the pavement construction, which involve the initial data on the internal structure and hidden inhomogeneities in the pavement layers, which are obtained by the results of GPR diagnostics;

c) statistical and probabilistic methods for assessing the condition of the pavement structure, which allows one to take into account the heterogeneity of geometric, physical and mechanical parameters of pavement.

The solution of the problem of detection, positioning and identification of subsurface cracks in the layers of pavement is proposed, which involves the development and improvement of methods of application of antenna blocks and methods of processing and analysis of the polarization state of pulsed signals of GPR.

Are proposed indexes and criteria for assessing the condition of pavement (technical condition index and coefficient of variation of the 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, which is based on the established relationship between the reliability factor and the index of condition of pavement. The application of risk theory to the problem of assessing the condition of pavement allowed establishing the limit values of the index of technical condition of pavement design and the coefficient of variation of the technical condition index, at which the probability of failure of pavement corresponds to a borderline risk of destruction.

The improved method of assessing the condition of pavement with the involvement of the results of GPR diagnostics consists of: a set of methods for processing the results of GPR sounding and obtaining data on the structure and condition of the structural layers of pavement; numerical modeling of SS-state of the design of pavement with cracks and on a cracked basis; criteria and methods for assessing the condition of non-rigid pavement.

In the third section, experimental studies confirmed the theoretical provisions of the method of assessing the condition of non-rigid pavement, which involves the results of GPR diagnostics, and proved the adequacy of the developed models: detection, positioning and identification of subsurface cracks in the layers of non-rigid pavement; assessment of the impact of cracks on the SS-state of the construction of non-rigid pavement and the related condition of the construction of pavement with cracks in the monolithic layers of the coating and reinforced layers of the base.

The scheme of sounding of the pavement structure and processing of GPR signals during the solution of the defectoscopy problem is developed, the parameters of GPR survey are substantiated and the basic requirements for GPR sounding are established. Laboratory experiments and tests on public roads have confirmed the adequacy of models for finding, positioning and identifying hidden cracks in monolithic coating layers and reinforced base layers. 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, the parameters of the pavement condition assessment model are substantiated and the results set is the following: 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.

Approaches to the calculation of pavement with top-down cracks in the pavement according to the strength criteria are proposed: reducing the actual thickness of the layer with a crack from 5,5 % to 8 %; reducing the shear stress in layers of unbound materials in 2,4 – 2,6 times; reducing the ultimate shear stress in the soil of the sub layer by 1,1 – 1,6 times depending on soil moisture and moisture sources.

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 (CV_{zp}) and index of technical condition of road construction (TCI_{zp}) 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. according to the coefficient of variation and the index of technical condition set or established according to the results of diagnostics.

The adequacy of the model of road condition assessment based on the results of GPR diagnostics was confirmed by: formation of a large sample of actual values of the road condition technical index with coefficient of variation of initial data from 7 % to 25 % and coefficient of technical condition index of road structure from 2 % to 8 % and establishing the homogeneity of the sample with a significance level $\alpha=0,05$; comparing the distribution of the actual values of the index of technical condition, determined by the results of diagnostics, with the theoretical distribution of the function of the index of technical condition, obtained by the method of generating random numbers for the normal distribution law.

In the fourth section practical methods of GPR diagnostics and assessment of condition of non-rigid pavements with the use of GPR sounding data are developed.

The 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 condition of pavement design taking into account its heterogeneity state: pavement technical condition index; the coefficient of variation of the pavement technical condition index; risk of destruction; reliability of design of road pavements.

A procedure for substantiation of the sample size of road condition technical condition estimates is developed, which is based on procedures for assessing sample homogeneity and determining the minimum number of sample elements, which ensures the reliability of road condition design assessment for a given measurement error and corresponds to 0,95 confidence probability according to Student's criterion.

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 costs of developing, testing and adjusting the GPR setup are recouped in one year, provided that 35 km of roads are inspected. The potential economic effect of the introduction of the method of assessing the condition of pavement with the use of GPR sounding data is provided by reducing transport and operating costs (207,763 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, which ensures the reliability of the assessment of the actual condition of road pavements and promotes the development of justified design solutions.

The results of the dissertation research are protected by two patents of Ukraine and introduced in three normative documents of the State Agency of Automobile Roads of Ukraine «Ukravtodor».

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

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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. ISBN 9781466586574 (*Видання входить до наукометричної бази Scopus*).

2. 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. *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. Частина 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*)

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 «Одяг» 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. Харьков, 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 науковометричної 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.

ЗМІСТ

Вступ	22
Розділ 1 Аналіз методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу	32
1.1 Передумови дослідження	32
1.2 Нормування методів та критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами	38
1.3 Методи оцінювання впливу тріщин на показники міцності і деформативності нежорсткого дорожнього одягу	45
1.3.1 Теоретичні методи оцінювання впливу наскрізної тріщини на стан дорожнього одягу	46
1.3.2 Емпіричні моделі оцінювання впливу тріщини на стан дорожнього одягу	49
1.3.3 Імовірнісний підхід до врахування впливу руйнувань покриття на стан дорожнього одягу	56
1.4 Чисельні методи аналізу напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу	60
1.5 Аналіз сучасних методів і засобів діагностики нежорсткого дорожнього одягу	63
1.5.1 Порівняльний аналіз методів і засобів діагностики	63
1.5.2 Аналіз можливостей застосування георадарів для вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин	67
1.5.3 Аналіз методів обробки даних георадарного зондування	71
1.6 Висновки по розділу. Цілі і завдання дослідження	74
Розділ 2 Теоретичні положення оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарного зондування	77

2.1	Задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарного зондування	77
2.2	Постановка задач пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах дорожнього одягу з монолітних матеріалів	78
2.2.1	Постановка задачі пошуку і позиціонування тріщин методом георадарного зондування дорожнього одягу	79
2.2.2	Математичні моделі пошуку та позиціонування прихованих тріщин	84
2.2.3	Алгоритм обробки імпульсних сигналів при вирішенні задач ідентифікації прихованих тріщин	87
2.3	Моделі і методи розрахунку напружено-деформованого стану дорожнього одягу з тріщинами у покритті та шарах основи	90
2.3.1	Основні теоретичні положення розрахунку НДС дорожніх одягів	90
2.3.2	Обґрунтування параметрів скінчено-елементної моделі	94
2.3.2.1	Обґрунтування представницького об'єму	94
2.3.2.2	Граничні умови	96
2.3.2.3	Види елементів	97
2.3.3	Модель конструкції дорожнього одягу	98
2.4	Модель оцінювання стану дорожнього одягу	101
2.4.1	Постановка задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики	102
2.4.1.1	Критерії оцінювання стану дорожнього одягу	102
2.4.1.2	Врахування впливу тріщин на несучу здатність дорожнього одягу	109
2.4.2	Імовірнісна модель оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу	112
2.4.3	Критерії граничного стану дорожнього одягу	117

2.5	Метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики	122
2.6	Висновки по розділу	125
Розділ 3	Експериментальні дослідження параметрів теоретичних моделей щодо оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу	127
3.1	Завдання експериментальних досліджень	127
3.2	Перевірка адекватності моделей пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу	128
3.2.1	Обладнання та програмне забезпечення	128
3.2.2	Лабораторні дослідження	130
3.2.2.1	Обґрунтування методики отримання даних георадарного зондування	130
3.2.2.2	Оцінка адекватності моделі пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин	134
3.2.3	Польові дослідження	137
3.3	Дослідження впливу тріщин у монолітних шарах на показники поточного стану конструкції дорожнього одягу	143
3.3.1	Обґрунтування положення навантаження у розрахунках НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами ...	146
3.3.1.1	Оцінка впливу положення навантаження відносно наскрізної тріщини	146
3.3.1.2	Оцінка впливу положення навантаження відносно прихованої тріщини	149
3.3.2	Чисельне моделювання впливу геометричних параметрів тріщини на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу	155
3.3.3	Моделювання впливу відстані між тріщинами на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу	158

3.3.4	Моделювання впливу тріщин на напружено-деформований стан шарів із незв'язаних матеріалів і ґрунтів земляного полотна	161
3.3.5	Адекватність моделей оцінювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу з тріщинами	166
3.4	Аналіз параметрів моделі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу	170
3.4.1	Визначення граничних значень індексу технічного стану	170
3.4.2	Аналіз впливу показників неоднорідності на стан нежорсткого дорожнього одягу	173
3.4.2.1	Аналіз впливу коефіцієнту варіації на надійність конструкції дорожнього одягу	174
3.4.2.2	Перевірка адекватності моделі оцінювання стану дорожнього одягу за результатами діагностики	178
3.5	Висновки по розділу	184
Розділ 4	Рекомендації щодо практичного застосування результатів дослідження	188
4.1	Методика пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу	188
4.2	Методика оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики	192
4.3	Економічна ефективність впровадження результатів дисертаційного дослідження	198
4.3.1	Економічна ефективність застосування методу георадарного зондування дорожнього одягу під час вирішення завдань дефектоскопії	198
4.3.2	Економічна ефективність застосування методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики	202
4.4	Висновки по розділу	208

Загальні висновки	210
Список використаних джерел	214
Додаток А. Оцінювання відтворюваності результатів вимірювань	253
Додаток Б. Результати георадарного зондування на автомобільних дорогах загального користування	260
Додаток В. Індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг загального користування	273
Додаток Г. Довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження	285
Додаток Д. Метрологічна атестація засобів вимірювання, використаних у дослідженні	295

ВСТУП

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 TEN-T. Разом з тим, за даними Міністерства інфраструктури України, 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 (Постанова КМУ № 430-р від 30.05.2018 р.) визначено першочергові завдання щодо введення європейських стандартів з проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг з метою покращення їх транспортно-експлуатаційного стану, 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 загального користування, яка дозволяє приймати обґрунтовані управлінські та проектні рішення з будівництва та ремонту автомобільних доріг, розподілу матеріальних і фінансових ресурсів. Невідповідність методів оцінювання стану автомобільних доріг реальним процесам у конструкції дорожнього одягу та земляного полотна знижує ефективність ремонтних та будівельних заходів. Тому очевидною стає необхідність впровадження у практику проектування, будівництва та ремонту автомобільних доріг, контролю якості дорожніх робіт сучасних методів та засобів неруйнівної діагностики, розвитку методів оцінювання стану автомобільних доріг, що базуються на найбільш повному та достовірному наборі даних про фактичний стан дорожнього одягу та земляного полотна і дозволяють підвищити ефективність проектних рішень з будівництва і ремонту автомобільних доріг.

На доданок до інструментальних методів, що традиційно застосовуються під час діагностики автомобільних доріг, в останній час у світовій практиці набуває поширення метод георадарного зондування для вирішення трьох основних завдань: визначення будови дорожнього одягу; виявлення неоднорідностей у ґрунтах земляного полотна; встановлення причин передчасного руйнування дорожнього одягу та земляного полотна. 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 тріщини у шарах покриття та шарах основи дозволяє попередити руйнування дорожнього одягу та істотно скоротити витрати на ремонти автомобільних доріг. Потреба у вирішенні завдань дефектоскопії дорожнього одягу із застосуванням методів неруйнівної діагностики існує під час оцінювання фактичного стану нежорсткого дорожнього одягу, розроблення проектів будівництва, реконструкції, капітального ремонту 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 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, а саме: «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 відповерхневого 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.

Задачі дослідження. 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, який, 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 проектних 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 проектування, 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 Дніпропетровської 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 проектування автомобільних доріг», лабораторні та практичні заняття, курсове і дипломне проектування, 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 монолітних шарах, 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, здобувачеві належить:

– аналіз методів та технічних засобів діагностики дорожніх одягів [149, 315, 361, 362];

– розроблення лабораторних моделей, проведення лабораторних георадарних вимірювань, розроблення методу оброблення імпульсних сигналів георадару [323, 312, 316, 377];

– удосконалення алгоритму пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин [295, 311, 312];

– 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 [266, 310, 314, 315, 361, 363];

– чисельне моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у покритті та зміцнених шарах основи [307], встановлення параметрів розрахункових моделей [373], оцінювання впливу прихованих тріщин на НДС конструкції дорожнього одягу [66, 308], розроблення способу врахування прихованих тріщин у розрахунках нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності [65];

– визначення показників стану дорожнього одягу, дослідження закономірностей їх змінювання та розроблення методики оцінювання стану дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики [309, 330, 346, 386].

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» (Пермь, 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 щорічній науково-технічній конференції 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

1.1 Передумови дослідження

Дорожні агентства всього світу відмічають «старіння» національної мережі автомобільних доріг та прискорене руйнування дорожнього одягу у процесі експлуатації через зміни у складі транспортного потоку, які призводять до збільшення величини та кількості прикладань розрахункового навантаження, а також через зростання вартості ресурсів, обмеженість фінансування та дефіцит коштів на утримання і ремонт автомобільних доріг. У цих умовах основною проблемою є забезпечення нормативного транспортно-експлуатаційного стану дорожнього одягу протягом строку служби. Як доводять результати досліджень європейських [1, 2] і вітчизняних вчених [3-6], вирішення означеної проблеми слід розглядати з урахуванням проектних, технологічних, експлуатаційних і матеріалознавчих факторів [7-10]. При цьому особливого значення набувають питання оцінювання стану дорожнього одягу за показниками, які визначають несучу здатність, надійність і довговічність дорожнього одягу, що стимулює дорожні агентства всього світу до розвитку систем діагностики, впровадження сучасних засобів неруйнівного контролю.

Основними показниками, що визначаються на етапі передпроектних вишукувань, є загальний еквівалентний модуль пружності конструкції нежорсткого дорожнього одягу [11, 12] і дефектність покриття [13], що визначається методами візуальної оцінки [14] та інструментальних вимірювань деформацій і руйнувань. Нормативні документи, що регламентують методи розрахунку дорожніх одягів у проєктах ремонту, спираються виключно на коефіцієнт запасу міцності за допустимим пружним прогином як основний показник, що характеризує його несучу здатність. Такий підхід у ряді випадків є недостатнім. Як свідчать численні дослідження і досвід експлуатації

автомобільних доріг з нежорстким дорожнім одягом [15-20], передчасне руйнування дорожнього одягу відбувається не тільки через невідповідність критерію міцності за допустимим пружним прогином, а й внаслідок накопичення неприпустимих деформацій у ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язаних матеріалів [21, 22], втрати розподільчої здатності шарів покриття [23-25], зниження у процесі експлуатації здатності монолітних шарів чинити опір напруженням розтягу. Тому оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу повинне спиратися на інформацію про всю сукупність параметрів, що визначають фактичні міцнісні і деформаційні властивості матеріалів конструктивних шарів і ґрунтів земляного полотна, що, у свою чергу, вимагає розвитку інструментальних методів та обґрунтування критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу.

Для оцінювання міцності дорожнього одягу застосовуються дві групи методів, що розрізняються за характером навантаження [26]. Вимірювання чаші прогину під колесом автомобіля дозволяє визначити модуль пружності земляного полотна і модуль пружності на поверхні основи. При цьому модуль пружності земляного полотна визначається як середньоарифметичне від значень пружного прогину, вимірюваного на відстані від 0,9 м до 2,4 м від центру прикладання навантаження [27, 28]. Запропоновано визначати модуль пружності нежорсткого дорожнього одягу за результатами випробувань у нерозрахунковий період з урахуванням вологості ґрунту земляного полотна і температури покриття [29]. Разом з тим, для міцності характерна виражена мінливість, що змушує накопичувати вибірки даних для її оцінювання. Крім того, під час випробувань дорожнього одягу досить складно виміряти прогин під колесом автомобіля, що рухається [30], а вимірювання прогину на покритті з деформаціями і руйнуваннями призводить до значного розкиду одержуваних даних і зниження вірогідності результатів вимірювань.

Отже, вимірний прогин дорожнього одягу може істотно відрізнятися від реального, що викликає необхідність залучення нових технічних засобів і методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу. Відзначимо також,

що випробування не відображають повною мірою напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу [31], а параметри, що отримані під час випробувань [32, 33], не дозволяють оцінити відповідність конструкції дорожнього одягу критеріям опору монолітних шарів розтягу при згині, а також величину дотичних напружень, що діють у шарах з незв'язних матеріалів і ґрунтах земляного полотна. Таким чином, незважаючи на існування безлічі методів оцінювання міцності дорожнього одягу [34 - 38], універсального методу на даний час не існує. Нові матеріали, технології та зміна умов експлуатації автомобільних доріг вимагають подальших наукових досліджень у цій галузі.

Найбільш поширеним методом отримання інформації про руйнування і деформації покриття є метод візуальної оцінки, що здійснюється за допомогою відеозйомки [39] та дозволяє оцінити дефектність покриття [40]. Показник дефектності вважається основним параметром, що визначає коефіцієнт надійності дорожнього одягу [40 - 44]. У [45] відзначено, що тріщини (різної конфігурації, глибини, походження) є найбільш характерним видом руйнувань дорожніх покриттів, складають до 60 % від загальної площі руйнувань та є основною небезпекою як початкова стадія більш серйозних руйнувань, що призводять до втрати розподільчої здатності покриття. Дослідженнями [46, 47] встановлений зв'язок між станом дорожнього одягу за показником дефектності покриття і коефіцієнтом запасу міцності. Розроблено моделі, що враховують зв'язок між руйнуваннями покриття, коефіцієнтом запасу міцності і товщиною шарів підсилення [48]. Зв'язок показника стійкості асфальтобетонних шарів до впливу транспортного навантаження та природно-кліматичних факторів з рівнем пошкоджуваності покриття відображений у [49]. Розроблено метод визначення коефіцієнту запасу міцності за середньою відстанню між тріщинами [50]. Незважаючи на значну кількість проведених досліджень, у розрахунках дефектності не враховується вид тріщин, їх локалізація, ширина розкриття, тоді як зниження міцності і строк служби дорожнього одягу з різним характером тріщин значно різняться і вимагають проведення різних ремонтних заходів [27].

Як зазначено в [51], для підвищення довговічності дорожнього одягу необхідно встановити норми допустимої дефектності та виходити з можливої наявності у перерізі дорожнього покриття небезпечних невиявлених дефектів, таких як приховані тріщини. Професор І.І. Леонович [13, 27] також наголошує на необхідності врахування впливу прихованих тріщин на надійність і довговічність дорожнього одягу. Під прихованими дефектами розуміються руйнування, для виявлення яких у нормативній документації, обов'язкової для даного виду контролю, не передбачені правила, методи і засоби [13, 27].

Як довели результати георадарних обстежень, проведених автором на автомобільних дорогах України, найбільш характерними прихованими руйнуваннями нежорсткого дорожнього одягу є тріщини у шарах з монолітних матеріалів (табл. 1.1). Приховані та наскрізні тріщини значно впливають на напружено-деформований стан дорожнього одягу [52 - 61]. У зв'язку з цим в останні роки активно розвиваються дослідження, що присвячені механізмам руйнування і прогнозування довговічності матеріалів з тріщинами [62 - 67], які спираються на теоретичні положення механіки деформованого твердого тіла.

Оскільки конструкція дорожнього одягу являє собою складну плоскошарувату систему, що характеризується значною неоднорідністю за геометричними параметрами шарів і фізико-механічними характеристиками матеріалів, то теоретичні рішення містять в собі погрішності. Відзначимо також, що залучення математичного апарату механіки руйнувань для розв'язання задачі оцінювання стану конструкції дорожнього одягу вимагає експериментального визначення цілого ряду коефіцієнтів. Але, методика визначення таких коефіцієнтів не наводиться, що ускладнює практичне застосування запропонованих методів [62 - 67].

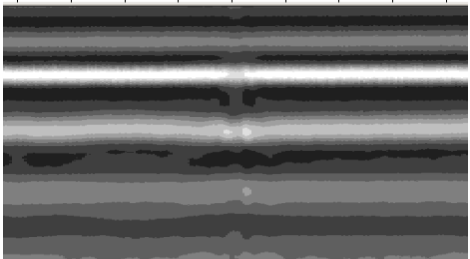

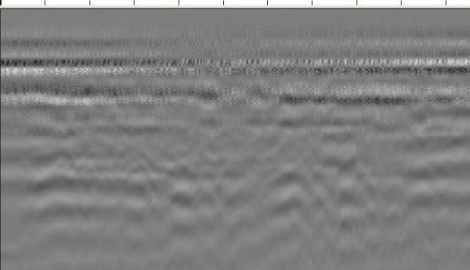

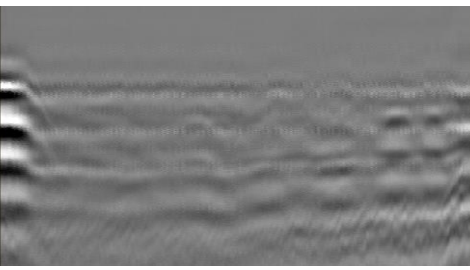

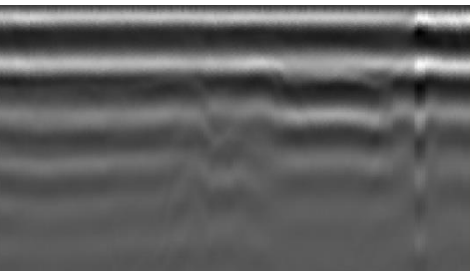

Таким чином, для достовірної оцінки стану нежорсткого дорожнього одягу, що знаходяться в експлуатації тривалий строк, необхідні:

а) інформація не тільки про зовнішні (видимі), але й про приховані (що не спостерігаються візуально) руйнування конструкції. Така інформація необхідна також й у випадках, коли приховані неоднорідності не є наслідком руйнування

(шви в бетонній основі), але негативно впливають на умови роботи шарів покриття і основи з монолітних матеріалів;

- б) методи і критерії оцінки фактичного стану дорожнього одягу;
- в) методи розрахунку дорожнього одягу на тріщинуватій основі.

Таблиця 1.1 – Види руйнувань на автомобільних дорогах загального користування

Руйнування	Радарограма	Візуальна оцінка дефектності
Відбиті тріщини на покритті		
Блочна основа на початковій стадії розвитку тріщин у покритті		
Руйнування основи та втрата зчеплення між шарами у покритті		
Приховані тріщини у шарах основи та наскрізні тріщини		

До недавнього часу оцінювання впливу прихованих тріщин на надійність конструкції дорожнього одягу не проводилося з таких причин (рис. 1.1):

- а) відсутність засобів неруйнівної діагностики, що дозволяють у режимі реального часу виявляти такі руйнування;
- б) недосконалість математичного апарату розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) конструкції дорожнього одягу з тріщинами;
- в) відсутність методів врахування прихованих руйнувань у розрахунках нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності.

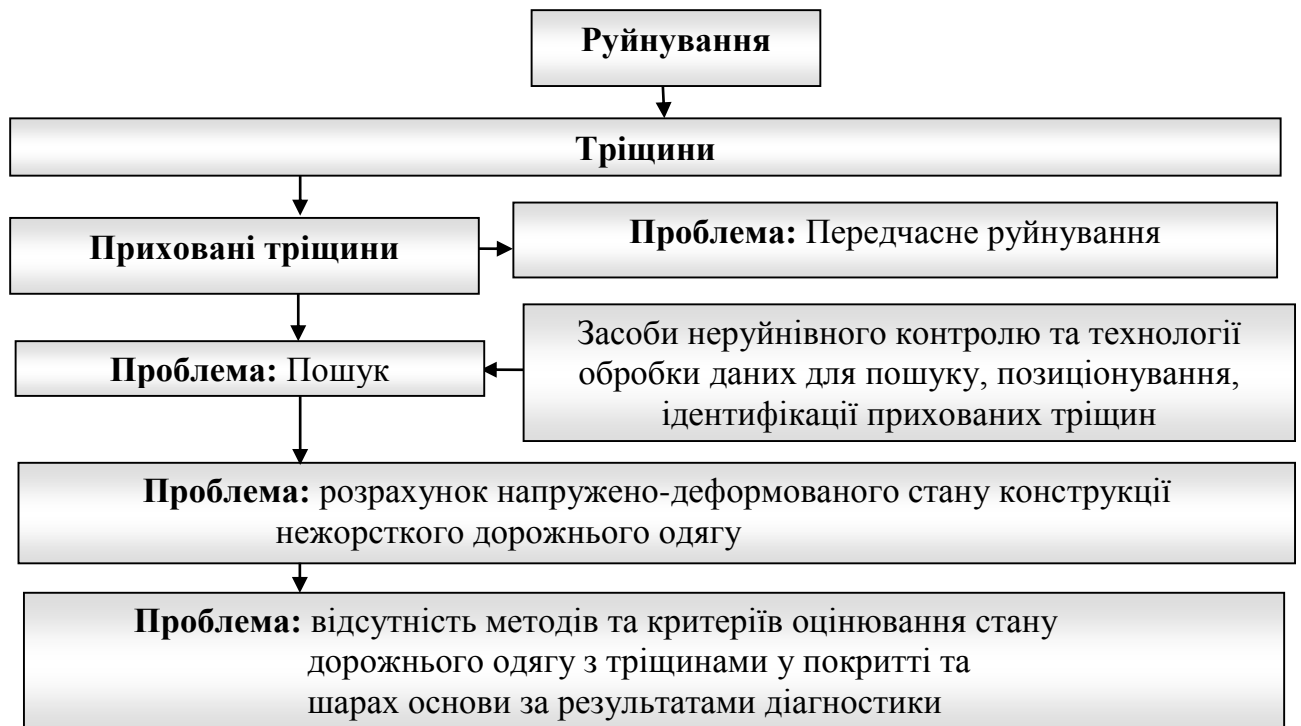


Рисунок 1.1 – Проблеми оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у монолітних шарах

Прогрес у галузі обчислювальної техніки й програмного забезпечення уможливив проведення чисельних розрахунків НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами. Розвиток засобів неруйнівного контролю і методів обробки інформації забезпечили можливість застосування георадарів для вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин. Зазначені фактори створили об'єктивні передумови для розвитку методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, що ґрунтуються на результатах неруйнівної діагностики та вимагають:

а) створення методів і методик інтерпретації та застосування результатів діагностики поточного стану нежорсткого дорожнього одягу;

б) визначення показників стану конструкції дорожнього одягу з тріщинами (у тому числі прихованими) методами чисельного моделювання її напружено-деформованого стану (НДС);

в) розроблення методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за критеріями, що враховують, у тому числі, наявність прихованих тріщин у шарах з монолітних матеріалів;

г) розроблення рекомендацій щодо врахування впливу прихованих тріщин у розрахунку нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності.

Вирішення зазначених завдань повинне спиратися на результати аналізу теоретичних і чисельних рішень, можливості засобів неруйнівного контролю та методи обробки результатів діагностики.

1.2 Нормування методів та критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами

У моделях з оцінювання стану дорожнього одягу, що ґрунтуються на механіко-емпіричному підході, найбільш критичними є втомне руйнування і колієутворення [19], оскільки у більшості аналітичних методів критерії проектування та оцінювання встановлюються саме за цими видами відмови [68]. Втомне розтріскування являє собою комбінацію процесів зародження і поширення тріщини (рис. 1.2). Це формує основу для двох різних напрямків розроблення механістичних моделей з нормування методів оцінювання та прогнозування довговічності асфальтобетонного покриття:

а) моделі на основі механіки руйнування;

б) моделі пошкоджуваності матеріалу.

Основу моделей швидкості поширення тріщин становить припущення, що поширення тріщин є домінуючим явищем у втомному розтріскуванні. В основу концепції безперервного пошкодження покладено теоретичні

положення механіки в'язкопружного руйнування матеріалів, згідно з якою домінуючим явищем у втомному розтріскуванні є зародження тріщин.

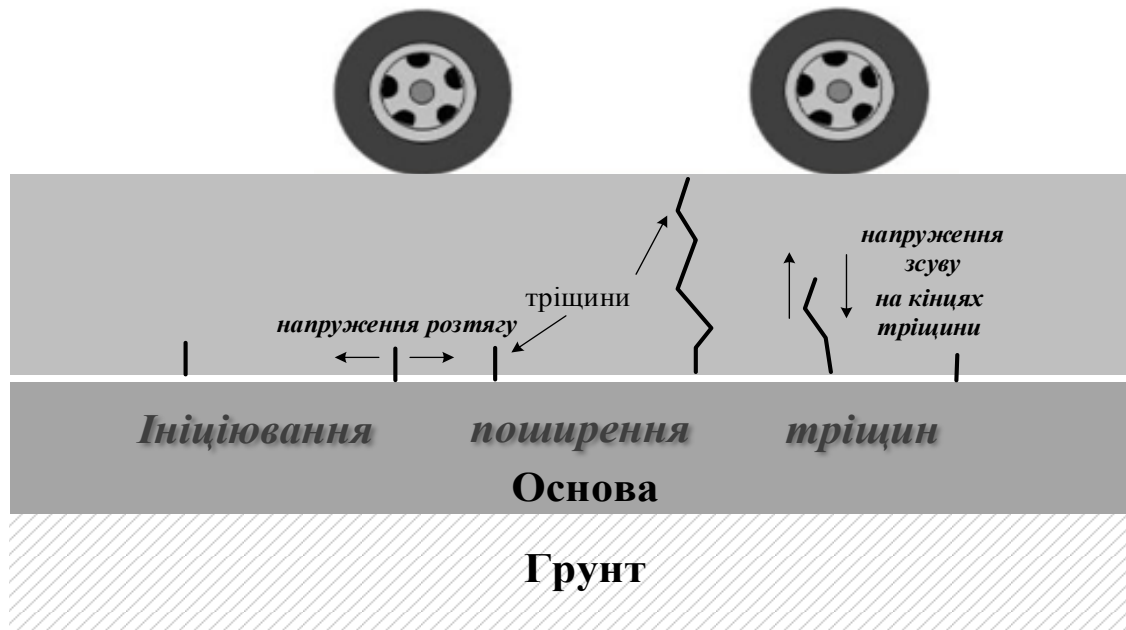


Рисунок 1.2 – Зародження та розвиток тріщин під дією транспортного навантаження [38, 70]

Метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу, розроблений у 60-70-х роках науковими школами МАДІ, ХАДІ, СоюздорНІІ та ін., дозволив врахувати природно-кліматичні умови, склад транспортного потоку та інтенсивність руху, а також властивості матеріалів конструктивних шарів. Метод заснований на розрахунку міцності дорожнього одягу за трьома критеріями [71, 72] граничного стану. У ГБН В.2.3-37641918-559:2019 [73] за критерій втомного руйнування прийнятий критерій опору розтягу при згині монолітних шарів. Втомні явища описуються коефіцієнтом k_{kn} , що враховує короткочасність і повторюваність навантажень:

$$k_{kn} = k_{np} \cdot \sum N^{-\left(\frac{1}{m}\right)}, \quad (1.1)$$

де k_{np} – коефіцієнт, що враховує вплив повторних навантажень у нерозрахунковій період;

m – показник втоми;

$\sum N$ – сумарна інтенсивність руху, авт.

Вперше спробу оцінити зміну модуля пружності конструктивних шарів залежно від стану дорожнього одягу з руйнуваннями зробив у ХАДІ проф. А.К. Біруля [10]. У ВСН 46-72 [72] на основі експериментальних даних ХАДІ рекомендовано після візуальної оцінки стану шарів за результатами розкриття конструкції дорожнього одягу помножати розрахункові значення модуля шару на понижуючі коефіцієнти, значення яких залежать від виду дефектів та руйнувань і ступеня їх розвитку [12]. Ці результати практично без зміни увійшли до нормативних документів з проєктування нежорсткого дорожнього одягу [72] і оцінювання його стану [39]. У МАДІ отримані подібні результати, згідно з якими на зруйнованих ділянках загальний еквівалентний модуль пружності конструкції дорожнього одягу в 1,9 рази менше ніж на недеформованих ділянках. Істотним недоліком такого підходу є необхідність розкриття дорожнього одягу та наявність безлічі емпіричних коефіцієнтів, що знижує вірогідність оцінки стану дорожнього одягу.

У нормативних документах Білорусі [49], на відміну від вітчизняних підходів, зроблено спробу врахувати наявність тріщин у покритті та шарах основи конструкції дорожнього одягу:

а) розрахунком коефіцієнта надійності дорожнього одягу K_n з урахуванням дефектності покриття [49]:

$$K_n = 1 - ДП, \quad (1.2)$$

де $ДП$ – показник дефектності існуючого дорожнього одягу.

б) розрахунком розтягуючих напружень, що діють у монолітних шарах покриття з температурними тріщинами. Умова відсутності відбитих тріщин у новому покритті записується у такий спосіб [49]:

$$\sigma_T \leq \sigma_p^{sp}, \quad (1.3)$$

де σ_T – напруження у новому покритті поблизу тріщини, МПа;

σ_p^{sp} – граничне напруження розтягу, МПа.

На відміну інших нормативних документів [26, 74 - 76], такий підхід дозволяє врахувати реальний НДС конструкції.

Розвиток методів чисельного моделювання та залучення моделей механіки руйнувань дозволило сформулювати нормативні вимоги до проектування дорожніх одягів із застосуванням геосинтетичних матеріалів [77]. Основу складають теоретичні положення механіки руйнувань, сформульовані у вигляді рівняння Періса-Ердогана, що визначає швидкість зростання тріщини:

$$\frac{dc}{dN} = A \times \Delta K^n \quad (1.4)$$

де dc/dN – швидкість зростання тріщини довжиною c за один цикл навантаження N , мм/цикл;

ΔK – коефіцієнт інтенсивності напруження;

A, n – константи асфальтобетону (для неармованої конструкції $A_{неарм}, n_{неарм}$; для армованої – $A_{арм}, n_{арм}$).

Значна кількість коефіцієнтів, що визначаються експериментально, істотно ускладнює обчислення. Відзначимо також, що у такій постановці завдання розрахунок проводиться для одиночної тріщини без урахування загальної пошкодженості матеріалу і взаємного впливу тріщин.

Розрахунок напружень розтягу при згині, що виникають у асфальтобетонному покритті, нормується в [80], де розроблено номограми, що застосовуються під час розрахунку асфальтобетонних шарів на блочній жорсткій основі. При цьому не визначено розміри блоків, ширину розкриття тріщин. У нормативних документах США і Канади з розроблення проєктів ремонту нежорсткого дорожнього одягу [81] врахування тріщин здійснюється введенням понижуючих коефіцієнтів, що відображають фактичний стан

покриття на момент обстеження. При цьому передбачається, що основа з монолітних або зернистих матеріалів зберігає повну міцність [81]:

$$SN_E = (a_1 \cdot D_1) + (a_2 \cdot D_2) + (a_3 \cdot D_3) + \dots + (a_n \cdot D_n) \quad (1.5)$$

де SN_E – загальна міцність існуючих шарів покриття (структурне число);

a_1, a_2, \dots, a_n – коефіцієнти 1, 2, ..., n -го шару;

D_1, D_2, \dots, D_n – товщина 1, 2, ..., n -го шарів, дюйм.

Накопичений досвід застосування середніх значень коефіцієнтів шару для тріщинуватих асфальтобетонних покриттів свідчить про недосконалість даного методу. Як зазначають автори робіт [82 - 84], показник структурного числа для покриття з тріщинами мало ефективний, тому поширення набувають методи чисельного моделювання.

З 1977 року основним підходом до проектування та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу в Європі є механістично-емпіричний підхід [85-87], що передбачає аналіз напружень, деформацій і прогинів з метою контролю втомного тріщиноутворення у шарах з монолітних матеріалів і пластичних деформацій у ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язаних матеріалів.

Таким чином, розрахункові схеми проектування дорожнього одягу не дають змоги врахувати такі показники стану дорожнього одягу, як кількість тріщин, їх положення, геометричні параметри прихованих тріщин, розміри блоків тріщинуватої основи, об'ємну пошкодженість матеріалу шару (табл. 1.2). Прийняті у нормативних документах припущення і спрощення фактично унеможливають оцінювання стану та прогнозування відмови конструкції дорожнього одягу з тріщинами [87]. Дослідженнями [88 - 90] доведено необхідність застосування методів, що спираються на імовірнісний аналіз, як інструмент оцінювання взаємного впливу руйнувань та деформацій, врахування зміни фізичних і механічних властивостей матеріалів, варіації товщини конструктивних шарів протягом строку служби [91 - 93].

Таблиця 1.2 – Розрахункові схеми проектування дорожнього одягу

Вид прихованого дефекту дорожнього одягу та земляного полотна, що визначені за результатами георадарної діагностики	Можливі руйнування та деформації	Відображено у нормативних документах	
		змінювання вихідних даних для розрахунку за результатами діагностики	розрахункова схема і порядок розрахунку
1	2	3	4
Приховані тріщини в асфальтобетонному шарі знизу	1. Розвиток тріщин до руйнування покриття. 2. Зниження загальної міцності за критеріями опору розтягу при згині і допустимому пружному прогину. 3. Втрата міжшарового зчеплення. 4. Зниження показників надійності K_n і терміну служби $T_{сл}$ покриття	Модуль пружності матеріалу шару для розрахунку $E_{тр}$ зменшується на 20 %	Розрахункова схема за допустимим пружним прогином [73] з меншим значенням загального еквівалентного модуля пружності $E_{заг}$.
		Ефективна товщина шару для розрахунку на опір розтягу при згині зменшується на глибину розвитку тріщин	Розрахунок на опір розтягу при згині проводиться для зменшеної товщини шару асфальтобетону. Розрахункова схема з неспаяним контактом між шарами покриття [80]
Порушення структури проміжних шарів з монолітного матеріалу - крупноблочна основа	Окремі відбитті тріщини на покритті. Зниження показників надійності K_n і терміну служби $T_{сл}$.	Зменшення модуля пружності шару асфальтобетону $E_{фактичний} = 0,8 \cdot E_{розрахунковий}$	Розрахункова схема стандартна [73]
Порушення структури проміжних шарів з монолітного матеріалу - основа із окремих дрібних блоків.	Зниження рівності покриття. Шар основи не опирається дії напружень розтягу при згині. Значне зниження всіх показників міцності та невизначеність поведінки блочної основи. Зниження показників надійності K_n і терміну служби $T_{сл}$	Зменшення модуля пружності шару з дрібних блоків. Модуль пружності шару з дрібних блоків відповідає модулю пружності шару з дискретного матеріалу.	Розрахункова схема стандартна [73]
		Зменшення кількості монолітних шарів	Альтернативна розрахункова схема – розрахунок НДС конструкції дорожнього одягу на блочній основі Розрахунок за критерієм опору розтягу при згині [73] проводиться для зменшеної кількості шарів покриття

Кінець таблиці 1.2

1	2	3	4
Порушення структури проміжних шарів з монолітного матеріалу - дезінтеграція матеріалу	Зниження рівності покриття. Втрата розподільчої здатності шару покриття Зміна водно-теплого режиму роботи земляного полотна Зниження міцності конструкції за трьома критеріями граничного стану. Зниження показників надійності K_n	Модуль пружності матеріалу шару відповідає модулю пружності дискретного матеріалу Зміна вологості ґрунту земляного полотна, міцнісних та деформаційних параметрів ґрунту	Розрахункова схема стандартна [73]
Перезволоження шарів конструкції дорожнього одягу	Колійність і просадки, що пов'язані із пластичними деформаціями у ґрунті земляного полотна. Зниження коефіцієнтів запасу міцності за критеріями опору зсуву у ґрунтах земляного полотна і шарах із незв'язаних матеріалів. Зниження коефіцієнту запасу міцності за критерієм допустимого пружного прогину Зниження показників надійності K_n і терміну служби $T_{сл}$.	Зменшення модуля пружності зволоженого шару на 20 % -30%. Зміна міцнісних та деформаційних параметрів ґрунту.	Розрахункова схема стандартна [73]. Прогнозування залишкових деформацій в асфальтобетонному покритті та ґрунтах земляного полотна.
Нерівномірна товщина шару в покритті (у повздовжньому чи поперечному напрямках)	Зниження показників міцності та надійності. Передчасні деформації і руйнування, викликані порушенням умов міцності на опір при згині у монолітних шарах та опір зсуву в ґрунтах земляного полотна.	Змінювання фактичної товщини конструктивних шарів дорожнього одягу.	Розрахункова схема стандартна [73].
Шар зносу (посилення) із асфальтобетону на цементобетонному покритті має рядом із швом тріщини	Руйнування верхнього шару покриття.	Ремонт покриття з нарізкою шва в асфальтобетоні точно над швом у цементобетоні.	—

1.3 Методи оцінювання впливу тріщин на показники міцності і деформативності нежорсткого дорожнього одягу

Основними показниками, що характеризують здатність дорожнього одягу чинити опір напруженням, що виникають під дією транспортного навантаження та природно-кліматичних факторів, є коефіцієнти запасу міцності і коефіцієнт надійності дорожнього одягу [72, 94]. Тому історично дослідження впливу тріщин на показники міцності і деформативності дорожнього одягу розвивалися за такими напрямками:

а) теоретичні методи, що спираються на моделі механіки дорожніх одягів, положення теорії пружності і механіки деформованого твердого тіла, що дозволяє оцінити вплив тріщин на НДС конструкції дорожнього одягу;

б) емпіричні методи, основу яких складають моделі оцінювання і прогнозування стану дорожнього одягу, які ґрунтуються на інструментальних вимірюваннях та аналізі змінювання відгуку конструкції дорожнього одягу на вплив транспортного навантаження і природно-кліматичних факторів.

Розвитку даних напрямків присвячено дослідження Б.С. Радовського [52], В.О. Золотарьова [53, 95], І.І. Леоновича [67, 96], В.А. Веренько [56, 97], Л.Б. Гезенцевя [98, 99], Н.В. Горелишева [100, 101], В.Д. Казарновського [102, 103], А.Е. Мерзлікіна [84], С.К. Іліополова [104, 105], В.К. Жданюка [106 - 109], І.П. Гамеляка [57, 110 - 113], О.С. Славінської [114, 115], А.О. Белятинського [116, 117], В.В. Мозгового [54, 118-120], А.М. Онищенко [121-125], Д.О. Павлюка [126 - 128] та багатьох інших вчених. Серед зарубіжних досліджень слід відзначити роботи Д. Пайса (Pais J.C.) і Д. Сауса (J.M.V. Sausa, Portugal) [129], Е. Оскарсона (Oscarsson E., Sweden) [130], Р. Літтона (Lytton R.L., USA) [131], Ч. В. Гловера (Charles J. Glover, USA) [132], Р. Файфа (Rod Fyfe, Australia) [133], М. Коні (M. Coni, Italy) [134], Аль-Куаді (Al-Qadi I.L.) [135], Д. Ріго (Rigo, J. M., Belgium) [136].

1.3.1 Теоретичні методи оцінювання впливу наскрізної тріщини на стан дорожнього одягу

Однією з перших моделей з оцінювання впливу тріщин (швів) у цементобетонних покриттях на НДС двошарової конструкції слід вважати модель Г.М. Вестергаарда [137 - 139]. Вона передбачала періодичну втрату контакту між двома пружними тілами, яка викликана косинусоподібними «хвилями» від навантаження. Пізніше були розроблені більш досконалі моделі, які спиралися на розв'язок задачі визначення прогину нескінченних та півнескінченних балок і плит, розташованих на пружній вінклерівській основі.

Математичні залежності з оцінювання впливу наскрізної тріщини на стан дорожнього одягу опубліковані у роботі С.П. Тимошенко [140], де визначено, що вертикальне переміщення, дорівнює прогину нескінченної поверхні балки, а переміщення точки під дією навантаження на напівнескінченну балку визначається [140]:

$$f = \frac{Q}{2\beta^3 EJ_1} = \frac{2Q\beta}{2}, \quad (1.6)$$

де Q – навантаження, кН;

β – жорсткість плити, кН/ м³, визначається як

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_1J_1}}, \quad (1.7)$$

де k – коефіцієнт постелі основи, кН/ м³;

E_1 – модуль пружності основи, МПа;

J_1 – момент інерції поперечного перерізу балки, см⁴;

Згідно з рішенням [140], прогин напівнескінченної балки на вінклерівській основі у чотири рази перевищує прогин нескінченної балки. Тоді вертикальне

переміщення системи з наскрізною тріщиною під навантаженням, прикладеним над геометричним центром тріщини, у два рази перевищує прогин нескінченної балки. Під дією рухомого навантаження у момент, коли по черзі працює лише одна з балок з навантаженням на краю, прогин у чотири рази більший, ніж для нескінченної (без наскрізної тріщини) балки. Аналогічні висновки отримані у дослідженнях, що спиралися на рішення Г.М. Вестрегаарда для нескінченної і напівнескінченної плити [141 - 142].

Для теоретичної оцінки зменшення загального модуля пружності дорожнього одягу з руйнуваннями покриття проф. Б.С.Радовським розглянуто вплив наскрізної тріщини на прогин плити, яка спирається на пружну основу [67]. Плита з тріщиною розглядалася як напівнескінченна плита, яка навантажена поблизу краю по круговій площадці, а плита без тріщини – як необмежена за тих самих умов навантаження. Прогин під центром навантаженої кругової площадки визначений за формулами Вестергаарда, що дозволило отримати вираз співставлення прогинів [67]:

$$k_w = \frac{w_b}{w_c} = \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{2+1,2\nu}{1-\nu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(1 - (0,76 + 0,4\nu)\bar{R})^2}{1 - \frac{\bar{R}^2}{8\pi} \left(\ln \frac{12(1-\nu^2)}{\bar{R}^4} \right) + 3}, \quad (1.8)$$

де \bar{R} – параметр, що визначається за формулою [67]:

$$\bar{R} = \frac{3}{4(h_1 / D) \left[\frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)} \right]^{1/3}}, \quad (1.9)$$

де k_w – коефіцієнт, що враховує вплив наскрізної тріщини у покритті на величину прогину під дією навантаження;

w_b – прогин під центром навантаженої кругової площадки при навантаженні поблизу краю напівобмеженої плити на вінклерівській основі, м;

w_c – прогин під центром навантаженої кругової площадки на поверхні необмеженої плити, м;

h_1 – товщина плити, м;

E_1, E_2 – модуль пружності матеріалу плити та основи, МПа;

ν_1, ν_2 – відповідно коефіцієнти поперечної деформації плити та основи;

P – навантаження, кН.

Дослідженнями І.П. Гамеляка [57] доведено, що із зміною \bar{R} від 0,1 до 0,4 значення k_w змінюється від 3,1 до 1,7. Тобто за наявності у шарах покриття та основи наскрізної тріщини прогин збільшується у 1,7 - 3,1 рази у порівнянні з дорожнім одягом без тріщини тим більшою мірою, чим більше жорсткість цих шарів [57]. Виконаний автором аналіз підтверджує, що для будь-якої товщини шару покриття існує оптимальне співвідношення між модулем пружності покриття і основи за якого відношення прогинів мінімальне. Зі збільшенням модуля пружності основи, вплив тріщини на прогин під навантаженням зменшується, що свідчить про необхідність врахування вологості ґрунту земляного полотна під час інструментальних вимірювань. Збільшення модуля пружності покриття призводить до збільшення впливу тріщини на зниження несучої здатності дорожнього одягу.

Істотними обмеженнями практичного застосування моделей [143] є припущення: плита у плані нескінченна; навантаження на суміжну плиту не передається; плита розташована на однорідній основі; глибина основи необмежена; плита плоска, має гладкий контакт з основою, відсутнє температурне жолоблення. Запропонований підхід дозволяє оцінити вплив одиночної тріщини на деформативність дорожнього одягу.

Точне рішення з визначення прогину під навантаженням у багат шаровій плиті, що містить тріщину і розташована на нескінченному пружному півпросторі, отримано Б.С. Радовським та А.К. Приварніковим [144]. Метод [144] має суттєві обмеження щодо забезпечення: гладкості кривої, що обмежує поперечний переріз неоднорідності (порушення суцільності шару);

розташування неоднорідності всередині шару, не торкаючись його країв; повного зчеплення між шарами. Природно, що ці обмеження істотно знижують адекватність і, як наслідок, звужують галузь застосування подібних моделей.

Проте, такі моделі можуть знайти застосування під час тестування більш універсальних чисельних моделей. Як зазначає Б.С. Радовський [145], незважаючи на практичну необхідність вирішення завдання про напружений стан суцільного шару, що спирається на основу з тріщинами, теоретичний розв'язок задачі відсутній.

1.3.2 Емпіричні моделі оцінювання впливу тріщини на стан дорожнього одягу

Емпіричні моделі постулюють можливість врахування впливу руйнувань на стан дорожнього одягу: через зменшення товщини шару з тріщиною згідно з ВСН 46-83 [146]; через зменшення модуля пружності шару дорожнього одягу.

У першому випадку розглядається вплив тріщини на зміну циліндричної жорсткості покриття. Еквівалентна товщина шару з тріщинами h_{cr} визначається за формулою [57]:

$$h_{cr} = h_{in} \times K_h, \quad (1.10)$$

де h_{in} – початкова товщина монолітного шару, см;

K_h – коефіцієнт, що визначається за формулою [57]:

$$K_h = \sqrt[3]{\frac{w_{in}}{w_{cr}}}, \quad (1.11)$$

де w_{in} , w_{cr} – відповідно прогин покриття без тріщини і з тріщиною, що знижує його несучу здатність.

Зниження несучої здатності покриття з тріщинами запропоновано враховувати за допомогою коефіцієнта [57, 147]:

$$K_E = K_T^{c \cdot \ln(h) - d}, \quad (1.12)$$

де K_E – коефіцієнт, що враховує зниження несучої здатності покриття з тріщинами;

K_T – коефіцієнт, що враховує зміну модуля пружності асфальтобетонного покриття в результаті розтріскування шару $K_T = E_{cr} / E_{in}$;

c – емпіричний коефіцієнт, $c = 0,3359 + 0,0001 \cdot E_2$;

d – емпіричний коефіцієнт, $d = 0,3093 + 0,0007 \cdot E_2$;

E_1 – модуль пружності шару покриття, МПа;

E_2 – модуль пружності основи під асфальтобетонним покриттям, МПа;

h – товщина шару покриття, м;

D – діаметр відбитку колеса, см;

E_{cr} – модуль пружності покриття з тріщиною, МПа;

E_{in} – модуль пружності покриття без тріщини, МПа.

За результатами досліджень, що виконані у Бельгії [147], зміну модуля пружності шару асфальтобетонного покриття з руйнуваннями запропоновано враховувати коефіцієнтом еквівалентності, що визначається за результатами експериментальних обстежень:

$$a_l = \left(E_l / E_{щєб} \right)^{1/3}, \quad (1.13)$$

де E_l – модуль пружності асфальтобетону, МПа;

$E_{щєб}$ – модуль пружності щебеневого шару, як еквівалентний показник, що відображає стан асфальтобетонного покриття, МПа.

Інший підхід до оцінювання змінювання модуля пружності нежорсткого дорожнього одягу через накопичення руйнувань у процесі експлуатації

запропонований В.Д. Казарновським, І.В. Лейтландом, М.Л. Поповим [148]. Передбачається, що у процесі експлуатації шари покриття втрачають розподільчу здатність. Тоді відношення модуля пружності дорожнього одягу на початку експлуатації до модуля пружності по закінченні строку служби може бути представлено у вигляді [148]:

$$\frac{E_{об}^T}{E_{об}^0} = \frac{\frac{\pi}{2 \cdot E_{осн}} + \left(\frac{1}{E_a \cdot \sqrt[3]{E_a/E_{осн}}} - \frac{1}{E_{осн}} \right) \times \arctg \left(\frac{\sqrt{2,5} \cdot h_a}{D} \right) \times \sqrt{E_a/E_{осн}}}{\frac{\pi}{2 \cdot E_{осн}} + \left(\frac{1}{E_a} - \frac{1}{E_{осн}} \right) \times \arctg \left(\frac{\sqrt{2,5} \cdot h_a}{D} \right)}, \quad (1.14)$$

де $E_{осн}$ – загальний модуль пружності на поверхні основи, МПа;

E_a – модуль пружності пакету асфальтобетонних шарів, МПа;

D – діаметр штампа, рівновеликий відбитку колеса розрахункового автомобіля, см;

h_a – товщина пакету асфальтобетонних шарів, см.

Відносну втрату міцності конструкцією дорожнього одягу в момент часу t можна оцінити залежністю:

$$k = \frac{E_{об}^0 - E_{об}^t}{E_{об}^0 - E_{об}^T}. \quad (1.15)$$

Прийнявши значення h_a/D и $E_a/E_{осн}$, можна оцінити зміну міцності дорожнього одягу в процесі експлуатації. Як доводять дослідження [149], до кінця строку служби, модуль пружності дорожнього одягу ($E_{об}^T$) може знизитися на 58 %. Розглянуте рішення дозволяє оцінити вплив руйнувань за умови повної втрати розподільчої здатності монолітного шару. При цьому залишаються відкритими питання впливу одиночної тріщини, групи тріщин, розмірів блоків на розподільчу здатність дорожнього одягу. Зазначимо також,

що модель не враховує зміну товщини пакета асфальтобетонних шарів у процесі експлуатації.

Подолання зазначених труднощів автори роботи [150] пов'язують з введенням додаткових поправочних коефіцієнтів, які враховують наявність тріщин при посиленні дорожнього одягу. Відповідно до запропонованого підходу розрахунок загального модуля пружності двошарової системи, що підстилає пакет підсилення, виконують з урахуванням коефіцієнтів [150]:

$$E_{заг} = \frac{\left[1,05 - 0,1 \times \frac{h_{сл}}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{осн}}{E_{сл}}} \right) \right] \times E_{сл}}{0,71 \times \arctg\left(\frac{1,35 \cdot h_э}{D}\right) \times \sqrt[3]{\frac{E_{осн}}{E_{сл}} + \frac{E_{сл}}{E_{осн}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg\left(\frac{D}{h_э}\right)} \times \frac{1}{K_{mp} \times K_m \times K_{ap}}, \quad (1.16)$$

де $h_{ш}$ – товщина шару, на поверхні якого визначається загальний модуль пружності двошарової системи, м;

$E_{осн}$, $E_{ш}$ – загальний модуль пружності півпростору, що підстилає шар, на поверхні якого визначається загальний модуль пружності, і модуль пружності матеріалу шару, МПа;

K_{mp} – коефіцієнт, що враховує збільшення прогину тріщинувато-блочного шару у порівнянні з прогином шару без тріщини;

K_m – коефіцієнт, що враховує зменшення прогину тріщинувато-блочного шару через герметизацію тріщин;

K_{ap} – коефіцієнт, що враховує зменшення прогину тріщинувато-блочного шару через армування пакета підсилення.

Коефіцієнти, що враховують збільшення прогину тріщинувато-блочного шару у порівнянні з прогином шару без тріщини, визначені авторами експериментально без урахування відстані між тріщинами, ширини розкриття тріщини, розмірів блоків тріщинувато-блочного шару, модуля пружності матеріалу шару, що містить тріщини [51 - 64]. Відзначимо також, що набір

коефіцієнтів, які визначають вплив тріщин, отримано для обмеженої кількості конструкцій дорожнього одягу, що обмежує сферу застосування даної моделі.

Беручи до уваги складнощі завдання оцінювання впливу тріщин, багатьма авторами зроблені спроби встановлення зв'язку між площею шару, що розтріскався та його модулем пружності методами статистичної обробки результатів обстежень [147]:

$$IRC = 10,425 - 0,459 \cdot E_{сер}, \quad (1.17)$$

де IRC – візуальна оцінка інтенсивності розвитку тріщин, бали;

$E_{сер}$ – середнє значення загального модуля пружності дорожнього одягу, МПа.

Отримані експериментально коефіцієнти лінійної моделі застосовані для коригування моделі прогнозування стану покриття за даними візуального та інструментального обстеження конструкції. Крім моделей прогнозування стану покриття, що спираються на статистичну обробку візуально спостережуваних руйнувань, розроблені моделі, які спираються на імовірнісну природу руйнувань [151] і враховують кількість проходів стандартної осі, строк служби дорожнього одягу, відсоток площі розтріскування, а процес руйнування покриття описується нормальним законом розподілу.

Оцінюючи розглянуті моделі з оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з руйнуваннями (таблиця 1.2), зазначимо, що, незважаючи на значний обсяг експериментальних даних, переважна більшість моделей отримана для конкретних дорожньо-кліматичних умов і конструкцій дорожнього одягу та відображають особливості регіону обстеження. Можна констатувати, що, незважаючи на значний вплив деформацій і руйнувань на несучу здатність дорожнього одягу, результатів безпосереднього вимірювання зниження несучої здатності конструкції дорожнього одягу недостатньо для адекватної оцінки поточного стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у покритті та шарах основи з монолітних матеріалів.

Таблиця 1.3 – Моделі врахування впливу тріщин на показники, що характеризують стан дорожнього одягу

Спосіб врахування тріщини	Розрахункова формула	Автор	Посилання
1	2	3	4
Змінювання модуля пружності шару асфальтобетону з тріщинами враховується коефіцієнтом еквівалентності	$a_l = (E_l / E_{цеб})^{1/3}$	І.П. Гамеляк	[147]
Оцінка впливу наскрізної тріщини за величиною прогину півнескінченної балки.	$f = \frac{Q}{2\beta^3 EJ_1} = \frac{2Q\beta}{2}$	С. П. Тимошенко	[140]
Прогин під центром навантаженої кругової площадки при навантаженні поблизу краю напівобмеженої плити на вінклеррвській основі	$w_b = P \frac{(2+1,2\nu)^{1/2}}{(Eh^3k_{II})^{1/2}} [(1-0,76+0,4\nu)R]$	Г.М. Вестергард	[141]
Прогин плити, яка спирається на пружну основу	$l = \left(\frac{8\sqrt{3}}{9}\right)^{1/2} \times L = \left(\frac{8\sqrt{3}}{9}\right)^{1/2} \times \left(\frac{2D_{nl}(1-\nu^2)}{E_2}\right) \approx 0,68h_1 \left[\frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)}\right]$	Б.С. Радовський	[68]
Розрахунок довговічності асфальтобетонного покриття за критерієм тріщиностійкості	$[M(\sigma(T, t_n), t, x_i)] - [M_{oid}(t, x_i)] \leq [M]$	В.В. Мозговий	[54]
Коефіцієнт приведення товщини шару з тріщиною до еквівалентної товщини шару без тріщини	$K_h = \sqrt[3]{\frac{w_{in}}{w_{cr}}}$	І.П. Гамеляк	[57]

Кінець таблиці 1.3

1	2	3	4
Коефіцієнт зменшення несучої здатності конструкції дорожнього одягу	$K_E = K_T^{c \cdot \ln(h) - d}$	І.П. Гамеляк	[57]
Змінювання модуля пружності над тріщиною у розрахунках за критерієм опору розтягу при згині та за критерієм допустимого прогину	$E_z^\sigma = 250 \cdot \exp(6,58 \cdot 10^{-6} E_{m_2})$ $E_z^\delta = 17200 \cdot \exp(2,37 \cdot 10^{-6} E_{m_2})$	А.Е. Мерзлікін	[84]
<p>Коефіцієнт, що враховує наявність тріщини у шарі асфальтобетону:</p> <ul style="list-style-type: none"> - відстань між тріщинами перевищує 5 м - відстань між тріщинами від 0 м до 5 м 	<p>Коефіцієнт впливу зруйнованого тріщиною монолітного шару на величину температурної поправки до визначення модуля пружності конструкції дорожнього одягу:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $K_{mp} = 0,69$: - від $K_{mp} = 0$ до $K_{mp} = 0,69$ 	ОДМ 218.2.024-2012	[152]

1.3.3 Імовірнісний підхід до врахування впливу руйнувань покриття на стан дорожнього одягу

Різноманіття моделей оцінювання стану покриття з руйнуваннями пояснюється: мінливістю ґрунтово-геологічних, кліматичних умов експлуатації дорожнього одягу; різноманіттям фізико-механічних характеристик матеріалів конструктивних шарів дорожнього одягу і ґрунтів земляного полотна; неоднорідністю геометричних параметрів дорожніх одягів у поздовжньому і поперечному профілях.

Тому для оцінювання стану дорожнього одягу необхідною умовою є застосування методів імовірнісного аналізу [88 – 90, 153]. Як відзначають автори [154], методи проєктування та оцінювання стану конструкції дорожнього одягу повинні враховувати принципи надійності, в тому числі імовірнісні методи аналізу надійності. Концепція імовірнісного проєктування дорожнього одягу була сформульована ще в 1970-х роках [17, 155, 156]. Пропонувалися підходи, пов'язані з імовірнісними методами проєктування та оцінювання стану дорожнього одягу [157 - 164]. При цьому значна частина досліджень була присвячена проєктуванню нового нежорсткого покриття [68, 155, 165, 166]. Більшість досліджень обмежувались оцінкою строку служби дорожнього покриття [69, 159].

Для врахування імовірнісного характеру зміни транспортно - експлуатаційних показників автомобільних доріг В.Н. Яромко запропоновано застосовувати безрозмірний коефіцієнт відповідності, як характеристику стану дорожнього одягу [151]:

$$K = \frac{K_{\phi}}{K_{em}}, \quad (1.18)$$

де K – коефіцієнт відповідності;

K_{ϕ} – фактичний рівень надійності конструкції дорожнього одягу;

K_{em} – еталонний рівень надійності конструкції дорожнього одягу.

Дослідженнями [151] обґрунтовано, що процес деформування покриття підпорядкований нормальному закону розподілу:

$$\alpha(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_0}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (1.19)$$

де z – ордината нормованої щільності розподілу Гауса, яка залежить від ступеня деформування покриття:

$$\alpha(z) = \frac{D}{10}, \quad (1.20)$$

де D – площа деформованого покриття, що визначається за результатами візуального оцінювання, $m^2/1000 m^2$.

Тоді розрахункова працездатність дорожнього одягу пов'язана з деформативністю дорожнього одягу і кількістю деформацій та руйнувань [151]:

$$N = 10^{2,72 - 3,25 \lg l - \frac{\lg\left(\frac{z}{3} + 1\right)}{0,31}}, \quad (1.21)$$

де l – вимірний прогин дорожнього одягу, см.

Маючи безсумнівні переваги у частині врахування ймовірності розподілу руйнувань та деформацій, метод враховує деформативні властивості матеріалів шарів дорожнього одягу та їх товщину через функцію відгуку конструкції на зовнішній вплив – величину пружного прогину конструкції, що вимірюється. Такий підхід знижує достовірність результатів через похибки інструментальних вимірювань пружного прогину, що проводяться на зруйнованих покриттях.

У роботах зарубіжних авторів [167] відзначається, що зміна товщини шару дорожнього покриття відповідає нормальному розподілу з коефіцієнтом варіації у діапазоні від 3 % до 25 % для шару асфальтобетону і від 5 % до 35 % для шарів з зернистих матеріалів. Аналогічні результати отримані проф. І.П. Гамеляком [111]. Модуль пружності матеріалу шарів конструкції дорожнього одягу, кількість прикладань розрахункового навантаження також можуть бути охарактеризовані коефіцієнтом варіації [111, 167, 168]. Модулі пружності підкорюються логонормальному [169 - 172] або нормальному законам розподілу [170, 173]. Аналогічно змінюється коефіцієнт Пуассона матеріалів шарів дорожнього одягу через неоднорідність температури за глибиною конструкції [174 – 176, 177]. У дослідженні [168] встановлено, що варіація геометричних параметрів шарів дорожнього одягу, інтенсивності руху транспортних засобів і складу транспортного потоку, коефіцієнта, що враховує розподіл транспортних засобів по смугах руху істотно впливають на строк служби дорожнього одягу. Тому останні дослідження спрямовані на розроблення моделей оцінювання стану дорожнього одягу, які враховують неоднорідність та мінливість вхідних параметрів через функції розподілу ймовірностей та статистичні характеристики розподілу. Так, у дослідженні [167] конструкція посилення вважається невдалою, якщо виконується умова:

$$P(f) = P(S) \leq 0 = P[\{\ln(N) - \ln(CTL)\} \cdot \leq 0] \quad (1.22)$$

де $P(f)$ – ймовірність відмови;

S – запас міцності;

CTL – сумарне транспортне навантаження, авт.;

N – залишковий ресурс дорожнього покриття, авт.

Більшість розглянутих імовірнісних моделей оцінювання і прогнозування стану дорожнього одягу орієнтовані на проектування нового будівництва, що дозволяє не враховувати закономірності змінювання фізико-механічних

властивостей матеріалів шарів конструкції та їх геометричних параметрів у процесі експлуатації. Разом з тим, найбільш актуальним є оцінювання стану дорожнього одягу з руйнуваннями, в тому числі прихованими тріщинами.

Вагомий внесок у вирішення зазначеної проблеми внесли роботи Б.С. Радовського [23, 52, 67, 163], І.П. Гамеляка [110 - 113, 147], В.М. Яромко [178 - 180], В.А. Веренько [56, 97, 181, 182], В.В. Мозгового, [118, 183 - 185], В.Д. Казарновського [142, 148], І.І. Леоновича [13, 27, 55], В.А. Семенова [186, 187]. Професором В.А. Семеновим [186, 187] обґрунтовано доцільність застосування коефіцієнта варіації (C_v) вимірюваних фізико-механічних, геометричних параметрів шарів конструкції дорожнього одягу для оцінювання однорідності і обґрунтування законів розподілу випадкових величин [187]: нормальний ($C_v = 0,25$); Вейбула ($C_v = 0,44$); логарифмічний нормальний ($C_v = 0,68$) і експоненційний ($C_v = 0,92$). Роботи І.П. Гамеляка створили теоретичний фундамент для оцінювання надійності конструкції дорожнього одягу на етапі експлуатації з урахуванням всього комплексу випадкових факторів. Згідно з [57] основними показниками, що характеризують стан дорожнього одягу є коефіцієнти варіації: загального еквівалентного модуля пружності конструкції дорожнього одягу ($C_{E_{заг}}$); напруження розтягу при згині пакету монолітних шарів (C_σ); напруження зсуву в незв'язаних шарах і ґрунті земляного полотна (C_τ). Для оцінювання коефіцієнта варіації критеріїв граничного стану запропоновано використовувати залежність [57]:

$$C_{E,\tau,\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial(E_{заг}, \tau, \sigma)}{\partial \Phi_i} \right)^2 \times \left(\frac{\bar{\Phi}_i}{\bar{E}_{заг}, \bar{\tau}, \bar{\sigma}} \right)^2 \right]} \times C_{\Phi_i}^2, \quad (1.23)$$

де n – кількість параметрів, що впливають на розрахунок для даного критерію граничного стану;

Φ_i та $\bar{\Phi}_i$ – параметр розрахунку та його середнє значення;

C_{Φ_i} – коефіцієнт варіації параметра.

Таким чином, імовірнісні методи дозволяють врахувати неоднорідність параметрів, що характеризують НДС конструкції дорожнього одягу та можуть бути застосовані у моделях оцінювання стану дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів.

Основними обмеженнями застосування імовірнісних моделей (1.23) стосовно задач оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу є відсутність інформації про лінійну неоднорідність параметрів конструкції дорожнього одягу. Подолання зазначених обмежень у дисертаційному дослідженні пов'язується з розвитком методів підповерхневого зондування стосовно до задачі пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин, визначення неоднорідності геометричних параметрів шарів конструкції нежорсткого дорожнього одягу.

1.4 Чисельні методи аналізу напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу

Оскільки найбільш зручним для проведення розрахунків за критеріями міцності дорожнього одягу є метод скінченних елементів, далі будемо розглядати постановку задачі в рамках такого підходу. Значний вклад у теорію проектування дорожнього одягу із застосуванням методу скінченних елементів внесли роботи А.В. Руденського [188], Б.С.Радовського [189], А.В. Смирнова [190], О.С.Городецького [191], С.К. Іліополова [192], В.П. Матуа [193], Е.В. Угловой [82].

Задачі аналізу НДС конструкцій дорожнього одягу з наскрізними тріщинами виникають у випадках наявності тріщин різного походження у шарах асфальтобетонного покриття на жорсткій основі та у шарах нежорсткого дорожнього одягу [143]. Весь комплекс завдань розрахунку НДС конструкцій

дорожнього одягу з руйнуваннями, що вирішуються із застосуванням методу скінченних елементів, може бути умовно розділений на два класи:

а) оцінювання стану дорожнього одягу на основі аналізу напружень і деформацій, які виникають через спільну дію факторів, що сприяють утворенню тріщин;

б) прогнозування терміну служби дорожнього одягу з тріщинами у покритті і шарах основи, що застосовує теоретичні положення механіки руйнувань.

Вирішенню завдання оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу з наскрізними тріщинами (швами) присвячено цілий ряд досліджень [51, 52, 56, 60, 64 - 67, 70, 78, 84, 89 - 91, 154, 184, 194]. Задачі напружено-деформованого стану конструкцій дорожніх одягів з прихованими тріщинами мають як загальні риси із задачами про наскрізні тріщини, так й відмінні риси. Приховані неоднорідності можуть бути як руйнуваннями (тріщинами), так і швами між цементобетонними плитами основи. Відповідно, моделі для оцінювання поточного стану нежорсткого дорожнього одягу значно розрізняються між собою. Якщо для наскрізних тріщин розташування навантаження відносно тріщини, що забезпечує найбільші деформації і прогини очевидно [145], то для прихованих тріщин це питання вимагає більш ретельного дослідження. Крім того, конструкції багатьох ділянок автомобільних доріг після ремонту містять шар асфальтобетону, укладений на шари розтрісканого покриття, що призводить до появи відбитих тріщин, які копіюють тріщини основи [61]. У такому випадку слід проводити розрахунок для блочної основи.

З огляду на важливість даної проблеми, у [61] розглянуто моделі поширення тріщин у верхній шар конструкції. Модель дорожнього одягу являє собою пружній тришаровий пакет на жорсткій основі, задача розглянута у плоскій постановці. Природно, що таке завдання з обчислювальної точки зору матиме меншу розмірність, однак такі моделі справедливі лише за певних конфігурацій навантаження і апроксимація отриманих результатів для реальних (навіть найпростіших) навантажень вимагає додаткового обґрунтування.

Завдання аналізу НДС конструкцій дорожніх одягів з тріщинами крім напружень і деформацій має за мету детальний аналіз сингулярностей з метою розрахунку граничних (миттєвих) напружень. Розрахунок дорожнього одягу передбачає вирішення задачі за умови багаторазового прикладання розрахункового навантаження, що не наближується до граничних значень. У [145] зазначено, що для виходу тріщини на поверхню потрібно додати навантаження, яке у три – п'ять разів перевищує граничне навантаження, що визначене розрахунком [195]. Тому в [84] за результатами експериментальних досліджень зроблено висновок, що кінцеві розміри тріщин (ширина розкриття до 0,5 см) і незначне співвідношення модуля пружності суміжних шарів конструкції (до ста разів) дозволяють отримувати за допомогою методу скінченних елементів досить надійне уявлення про напруження над тріщинами, не залучаючи такі поняття механіки руйнування як «інтенсивність напружень на кінці математичної тріщини».

Стандартним інструментом опису напружень у таких випадках (поблизу тріщини) є коефіцієнт концентрації горизонтальних напружень, що дорівнює відношенню максимальних розтягуючих (горизонтальних) напружень σ_y^{mp} у шарі покриття над тріщиною до максимальних горизонтальних напружень σ_y у покритті без тріщини [196]:

$$k_{кн} = \frac{\sigma_y^{mp}}{\sigma_y}. \quad (1.24)$$

Плоску модель задачі про напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу з прихованою тріщиною (швом) розглянуто в [196]. В моделі прийнято спрощення (наближення) щодо наявності пружного зв'язку між двома балками, що розташовані на пружній основі (модель шару з тріщиною) та зроблено висновок про необхідність врахування всіх складових тензора напружень, оскільки, як зазначено в [197], під час прикладання поперечного навантаження у нижній зоні тріщини (шва) втрачається зчеплення, що значно

впливає на НДС верхнього шару конструкції. Але в [196] зазначено, що для асфальтобетону гіпотеза Кірхгофа - Лява не може бути застосована внаслідок можливого обтискання верхнього шару і зменшення розшарування під навантаженням, тому слід враховувати вертикальні нормальні напруження і зміну товщини верхнього шару (асфальтобетону) під навантаженням.

Таким чином, алгоритм розрахунку показників НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами повинний спиратися на метод скінченних елементів і моделі, що орієнтовані на його застосування. Побудова скінченно-елементної моделі повинна здійснюватися із застосуванням результатів георадарної діагностики у частині, що стосується геометричних параметрів шарів моделі, локалізації та геометричних параметрів тріщин.

1.5 Аналіз сучасних методів і засобів діагностики нежорсткого дорожнього одягу

1.5.1 Порівняльний аналіз методів і засобів діагностики

Можливість детального вивчення прихованих тріщин, з'явилася з розвитком засобів дистанційного моніторингу дорожнього одягу [198]. Історично першим методом діагностики стану покриття є метод візуального огляду і вимірювання площі руйнувань [146, 199, 200, 201]. Метод характеризується високими витратами на проведення діагностики і, як доводить досвід експлуатації автомобільних доріг [202, 203], дає ненадійні результати, які характеризуються великим розкидом значень. Руйнівні методи у вигляді розкриття дорожнього одягу і відбору кернів є низькопродуктивними, коштовними і трудомісткими [19].

Необхідність подолання суб'єктивізму візуальної оцінки і підвищення продуктивності діагностики дорожнього одягу стимулювали впровадження технічних засобів, що залучають напівавтоматичні та автоматичні методи обробки одержуваної інформації.

Технічні засоби отримання інформації про руйнування дорожнього одягу розвивалися за двома основними напрямками [205]:

а) розвиток автоматизованих систем відеодіагностики, що мають високу швидкість збору інформації, для виявлення та кількісної оцінки візуально спостережуваних тріщин та вибоїн [39, 206, 207].

б) розвиток автоматизованих систем неруйнівної діагностики для пошуку прихованих руйнувань [206, 208 - 213].

Відповідно до класифікації [214] відеодіагностика дорожнього покриття містить у собі завдання аналізу, класифікації та оцінювання глибини тріщин. Основним методом є аналіз інтенсивності зображення, одержуваного за результатами відеозйомки. Граничне значення функції інтенсивності зображення, дозволяє віднести пікселі зображення до тріщини або зони їх знаходження [215 - 219]. Проблеми пошуку тріщин також розглянуті у [220 - 222], де запропоновано новий метод кількісної оцінки рівня серйозності руйнувань за результатами аналізу середньої ширини тріщини, що оцінюється на основі піксельного аналізу зображень та дозволяє досліджувати тріщин з шириною розкриття понад 2 мм.

Незважаючи на значні успіхи у галузі відеодіагностики, більшість автоматичних систем пошуку та оцінювання тріщин у дорожньому покритті, що застосовують моделі машинного зору і обробки зображень [223 - 226], мають ряд недоліків. Так, нерівність поверхні покриття призводить до похибок у пошуку, класифікації та оцінюванні параметрів тріщин. Крім того, системи вимагають складних алгоритмів з високим рівнем обчислювальної потужності [227 - 229]. Виробництво і підтримка цього обладнання дуже коштовні, а результат аналізу залежить від умов проведення відеодіагностики [230].

Для автоматичної фіксації тріщин, розроблені вимірювальні системи, що складаються з камери і чотирьох лазерних проєкторів, які фіксують проєкційні лазерні точки на 2D-знімках у різних положеннях [231]. Системи лазерного сканування характеризуються високою продуктивністю (швидкість сканування до 100 км/год), а одержувані результати не залежать від часу доби і типу

дорожнього покриття. Метод стереозору є відносно недорогим методом збору тривимірних даних про поверхню дорожнього покриття, але не знаходить широкого застосування через складність обробки і недостатню точність [232].

Завдяки останнім розробкам і удосконаленням дефлектометру падаючого вантажу (FWD), неруйнівна діагностика дорожнього одягу отримала нові можливості [209, 233, 234]. З нашої точки зору, одним з найважливіших результатів досліджень є висновок про можливість застосування параметрів чаші прогину для оцінювання ступеня руйнування асфальтобетонних покриттів [235 - 237]. Розроблено методики ідентифікації відбитих тріщин, що засновані на аналізі чаші прогину і динамічних моделях розрахунку прогину напівжорсткого покриття з тріщинами під дією динамічного навантаження FWD дефлектометру [238]. Не ставлячи під сумнів можливості даного методу для вирішення завдань діагностики дорожнього одягу, слід зазначити його низьку надійність у частині позиціонування прихованих руйнувань.

Залучення ультразвукових методів діагностики [239] до оцінювання локалізації та параметрів тріщин на основі експериментально встановленого зв'язку між зміщенням розподілу ультразвукових хвиль та орієнтацією і шириною тріщини відкриває потенційні можливості щодо застосування методу до вирішення задачі позиціонування тріщин, але загасання ультразвукових хвиль в асфальтобетоні та незначна продуктивність роблять його мало привабливим для діагностики дорожнього одягу.

Дослідженнями у галузі тепловізійного контролю [208, 240 - 242] обґрунтовано доцільність застосування методів термографії для виявлення поверхневих і приповерхневих руйнувань. Метод заснований на отриманні контрастного теплового зображення, що формується через відмінності у випромінювальній здатності поверхні об'єкта контролю (тріщини) і поверхні незруйнованого дорожнього покриття. Обробка даних тепловізійного контролю [240] дозволяє виділити тріщини з шириною розкриття 1,2 мм. Обмеження застосування методу пов'язане зі значною залежністю зображень від погодних умов. Приймач інфрачервоного тепловізора реєструє випромінювання від

поверхні і приповерхневих ділянок покриття [243], що також обмежує застосування методу для позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин.

Георадар (GPR) - це обладнання, принцип дії якого заснований на випромінюванні у досліджуване середовище надширококузових сигналів, прийомі та реєстрації сигналів, відбитих від границь розділу середовищ і неоднорідностей. Георадар має найвищу роздільну здатність з усіх геофізичних методів неруйнівної діагностики [244]. Сьогодні застосування георадара для неруйнівної діагностики автомобільних доріг широко розвинене у всьому світі [245 - 254], численні дослідження спрямовані на вирішення завдань:

- а) оцінювання товщини шарів дорожнього одягу [246, 252, 254 - 258];
- б) оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна [259 - 267];
- в) позиціонування прихованих неоднорідностей і руйнувань [268 - 273], у тому числі пошук порожнеч під цементобетонними плитами [274];
- г) оцінювання щільності матеріалів і ґрунтів [275 - 278].

Для вирішення цих завдань провідними світовими виробниками георадарів GSSI New Gemption (США), Sensor and Software Inc. (Канада), Era Technology (Великобританія), Mala (Швеція), Radar Systems (Латвія), OYO corporation (Японія) і Geozondas (Литва) постійно удосконалюється обладнання та програмне забезпечення (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Основні параметри антен георадара [244]

Частота	900 МГц	1 ГГц	1,5 ГГц	4 ГГц
Довжина хвилі, мм	136	122	81	31
Роздільна здатність, мм	68	61	41	15
Глибина зондування до, мм	1000	800	500	100

Динамічний розвиток георадарних методів діагностики автомобільних доріг пов'язаний з істотними перевагами хвильових методів:

- а) застосування поляризаційних характеристик електромагнітних хвиль;
- б) висока швидкість проведення вимірювань;

в) можливість варіації таких параметрів первинного імпульсу як амплітуда, поляризація, частота повторення, накопичення з метою підвищення інформативності та достовірності отриманих результатів.

Проведений аналіз доводить, що найбільший потенціал для вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу мають георадари, що застосовуються як самостійно, так й разом з іншими засобами діагностики. Переваги георадарного зондування обумовлені безперервністю збору даних та високою швидкістю зйомки, кращою роздільною здатністю у порівнянні з іншими геофізичними методами (табл. 1.5). Згідно з дослідженнями [279], георадарне зондування застосовується до широкого спектру дорожньо-будівельних матеріалів, що важливе для вирішення задачі пошуку тріщин, оскільки електромагнітні хвилі повинні проходити через тріщину, в тому числі заповнену матеріалом [280]. Сучасні можливості георадарів дозволили підійти до вирішення завдань дефектоскопії дорожнього одягу [273, 281 - 284]. Компанія Utsi Electronics Ltd. (Велика Британія) почала розробку георадарів для визначення глибини тріщин. Сьогодні існує можливість виявлення тріщин глибиною понад 50 мм [269].

Таким чином, георадар відповідає основним вимогам, які пред'являються у дисертаційному дослідженні до засобів пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу.

1.5.2 Аналіз можливостей застосування георадарів для вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин

Георадарне зондування засноване на випромінюванні імпульсів електромагнітних хвиль у досліджуване середовище (дорожній одяг), які, відбиваючись і заломлюючись на границях розділу середовищ (шарів) і внутрішніх неоднорідностях (тріщинах), потрапляють до приймальної антени [249, 250, 285 - 287]. Математичну основу застосування георадарів становить основне рівняння радіолокації [288]:

Таблиця 1.5 – Неруйнівні методи діагностики стану дорожніх одягів

Метод діагностики	Прилади та устаткування	Метод інтерпретації результатів діагностики	Вимірювані характеристики					Можливості				
			геометричні	фізико-механічні	експлуатаційні	поверхневі руйнування	приховані руйнування	обстеження протяжних ділянок	рух зі швидкістю потоку	зондування на глибину конструкції	незалежність від погодних умов (освітленість, вітер)	незалежність від опадів (дощу, снігу)
Відеозйомка	Прилади «машинного зору»	Аналіз зображень	+	-	(+)	+	-	+	+	-	-	(+/-)
Вимірювання деформацій (прогину)	Установки динамічного навантаження	Аналіз форми чаші прогину	-	+	-	+	-	-	-	+	+	(+/-)
	FWD дефлектометри		-	+	-	+	-	+	+	+	+	(+/-)
Вимірювання характеристик хвиль пружності	FWD дефлектометри	Аналіз відбитих хвиль	-	+	-	+	(+)	+	+	+	+	(+/-)
		Аналіз швидкості сигналів								+		
		Спектральний аналіз підповерхневих хвиль								-		
Зондування ультразвуковими хвилями	Прилади ультразвукового контролю	Аналіз частоти і довжини звукової хвилі	-	+	-	+/-	-	-	-	+	+	(+/-)
Дистанційне електромагнітне зондування	Тепловізори	Термографічний аналіз	-	+	-	+	+/-	-	-	-	-	-
	СВЧ радіометри	Аналіз характеристик поширення НВЧ хвиль	+	(+)	-	-	-	-	-	+	-	-
	Георадари	Аналіз амплітуди і часу проходження сигналу	+	+	(+)	+	+	+	+	+	+	(+/-)
	Лазерні профілометри	Аналіз перевищення щодо рівня поверхні покриття	-	-	+	(+)	-	+	+	-	+	(+/-)

Примітка: (+) – потенційні (нереалізовані) можливості; +/- – обмежене застосування

$$h_i = \frac{v_i \cdot \Delta t_i}{2}, \quad (1.25)$$

де Δt_i – затримка сигналу, нс;

h_i – товщина i -го шару, см,

V – швидкість поширення електромагнітної хвилі у середовищі, м/нс, що визначається за формулою [288]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\mu_{\text{відн}} \cdot \varepsilon_{\text{відн}}}}, \quad (1.26)$$

де C – швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі, $C = 0,3$ м/нс;

$\mu_{\text{відн}}$ – відносна магнітна проникність середовища, од.;

$\varepsilon_{\text{відн}}$ – відносна діелектрична проникність середовища, од.

Враховуючи, що для більшості матеріалів, відносна магнітна проникність дорівнює одиниці ($\mu_{\text{відн}} = 1$), а впливом частоти можна знехтувати (за умови малих втрат у середовищі) швидкість поширення хвиль у середовищі [288]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1.27)$$

де ε – дійсна частина відносної комплексної діелектричної проникності у середовищі, од.

Фізичну основу дефектоскопії складають явища відбиття і дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях (тріщинах) [285, 288]. Відповідно до логіки рішення задачі пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у покритті і шарах основи, дослідження спрямовані на оцінювання впливу параметрів, що забезпечують точність інтерпретації радарограм [280], а саме: характеристик георадара; діелектричних властивостей матеріалів; геометричних параметрів тріщини та її локалізації; методів і алгоритмів обробки зображень і хвильових даних; методів побудови зображення.

Узагальнення результатів численних досліджень [270, 271, 280] дозволяє сформулювати наступні положення:

а) антени з частотою від 1500 МГц до 2000 МГц ефективніші для пошуку тріщин у порівнянні з антенами з частотою від 2300 МГц до 2600 МГц. Для пошуку тріщин рекомендується використовувати діапазон частот від 700 МГц до 2000 МГц [280]. Для пошуку і оцінювання геометричних параметрів тріщин у шарах дорожнього одягу запропонований багаточастотний підхід [271], що передбачає застосування антен з високою частотою імпульсу для оцінювання геометричних параметрів тріщин, з низькою частотою – для пошуку тріщин;

б) зі збільшенням частоти зондуючого імпульсу збільшується роздільна здатність, внаслідок чого антени з частотою понад 2000 МГц мають більш високу роздільну здатність та вимагають меншої обробки сигналів [280];

в) збільшення ширини смуги частот зондуючого імпульсу збільшує ймовірність виявлення як дрібних, так й великих тріщин та забезпечує найкращі результати з оцінювання геометрії тріщини [280];

г) для забезпечення відтворюваності результатів вимірювань і підвищення вірогідності пошуку тріщин рекомендується, щоб частота повторення імпульсів була менша за ширини тріщини.

Найбільш широким дослідженням щодо аналізу технічних можливостей сучасних георадарів для вирішення завдань пошуку та ідентифікації прихованих тріщин слід вважати [289]. За результатами аналізу форми і центральної частоти зондуючого імпульсу георадарів обґрунтовано, що мінімальна ширина тріщини, яка може бути виявлена георадаром, становить від 1 мм до 2 мм, залежно від їх розташування і форми. Мінімальна відстань між тріщинами, що може бути оцінена, становить 5 см. Зростання об'єму тріщини через збільшення її глибини або ширини підвищує ймовірність виявлення тріщин [270]. При цьому, тріщини значної ширини формують на радарограмах контрастні гіперболічні відбиття. З іншого боку, збільшення глибини тріщини призводить до появи гіпербол з більш глибокими прольотами [283, 290, 291].

Можливість виявлення та позиціонування тріщин обумовлена також

відмінністю в електрофізичних характеристиках матеріалу шару дорожнього одягу з тріщиною, і матеріалу, що заповнює тріщину [271, 272, 279, 292]. За допомогою георадара можуть бути виявлені тріщини, які заповнені повітрям або водою [243]. Враховуючі, що відмінності у діелектричній проникності між асфальтобетоном і заповнювачем тріщини змінюються у процесі експлуатації [272], ймовірність виявлення тріщин у конструкціях, що знаходяться в експлуатації тривалий термін, істотно збільшується [280].

1.5.3 Аналіз методів обробки даних георадарного зондування

Завдання підповерхневого зондування класифікують [250]:

а) завдання відновлення структури, що вимагають наявності апріорної інформації для встановлення зв'язку між фізико-механічними параметрами і електрофізичними параметрами матеріалів шарів [253, 261, 279]. Модель дорожнього одягу являє собою шарувате середовище [293, 294];

б) завдання пошуку. Модель дорожнього одягу являє собою шарувате середовище з локальними неоднорідностями [295, 296].

Кожному класу задач притаманні свої методи обробки даних георадарного зондування. Обробка даних георадара складається з [250, 297]:

а) попередньої обробки з метою видалення «шумів», збійних сигналів, що полегшує подальшу обробку імпульсних сигналів [298];

б) пошуку неоднорідностей та визначення геометричних параметрів конструкції або властивостей матеріалів шарів конструкції [297].

Для оцінювання товщини шарів конструкції дорожнього одягу застосовуються методи визначення границь шарів і процедури перетворення часу на глибину [299, 300]. Методи виявлення дифракційної гіперболи зазвичай використовуються для картування структури і виявлення тріщин у бетонних елементах мостів [301, 302]. Враховуючі складність і багатофакторність завдань дефектоскопії, досить поширеним є метод аналізу радарограм, що передбачає:

а) наявність апріорної інформації про кількість шарів конструкції і

електрофізичні характеристики матеріалів шарів;

б) можливість чисельного синтезування радарограм;

в) співставлення фактичних і синтезованих радарограм.

Апріорна інформація про кількість шарів конструкції та електрофізичні параметри матеріалів дозволяє оцінити геометричні параметри конструкції [303] й підійти до вирішення завдання позиціонування тріщин (рис. 1.3).

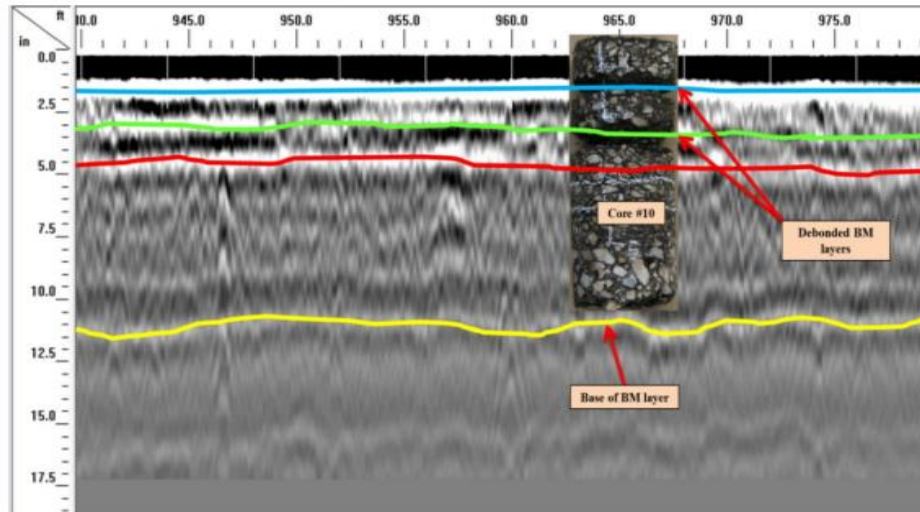


Рисунок 1.3 - Оцінювання товщини шарів конструкції дорожнього одягу за наявності апріорної інформації [303]

Інший підхід до пошуку тріщин у шарах дорожнього одягу [297] передбачає автоматичну ідентифікацію відхилень у структурі і властивостях матеріалів шарів. Результатом роботи алгоритму, що реалізує даний метод, є позиціонування тріщин і ділянок змінювання товщини шарів конструкції дорожнього одягу. Метод має ряд обмежень, пов'язаних з припущеннями про однорідність і незмінність структурних і електрофізичних параметрів шарів дорожнього одягу, що обмежують його застосування на автомобільних дорогах.

Отримали розвиток методи, що засновані на результатах чисельного і фізичного моделювання впливу вертикальних тріщин на хвильове поле георадара [270]. Метод дозволяє визначити горизонтальне положення, глибину і відносну ширину прихованих вертикальних тріщин на глибині до 2 м.

Запропонований підхід [270], що отримав розвиток в алгоритмі позиціонування положення прихованої тріщини на основі «еліптичної моделі» [270], може бути застосований тільки для даних георадару з дипольними антенами, що обмежує його застосування. Найбільш перспективними, на наш погляд, слід вважати дослідження, що орієнтовані на застосуванням георадара, якій працює на двох різних високих частотах (1,6 ГГц і 2,3 ГГц) за різної орієнтації антени (перпендикулярно і паралельно тріщинам) [304]. Такий підхід надає можливість досліджувати поляризаційний стан імпульсних сигналів георадара для вирішення задачі позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин.

Відгук від вертикальної тріщини, поперечної до напрямку профілю зондування, проявляється у вигляді дифракційних асимптот [271], які починаються зверху і знизу тріщини, що ілюструє явище гіперболічного розсіювання. За результатами чисельного моделювання встановлено [305], що амплітуда відбитого сигналу зростає з шириною тріщини, а його форма залишається постійною. При цьому можливості пошуку тріщин суттєво залежать від діелектричного контрасту шарів, що оточують тріщину [306].

Можна констатувати, що існує значний досвід застосування георадарів для пошуку, позиціонування та ідентифікації наскрізних тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, тоді як дослідження, що стосуються пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин дуже обмежені. Отже, подальші дослідження повинні бути спрямовані на вирішення таких завдань:

а) удосконалення методів відновлення діелектричної проникності в багатошарових конструкціях, що дозволить підвищити надійність результатів інтерпретації георадарних даних і оперативність діагностики;

б) розвиток методів реєстрації та аналізу поляризаційного стану сигналу, відбитого від тріщин, що створює теоретичний фундамент дефектоскопії дорожніх одягів та розширює можливості георадарної діагностики;

в) обґрунтування типу антенних блоків, що дозволить підвищити точність вимірювань.

1.6 Висновки по розділу. Цілі і завдання дослідження

Проведений аналіз досліджень, що ставляться до вирішення наукової задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, дозволяє зробити висновки.

1. Тріщини є основним видом руйнувань нежорсткого дорожнього одягу, що призводить до зниження його несучої здатності і зниження довговічності. Нехтування впливом тріщин під час оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу призводить до зниження надійності проектних рішень, зменшення строку служби дорожнього одягу. Отже, існує нагальна потреба у розробленні критеріїв і методів оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів.

2. Оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу має спиратися на:

а) інформацію про всю сукупність параметрів, що визначають здатність конструкції дорожнього одягу опиратися дії транспортного навантаження та погодно-кліматичних факторів, в тому числі про локалізацію тріщин у монолітних шарах покриття та шарах основи та їх геометричні параметри, що вимагає розвитку інструментальних методів діагностики;

б) моделі і методи розрахунку НДС дорожнього одягу з тріщинами, які дозволяють оцінити напруження та деформації, що виникають в конструкції дорожнього одягу з урахуванням наявних руйнувань;

в) імовірнісні методи та критерії оцінювання стану дорожнього одягу, які дозволяють врахувати неоднорідність конструкції дорожнього одягу, що обумовлена, в тому числі, наявністю тріщин у шарах з монолітних матеріалів.

3. Розрахункові моделі з проєктування та оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, що регламентовані нормативними документами, не дозволяють врахувати кількість тріщин, їх положення, геометричні параметри, розміри блоків тріщинуватої основи, пошкодженість матеріалу шару. Основою розрахунку є метод скінченних елементів, що дозволяє застосовувати будь-якій спосіб прикладання навантаження, моделювати тріщини у шарах покриття та

основи, а також моделі, орієнтовані на його застосування.

4. Найбільший потенціал стосовно вирішення завдання дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу 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.

5. Накопичено значний досвід застосування георадарів для пошуку, позиціонування та ідентифікації наскрізних тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, тоді як дослідження у галузі георадарної діагностики прихованих тріщин дуже обмежені.

Таким чином, оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами має спиратися на: результати георадарної діагностики; чисельне моделювання НДС конструкції дорожнього одягу; показники, що дозволяють врахувати геометричну та структурну неоднорідність шарів дорожнього одягу.

Ґрунтуючись на викладеному, **метою дисертаційного дослідження є** розроблення 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 поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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;

5. 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;

6. 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.

Основні результати досліджень першого розділу висвітлено у роботах автора: [65, 66, 149, 266, 295, 307, 308].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ РЕЗУЛЬТАТІВ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ

2.1 Задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарного зондування

Діагностика стану дорожнього одягу, що знаходиться в експлуатації, є ключовим етапом проектування ремонтів дорожнього одягу. Від достовірності інформації, одержуваної за результатами інструментальної діагностики, повноти критеріїв і точності методів оцінювання стану дорожнього одягу залежить якість проектних рішень у частині забезпечення міцності, надійності та довговічності дорожнього одягу. Застосування неруйнівного методу георадарної діагностики дозволяє:

а) істотно розширити обсяг одержуваної інформації про стан дорожнього одягу, в тому числі про його підповерхневу будову, приховані руйнування монолітних шарів дорожнього одягу [257, 266];

б) підвищити достовірність оцінки стану дорожнього одягу, в тому числі з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів [295];

в) забезпечити відповідність проектних рішень фактичному стану нежорсткого дорожнього одягу за критеріями міцності з заданим рівнем надійності [243, 309].

Реалізація зазначеного підходу потребує:

а) розроблення методів інтерпретації і застосування результатів георадарного зондування для вирішення завдання позиціонування та ідентифікації тріщин (в тому числі прихованих) у шарах нежорсткого дорожнього одягу з монолітних матеріалів;

б) обґрунтування методів розрахунку і чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) конструкції дорожнього одягу, в тому

числі з тріщинами (прихованими і наскрізними), для отримання кількісних показників, що характеризують стан нежорсткого дорожнього одягу;

в) розроблення критеріїв і методів оцінювання стану дорожнього одягу, що враховують неоднорідність геометричних і фізико-механічних параметрів шарів, в тому числі, наявність прихованих тріщин у шарах з монолітних матеріалів;

г) розроблення на основі отриманої інформації рекомендацій з оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з прихованими тріщинами.

Вирішення зазначених завдань дозволяє розробити метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, який залучає результати георадарної діагностики, враховує неоднорідність конструкції дорожнього одягу, забезпечує надійність проектних рішень, розвиває і вдосконалює методи діагностики і оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу.

2.2 Постановка задач пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах дорожнього одягу з монолітних матеріалів

Оцінювання стану дорожнього одягу з тріщинами, що ґрунтується на результатах георадарної діагностики, потребує вирішення наступних задач:

а) визначення геометричних параметрів (товщини) шарів конструкції дорожнього одягу та електрофізичних характеристик матеріалів (діелектричної проникності) матеріалу кожного шару;

б) вибору та обґрунтування фізичних принципів пошуку і класифікації тріщин (наскрізні, приховані, одиничні або множинні);

в) розроблення методів інтерпретації результатів вимірювань – перерахунку електрофізичних параметрів тріщин у геометричні параметри.

Відповідно до прийнятої логіки дослідження, розглянемо запропоновані [310, 311, 312, 313, 314] методи та підходи до вирішення означених завдань.

2.2.1 Постановка задачі пошуку і позиціонування тріщин методом георадарного зондування дорожнього одягу

Розглянемо завдання надширококутного підповерхневого зондування дорожнього одягу. Припустимо, без обмеження загальних властивостей, що область зондування (конструкція дорожнього одягу) являє собою плоскошарувате середовище, що складається з чотирьох шарів (рис. 2.1):

а) два шари покриття з асфальтобетону (L_1, L_2) різної товщини (h_1, h_2) з різних матеріалів, що мають різні електрофізичні властивості (ϵ_1, ϵ_2);

б) два шари основи (L_3, L_4) різної товщини (h_3, h_4) із матеріалів, що відрізняються за електрофізичними властивостями (ϵ_3, ϵ_4).

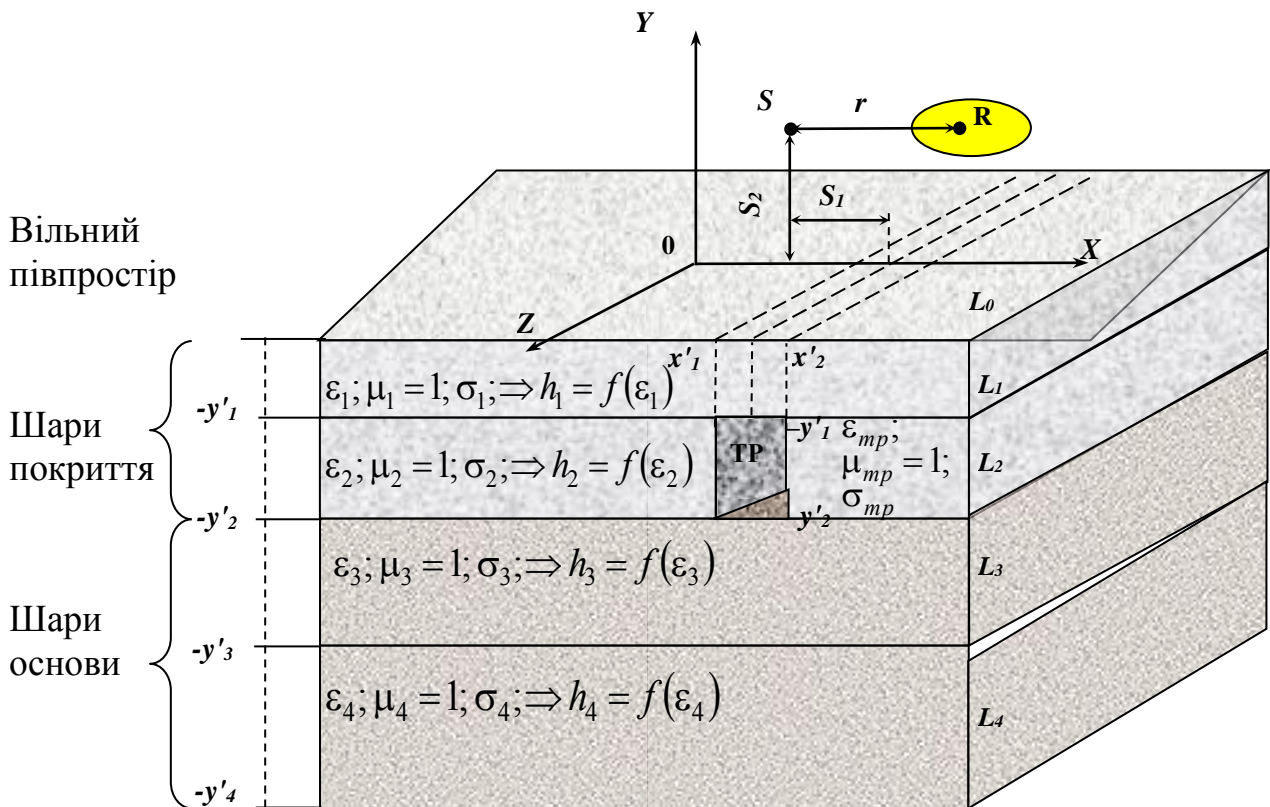


Рисунок 2.1 – Геометрія задачі

У нижньому шарі асфальтобетонного покриття на деякій глибині знаходиться тріщина (TP). З електродинамічної точки зору потрібно вирішити задачу аналізу електромагнітного поля, яке розсіяне плоскошаруватою

структурою за умови різних значень параметрів тріщини – ширини $(x'_2 - x'_1)$ та глибини розташування тріщини $(-y'_1)$, а також різної висоти розташування антенної системи над поверхнею конструкції (S_2) та тривалості і стану поляризації зондувального імпульсу. Під час розв'язання задачі зробимо наступні припущення:

а) можна знехтувати впливом на відбитий сигнал нерівностей поверхні шарів дорожнього одягу [243, 315], що підтверджено результатами моделювання та лабораторних експериментів [316];

б) тріщина з точки зору геометрії є прямокутним паралелепіпедом;

в) крайка проїзної частини не спотворює електромагнітне поле, що формується, через значну ширину проїзної частини;

г) співвідношення між довжиною тріщини та шириною її розкриття досить велике, що дозволяє не враховувати вплив граней тріщини за довжиною на електромагнітне поле, що формується.

Нехай з верхнього півпростору $L_0 = \{(x, y, z) : y > 0\}$ (вільний простір – повітря) (рис. 2.1), що має діелектричні властивості ідентичні з вакуумом, на плоску границю розділу середовищ з координатою $y = 0$ від джерела S падає імпульсний сигнал. Внутрішнє середовище складається з чотирьох однорідних діелектричних шарів $L_i = \{(x, y, z) : -y_{i-1} \leq y < -y_i\}; i = 1, \dots, 4; y_0 = 0$. Виняток: деяка, обмежена за напрямками X та Y і нескінчена за напрямком вісі Z , прямокутна у поперечному перерізі частина простору (модель тріщини) $TP = \{(x, y, z) : -y'_1 \leq y \leq -y'_2, x'_1 \leq x \leq x'_2\}$. Точки спостереження, де визначаються параметри електромагнітного поля, розташовані у деякій обмеженій частині області R півпростору L_0 . Ця область відповідає точці розташування приймальної антени георадару. З математичної точки зору ставимо завдання знаходження розв'язку системи векторних диференціальних рівнянь – рівнянь Максвелла з відповідними початковими та граничними умовами. У декартовій системі координат рівняння Максвелла мають вигляд [317, 318]:

$$\begin{cases} \operatorname{div}\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}; & \operatorname{div}\mathbf{B} = 0; \\ \operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}; & \operatorname{rot}\mathbf{B} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \cdot \frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} + \mu\mu_0(\sigma\mathbf{E} + \mathbf{j}_i(t)) \end{cases}, \quad (2.1)$$

де E – напруженість електричного поля;

B – вектор магнітної індукції;

$$-\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} + \mathbf{j}_S;$$

\mathbf{j}_S – сторонні джерела;

ρ – об'ємна щільність стороннього електричного заряду, Кл/м³;

σ – питома електрична провідність, См/м;

ε_0 – діелектрична проникність вільного простору, Ф/м;

μ_0 – магнітна проникність вільного простору, Гн/м;

ε – відносна діелектрична проникність, відн. од.;

$\mu = 1$ – відносна магнітна проникність матеріалу шару, відн. од.;

c – швидкість світла у вакуумі, см/нс.

Імпульсне електромагнітне поле, розсіяне прихованими тріщинами, формується хвилею, яка збуджується зондувальним імпульсом. У постановці задачі за збуджуючий антену сигнал приймаємо імпульс струму, часова залежність якого має вигляд гауссовського імпульсу [311]:

$$I(t) = A \cdot \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{t_c}\right)^2\right], \quad (2.2)$$

де t_0 – зсув по часовій осі від початку координат, нс;

t_c – час спаду початкового гауссовського імпульсу, нс;

A – амплітудний коефіцієнт.

Під час розв'язання задач зондування дорожнього одягу з урахуванням поглинання сигналів у реальних матеріалах доцільно використовувати імпульси з центральної частотою від 0,9 ГГц до 1,2 ГГц [245, 246]. Для визначення діелектричних характеристик конструктивних шарів дорожнього одягу зробимо

наступні додаткові припущення:

а) матеріали шарів дорожнього одягу є однорідними, ізотропними та немагнітними;

б) тріщина (TP) являє собою прямокутний паралелепіпед, який є немагнітним та однорідним у всіх точках ($\epsilon_{TP} = \text{const}$, $\mu_{TP} = 1$);

в) площину, що є ортогональною до напрямку руху георадару, доцільно вважати двовимірною.

Система рівнянь (2.1) і геометрія завдання формують коректний математичний опис процесу георадарного зондування дорожнього одягу з прихованими тріщинами у монолітних шарах. У постановці завдання (2.1), основними електрофізичними характеристиками матеріалів шарів дорожнього одягу, які визначають характер розповсюдження електромагнітних хвиль у плоскошаруватому середовищі, є відносна діелектрична проникність (ϵ), магнітна проникність (μ), питома електрична провідність (σ). Якщо магнітну проникність більшості матеріалів конструкції дорожнього одягу можна вважати постійною ($\mu = 1$), то відносна діелектрична проникність, питома електрична провідність істотно залежать від вологості та щільності матеріалу [246, 319, 320, 321] та змінюються у широких межах (таблиця 2.1).

Ще одним фактором, що обмежує використання табличних значень відносної діелектричної проникності є її залежність від способу вимірювань та частоти зондувального імпульсу. Як зазначено в [322] та підтверджено експериментально [266, 316, 323], сухі, монолітні матеріали матимуть низькі значення діелектричної проникності, в той час як вологонасичені, пористі, тріщинуваті матеріали матимуть високі значення діелектричної проникності та низьку швидкість поширення електромагнітних хвиль. Контраст у діелектричній проникності матеріалів шарів дорожнього одягу визначає відбивну здатність границі конструктивних шарів, а також разом з лінійними розмірами тріщин, віднесеними до довжини хвилі, визначає здатність до утворення дифрагованих хвиль.

Тріщини є дифрагуючими об'єктами за умови, що довжина хвилі електромагнітного поля $\lambda \gg D$, де D – ефективна ширина тріщини [324].

Таблиця 2.1 – Електрофізичні параметри матеріалів конструктивних шарів дорожніх одягів [246, 319, 320, 321]

Середовище	Діелектрична проникність, (ϵ)	Провідність, (σ), См/м
Повітря	1	0
Вода	81	від 0,001 до 0,002
Сухий асфальтобетон	від 3 до 6	від 0,00002 до 0,0001
Вологий асфальтобетон	від 6 до 12	від 0,0001 до 0,0002
Сухий бетон	від 5 до 8	від 0,00000001 до 0,0001
Вологий бетон	від 8 до 16	від 0,0001 до 0,001
Бетон (на частоті 1200 МГц)	від 6 до 9	від 0,001
Асфальтобетон (на частоті 1200 МГц)	7	від 0,00002 до 0,0001
Граніт	від 5 до 7	від 0,0000001 до 0,000001
Базальт	від 5,3-8	0,0000001
Щебінь гранітний	від 4,0 до 4,8	від 0,0002 до 0,05
Пісок сухий	від 3-5	0,00002 до 0,0001
Кварц	від 4,5 до 4,7	від 0,000001 до 0,00000001
Доломіт	від 7,0 до 35	0,001
Вапняк	від 7,5 до 30	0,02

Дифрагована хвиля від тріщини, що розташована у шарі з діелектричною проникністю (ϵ), на радарограмі відображається у вигляді гіперболи (годографа дифрагованої хвилі) математичний вираз якої має вигляд [249, 325]:

$$t(x) = \frac{2 \cdot L}{V} = \frac{2 \cdot \sqrt{x^2 + h^2}}{V}, \quad (2.3)$$

де $t(x)$ – час точки на осі синфазності, нс;

x – відстань від точки на осі синфазності до приймача, см;

L – шлях, який пройшла хвиля, см;

$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$ – швидкість у шарі над неоднорідністю, см/нс;

h – глибина залягання об'єкта, см.

Відзначимо, що вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у монолітних шарах дорожнього одягу передбачає інтерпретацію результатів георадарного зондування, що виконується

антенними блоками двох типів [310, 326]: блоком дипольних антен та блоком антен щілинного типу, що реєструють крос-поляризаційну компоненту відбитого сигналу. Ця компонента утворюється за наявності неоднорідностей (у тому числі тріщин) у шарах конструкції дорожнього одягу.

2.2.2 Математичні моделі пошуку та позиціонування прихованих тріщин

Задачі пошуку прихованих тріщин у квазіоднорідних середовищах та визначення параметрів середовища по годографах дифрагованих хвиль вирішуються методами:

а) вимірювання часу затримки сигналу у двох точках годографа для обчислення глибини розташування об'єкта та діелектричної проникності середовища [324, 327, 328];

б) оцінювання швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль у середовищі за нахилом дотичної до асимптоти годографа [283];

в) порівняння годографа, що спостерігається, з розрахунковим [324, 329].

Обробка даних георадарного зондування здійснюється за рівнянням (2.3) для часу затримки, що вимірюється у двох точках. З цих рівнянь одержують глибину шару h_1 та діелектричну проникність ε_1 [324]. Але, оскільки границя дотичній до асимптоти годографа дорівнює $2 \sin \alpha / V$, значення швидкості та глибини розташування лінійного об'єкта залежатиме від кута перетинання профілю спостережень і осі лінійного об'єкта (α). Це потребує інших алгоритмів визначення діелектричної проникності середовища, що містить тріщину, та глибини її розташування. Тому у дисертаційному дослідженні пропонується визначати діелектричну проникність шару з тріщиною та глибину її знаходження методом пошарового відновлення діелектричної проникності плоскошаруватого середовища [311, 314].

Як доводять результати експериментальних георадарних досліджень,

задача пошуку прихованих тріщин може бути вирішена шляхом пошуку та аналізу годографів дифрагованих хвиль [65, 314, 316, 330].

Представимо шар дорожнього одягу, що містить тріщину, як простір, обмежений у горизонтальній площині з діелектричною проникністю $\varepsilon = \text{const}$, що містить тріщини. Пошук неоднорідностей у вигляді тріщин може бути виконаний за допомогою алгоритмів гіперболічної міграції та пошуку локальних екстремумів (рис. 2.2). Реальна точність пошуку тріщин по годографах дифрагованих хвиль у польових умовах істотно залежить від форми імпульсу, конструктивних особливостей георадару, апаратних налаштувань знімання та методики вимірювань, які будуть розглянуті у наступних розділах.

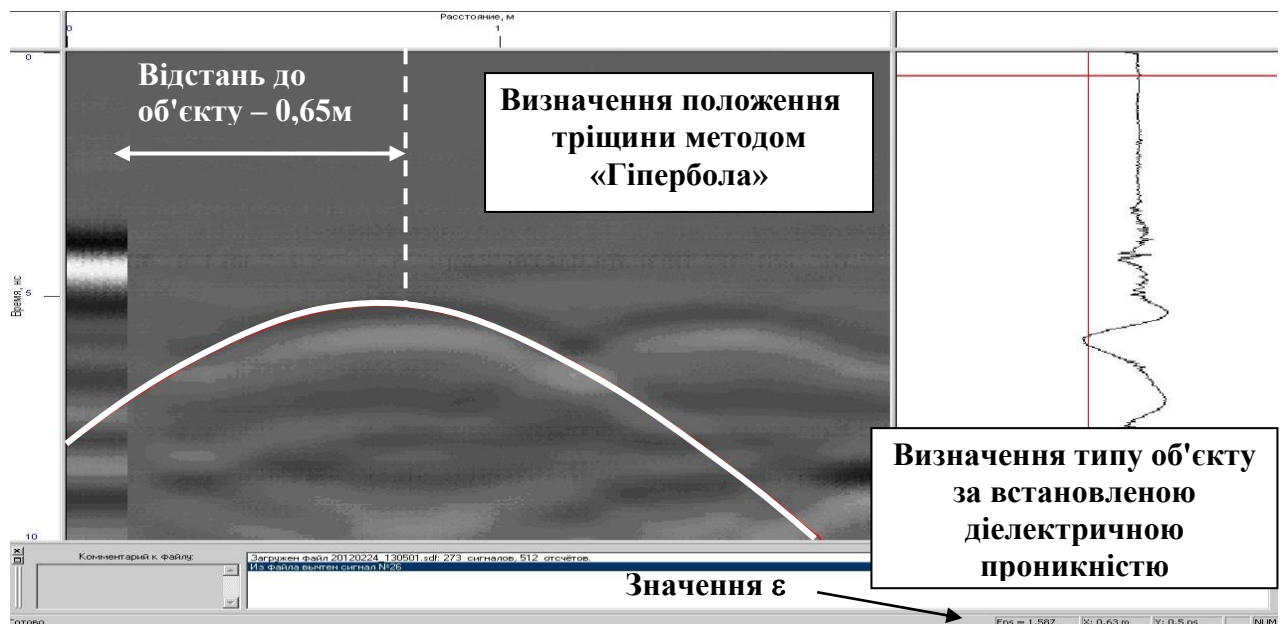


Рисунок 2.2 – Пошук тріщини за методом гіперболи

Теоретичну основу алгоритму обробки георадарних даних при позиціонуванні тріщин у шарах дорожнього одягу складають формули Френеля, що дозволяють на першому етапі визначити товщину шарів та їх діелектричну проникність [331].

Рішення завдання складається з декількох етапів:

а) після первинної обробки георадіолокаційних даних за допомогою перетворення Гільберта [332] визначаються часові затримки сигналів (Δt_i),

відбитих від границь шарів і амплітуди цих сигналів;

б) за формулою, що виходить з формул Френеля [311, 317]

$$\sqrt{\varepsilon_{j+1}} = \sqrt{\varepsilon_j} \frac{1 - R_{j,j+1}}{1 + R_{j,j+1}} \quad (2.4)$$

визначається $\sqrt{\varepsilon_1}$ і далі ε_1 – діелектрична проникність верхнього шару і коефіцієнт відбиття від нижньої границі шару у верхню ($R_{j,j+1}$);

в) за формулами коефіцієнтів проходження електромагнітної хвилі через границю шарів конструкції [311]

$$T_{n\mp 1,n} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}} \\ \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}} \end{cases} \quad (2.5)$$

обчислюються коефіцієнти проходження через верхню границю у перший шар і назад $T_{0,1}$ і $T_{1,0}$, а також коефіцієнт відбиття від нижньої границі верхнього шару $R_{1,2}$, що дозволяє згідно з (2.4) обчислити діелектричну проникність другого шару (ε_2);

г) за формулами (2.4 - 2.5) обчислюється діелектрична проникність шарів дорожнього одягу і розраховуються координати границь шарів:

$$Z_i = \sum_{i=1}^I \frac{(t_i - t_{i-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_i}} = \sum_{i=1}^I \frac{\Delta t_i \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_i}}, \quad (2.6)$$

де Z_i – координата i -й границі (верхня границя має індекс 0), см;

t_i, t_{i-1} – час проходження сигналом i -й ($(i-1)$ -й) границь відповідно, нс;

ε_i – діелектрична проникність i – го шару;

c – швидкість поширення світла у вільному просторі (в повітрі), см/нс;

д) розраховується товщина шарів (h_i):

$$h_i = Z_i - Z_{i-1}; \quad Z_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (2.7)$$

Підкреслимо, що сигнал, відбитий від верхньої границі покриття, у більшості реальних випадків має максимальну амплітуду. Тому головна ідея, яку покладено в основу методу визначення товщини шарів, – калібрування сигналу за первинним максимумом. Слід зазначити, що нормативні документи [398] передбачають проведення попереднього калібрування георадарного обладнання за допомогою відбору кернів і, за необхідності, коригування алгоритму обробки для підвищення точності та достовірності відновлення діелектричної проникності матеріалів шарів дорожнього одягу.

У дисертаційному дослідженні визначення товщини та діелектричної проникності шарів є допоміжним етапом, результати якого дозволяють вирішити завдання визначення напрямку тріщин та оцінку їх геометричних параметрів.

2.2.3 Алгоритм обробки імпульсних сигналів при вирішенні задач ідентифікації прихованих тріщин

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень для обробки результатів реєстрації крос-поляризаційної компоненти зондувального імпульсу розроблено алгоритм позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин, який складається з наступних етапів (рис. 2.3):

а) калібрування антенних блоків для обґрунтованого вибору еталонної ділянки без тріщин та наступної реєстрації і запису еталонних радарограм;

б) отримання первинних даних та їх обробки з метою поліпшення якості отриманої інформації – видалення перешкод, фільтрація;

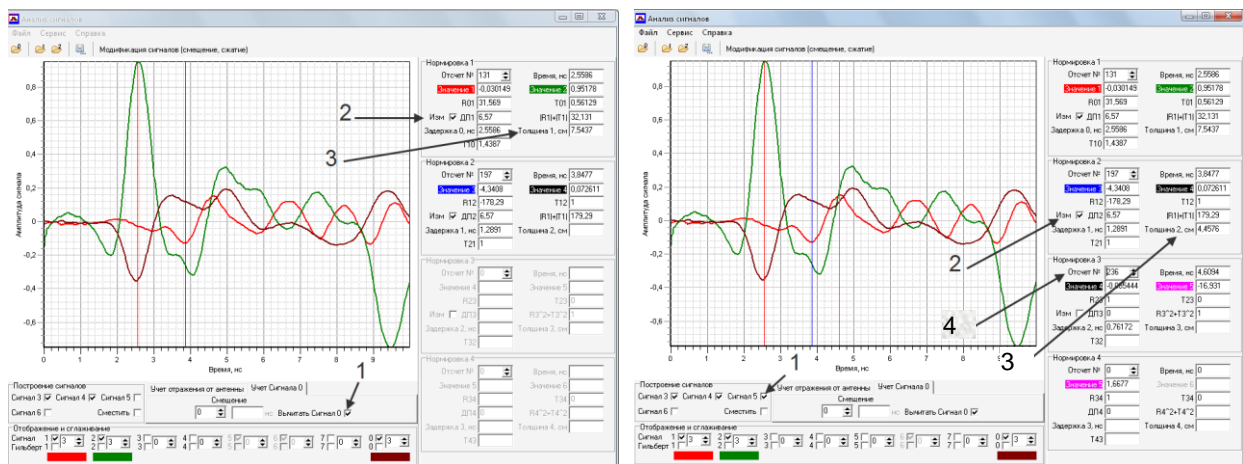


Рисунок 2.3 – Схема алгоритму обробки імпульсних сигналів при вирішенні задач пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин

в) віднімання з луна-профілю сигналу прямого проходження з метою підвищення достовірності результатів подальшої обробки сигналів;

г) оцінка глибини розташування центру (вісі) тріщини. Під час виконання цього етапу, застосовуються дані сканування блоком дипольних антен, що дозволяє визначити діелектричну проникність (2.4) і товщину шарів конструкції дорожнього одягу (2.7). За наявності тріщин шириною понад 0,2 см у шарах з діелектричною проникністю матеріалу понад $\epsilon = 5$ і товщиною від 4 см можлива оцінка координат нижньої і верхньої границь тріщини (рис. 2.4);

д) оцінка геометричних параметрів – ширини розкриття тріщини. Цей етап спирається на застосування компараційного алгоритму, що полягає у порівнянні сигналів, що відбиті від шарів з тріщиною, з модельними сигналами, що відбиті від тріщин з відомими параметрами. Набор модельних сигналів, які отримані за результатами лабораторних досліджень, формують базу сигналів.



1 – вибір сигналів, 2 – діелектрична проникність, 3 – товщина шару;

4 – номер відлику сигналу

Рисунок 2.4 – Визначення глибини розташування тріщини: а) верхня границя; б) нижня границя

Основним критерієм оцінки є «близькість» сигналів, що оцінюється або оператором, або за допомогою обчислення нев'язки – квадрата різниці між відліками часових розподілів реального та модельного сигналів:

$$N_i = \int_0^T (\overline{f}(t) - \overline{F}_i(t))^2 dt, \quad (2.8)$$

де $\overline{f}(t)$, $\overline{F}_i(t)$ – часовий розподіл реального та модельного сигналів відповідно.

Таким чином, у межах фізичних обмежень методу георадіолокації, головними результатами роботи алгоритму є координати, глибина та ширина розкриття тріщини. Алгоритм реалізований у Методиці дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування: М 02071168-706:2012 [268].

2.3 Моделі і методи розрахунку напружено-деформованого стану дорожнього одягу з тріщинами у покритті та шарах основи

Застосування георадарної діагностики дозволяє отримати найбільш повну та достовірну інформацію про підповерхневу будову дорожнього одягу: наявність руйнувань шарів дорожнього одягу; кількість тріщин та їх геометричні параметри; фізико-механічні характеристики матеріалів шарів дорожнього одягу (п. 2.1). Ця інформація разом з даними про вид матеріалів шарів дорожнього одягу, їх модуль пружності і коефіцієнт Пуассона, які можуть бути отримані із залученням інших методів інструментальної діагностики, відкривають можливості чисельного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) конструкції дорожнього одягу з тріщинами у покритті та шарах основи з метою визначення напружень і деформацій, що виникають під дією навантаження від транспортних засобів та погоднокліматичних факторів. Результати чисельного моделювання НДС створюють основу кількісної оцінки стану дорожнього одягу.

2.3.1 Основні теоретичні положення розрахунку НДС дорожніх одягів

Основу розрахунків НДС дорожнього одягу створюють базові рівняння теорії пружності, які складаються з трьох груп [333]. Для отримання цих

рівнянь поблизу даної точки виділяється елементарний паралелепіпед з розмірами dx , dy , dz і перша група рівнянь, які називаються статичними, визначає умови рівноваги цього елемента. Друга група – геометричні рівняння, що пов'язують деформації елемента з переміщеннями його точок. Третя група – рівняння, що виражає залежність між напруженнями і деформаціями. Оскільки в цих рівняннях враховуються механічні властивості матеріалу, їх прийнято називати фізичними. По суті, вони виражають закон Гука і мають вигляд [333]:

а) статичні рівняння [333]:

$$\mathbf{A}\vec{\sigma} + \vec{g} = 0, \quad (2.9)$$

де $\vec{\sigma}$ – вектор напружень;

\vec{g} – вектор інтенсивності об'ємного навантаження (наприклад, вага, сила інерції і т.д.).

Матричний оператор диференціювання має вигляд [333]:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{vmatrix}; \quad (2.10)$$

б) геометричні рівняння – рівняння Коші [333]:

$$\vec{\varepsilon} = \mathbf{A}^T \vec{u}, \quad (2.11)$$

де $\vec{\varepsilon}$ і \vec{u} – вектори деформацій та переміщень;

\mathbf{A}^T – матриця, яка є транспонованою по відношенню до матриці \mathbf{A} (2.10);

в) фізичні рівняння теорії пружності [333]:

$$\vec{\varepsilon} = \mathbf{C}\vec{\sigma}, \quad (2.12)$$

де \mathbf{C} – матриця пружної піддатливості матеріалу, представлена у вигляді [333]:

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{vmatrix}. \quad (2.13)$$

Рівняння (2.13) для лінійно-пружних ізотропних тіл виражає узагальнений закон Гука з урахуванням зв'язку між модулями пружності при розтягу (E), зсуві (G) і коефіцієнтом Пуассона (μ) виду [333]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (2.14)$$

Рівняння (2.4) дозволяють визначати деформації, якщо відомі напруження і представляють закон Гука в прямій формі. Іноді, при вирішенні практичних завдань виникає необхідність зворотної постановки задачі, тобто визначення напружень по відомим деформаціям. У такій ситуації необхідно вирішити рівняння (2.4) щодо напружень. Для вирішення цього завдання використовується закон Гука у зворотній формі [333]:

$$\vec{\sigma} = \mathbf{D} \vec{\epsilon} \quad (2.15)$$

де \mathbf{D} – матриця жорсткості матеріалу, що має вигляд [333]:

$$\mathbf{D} = \begin{vmatrix} 2G + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2G + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2G + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{vmatrix}, \quad (2.16)$$

а параметр λ – коефіцієнт Ляме [333]:

$$\lambda = \frac{2\mu G}{1 - 2\mu} = \frac{\mu E}{(1 - 2\mu) \cdot (1 + \mu)}. \quad (2.17)$$

Оскільки рівняння (2.9, 2.11) є диференціальними, то для знаходження єдиного рішення задачі у кожному конкретному випадку до співвідношень (2.9, 2.11, 2.12) необхідно додати додаткові умови. Під час розгляду статичних задач це повинні бути умови на границях (граничні умови) і умови, що задають навантаження.

Для вирішення реальних практичних завдань застосовують метод скінченних елементів. Ідея методу полягає в апроксимації шуканої безперервної функції за допомогою кусочно-безперервної функції, яка будується на значеннях досліджуваної величини в кінцевому числі точок розглянутих елементів. Конструкція розглядається як деяка сукупність елементів, які з'єднані у кінцевій кількості вузлових точок. Якщо відомі характеристики (співвідношення між переміщеннями і силами) кожного елемента, то можна обчислити і дослідити поведінку конструкції за заданих граничних і початкових умовах. У методі скінченних елементів рішення крайової задачі шукається у вигляді набору функцій, які визначені на скінченних елементах. Вид функцій, що апроксимують, визначається кількістю точок з'єднання. Наприклад, якщо на одному ребрі крім двох вершин є ще й проміжний вузол, то апроксимуючою функцією є квадратичний поліном. Такий елемент є найбільш ефективним для розрахунку конструкції дорожнього одягу і буде далі застосовуватися як основний.

Основою формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь для статичних задач є закон Гука в узагальненій формі:

$$K \cdot u = F, \quad (2.18)$$

де u – вектор-стовбець вузлових зміщень елемента;

F, F – вектор-стовбець сил;

K – матриця жорсткості.

Альтернативний підхід (що призводить до аналогічних систем) полягає в залученні принципу Лагранжа, згідно з яким у стані рівноваги повна потенційна енергія Π системи приймає стаціонарне значення:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u} = 0. \quad (2.19)$$

Таким чином, проведений аналіз дозволив обґрунтувати доцільність застосування методу скінченних елементів і відповідних моделей для вирішення задач аналізу НДС конструкції дорожнього одягу. Для подальших досліджень використовується програмний комплекс ANSYS.

2.3.2 Обґрунтування параметрів скінчено-елементної моделі

2.3.2.1 Обґрунтування представницького об'єму

Для отримання максимально коректних результатів необхідно узгоджене використання як моделей навантажень (транспортних засобів), так і фізико-геометричних моделей конструкції дорожнього одягу. У загальній постановці [334], модель навантажень і геометрична модель конструкції дорожнього одягу є невиправдано громіздкими. Ключовою проблемою при цьому є призначення оптимальних геометричних розмірів представницького об'єму [335]. Збільшення розмірів представницького об'єму призводить до збільшення порядку розв'язуваної системи лінійних алгебраїчних рівнянь, накопичення помилок округлення і, як наслідок, зниження точності рішення [336]. Тому виникає завдання оптимізації лінійних розмірів представницького об'єму. Такі питання розглядалися лише в небагатьох роботах, серед яких слід відзначити [83], де для оцінювання точності рішень автори використовували порівняння з найпростішими аналітичними рішеннями [337]. Однак, збіг результатів, що отримані різними методами для простих модельних задач, не свідчить про їх адекватність у разі більш складних моделей. Тому під час дослідження моделей

конструкцій з тріщинами потрібен інший підхід.

Під час вирішення завдань чисельного моделювання для контролю результатів використовують аналіз асимптотичної поведінки рішення. Суть підходу полягає у контролі деякої нев'язки зі збільшенням розмірності задачі [336]. Введемо поняття похибки визначення деяких характеристик і запишемо задачу їх мінімізації:

$$\{\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n\} \rightarrow \min \text{ або } \{\delta z_n, \delta \varphi_n, \delta r_n\} \rightarrow \min, \quad (2.20)$$

де $(\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n)$ і $(\delta z_n, \delta \varphi_n, \delta r_n)$ – декартові або циліндричні координати n -го вузла. Очевидно, що в ідеальному випадку для множини всіх вузлів $\{N\}$ моделі, повинні виконуватися співвідношення:

$$\delta x_n = \delta y_n = \delta z_n \quad \text{або} \quad \delta z_n = \delta \varphi_n = \delta r_n. \quad \forall n \in \{N\}. \quad (2.21)$$

Тобто, при збільшенні розмірності (розмірів) моделі, всі вузли попереднього кроку повинні зберегти координати. Природно, що така вимога практично нездійсненна. Тому її можна замінити умовою досягнення мінімуму нев'язки (α), яку запишемо як:

$$\alpha = \sqrt{\sum_1^N (x_n^2 + y_n^2 + z_n^2)} \rightarrow \min, \text{ або } \alpha = \sqrt{\sum_1^N (r_n^2 + \varphi_n^2 + z_n^2)} \rightarrow \min. \quad (2.22)$$

Такий метод контролю для вирішення практичних завдань є громіздким і вимагає значної витрати обчислювальних ресурсів. Тому, у дослідженні пропонується наступний метод контролю точності одержуваних результатів:

а) виходячи із загальних рекомендацій для простих моделей без тріщин [83], призначаються мінімальні значення параметрів моделі (розміри представницького об'єму і елементів) і проводиться розрахунок НДС конструкції;

б) обирається сукупність найбільш важливих точок, що визначають НДС конструкції (сингулярності поблизу ребер тріщин, точки максимальних напружень на границі нижнього шару і максимальних зсувних напружень в шарах з незв'язних матеріалів) і характеризують адекватність моделі (характерні точки на ребрах і гранях представницького об'єму);

в) додається приріст геометричних параметрів представницького об'єму і виконується повторний розрахунок для нової моделі;

г) проводиться аналіз змін показників НДС в обраних точках.

При цьому можна порівнювати, як значення нев'язки типу (2.22), де проводиться підсумовування тільки по переміщеннях обраних вузлів моделі, так і встановити максимальні межі значень параметрів у цих вузлах (для одного або декількох параметрів) по досягненні яких обчислення зупиняються.

Зважаючи на складність даної задачі (у порівнянні з моделями, що допускають аналітичне рішення) вказати апріорі весь мінімально необхідний набір вузлів, параметрів (крім переміщень, це можуть бути деформації й напруження) неможливо, тому у кожному конкретному випадку це завдання необхідно вирішувати окремо. Однак, для певних наборів моделей з типовими параметрами можна, за результатами попередніх розрахунків, вказати межі значень і обмежень.

Будемо використовувати дві основні форми представницького об'єму:

а) прямокутний паралелепіпед для моделювання НДС конструкції, що містить тріщину;

б) круговий циліндр для розв'язання осесиметричної задачі.

В останньому випадку, для скорочення часу рахунку і необхідних обчислювальних ресурсів використовуватиме половину або четверту частину представницького об'єму з граничними умовами на додаткових поверхнях.

2.3.2.2 Граничні умови

Будемо використовувати такі умови на віртуальних границях (граничних поверхнях представницького об'єму):

а) нерухоме закріплення (fixed support):

$$\delta x_p = \delta y_p = \delta z_p \quad \text{або} \quad \delta z_p = \delta \varphi_p = \delta r_p, \quad \forall p \in \{P\}, \quad (2.23)$$

де p – номери вузлів, що належать відповідній поверхні, на якій задається умова;

$\{P\}$ – множина вузлів;

б) ковзаюче (без тертя) закріплення (frictionless support) для плоских поверхонь у декартовій (локальній) системі координат:

$$\delta x_p = \delta y_p = 0 \quad \forall p \in \{P\}; \quad (2.24)$$

в) циліндричне закріплення (cylindrical support) для завдання рухливих вузлів на циліндричних поверхнях в осесиметричних задачах:

$$\delta r_p = \delta \varphi_p = 0 \quad \forall p \in \{P\}. \quad (2.25)$$

2.3.2.3 Види елементів

Для вирішення задачі розрахунку НДС конструкції дорожнього одягу представницький об'єм розбивається на сукупність елементів із загальними вузловими точками (у тривимірному випадку – елементарні об'єми), властивості матеріалу яких збігаються з властивостями матеріалу тіла у даній області. З математичної точки зору це означає, що безперервна величина (розподіл маси, щільність, напруження і т.д.) замінюється її кусково-безперервною апроксимацією [338, 339]. Тоді конструкція є набором елементів, з'єднаних у скінченній кількості точок (вузлів). Вид (форма, кількість вузлів) скінченних елементів визначається специфікою геометричної моделі. Під час побудови моделі конструкції дорожнього одягу застосовувалися два види елементів (рис. 2.5).

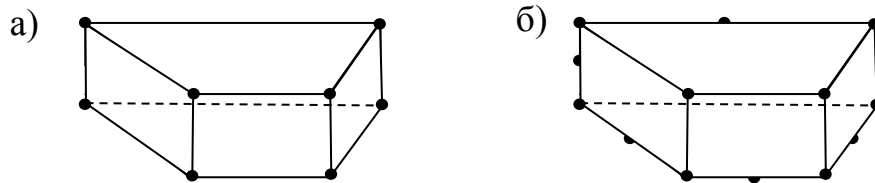


Рисунок 2.5 – Вид елементів моделі: а) гексаедр (призма), 8 вузлів; б) гексаедр, 20 вузлів

Під час формування скінченно-елементних моделей з тріщинами в області концентраторів напружень (тріщини) і сингулярностей (ребра тріщин) проводилося згущення (зменшення розмірів) елементів за допомогою програм – автоматизованих генераторів сітки.

2.3.3 Модель конструкції дорожнього одягу

Найпростіша модель асфальтобетонних шарів конструкції нежорсткого дорожнього одягу являє собою пружний матеріал із заданими постійними модулем пружності (модуль Юнга) і коефіцієнтом Пуассона [11]. Шари з незв'язних матеріалів і ґрунт земляного полотна також вважатиме однорідними, оскільки розміри неоднорідностей істотно менше характерних масштабів зміни полів напружень і деформацій. Тому для режимів навантаження, що характерні для конструкції дорожнього одягу, властивості цих матеріалів у більшості випадків досить добре описують фізичні моделі однорідних ізотропних пружних (або в'язко-пружних) середовищ.

Геометрична модель дорожнього одягу являє собою нескінченне плоскошарувате середовище, що розташовано на півнескінченному просторі з відомими фізико-механічними властивостями. Модель навантаження від колеса автомобіля представлена круглий жорстким штампом, що створює рівномірний тиск на поверхню покриття [11].

Геометричну модель дорожнього одягу, як й у роботі [65], формує представницький об'єм у вигляді прямокутного паралелепіпеда (моделі з

тріщиною) або циліндра (моделі без тріщини) з нерухомою основою (нижньою поверхнею). На всіх зовнішніх бокових поверхнях заданий ковзаючий контакт, який передбачає вільне переміщення поверхні уздовж зовнішньої площини в ортогональних до поверхні напрямках (униз – вгору) без зміни (деформації) всього об'єму. З метою оптимізації часу розрахунків, а також для підвищення достовірності одержуваних результатів, для розрахунків застосовані моделі з різними наборами скінченних елементів.

Розмір елементів змінювався залежно від близькості до навантаження. Розмір елементів обґрунтовувалися, виходячи з умови – зменшення розміру елемента не впливає на кінцевий результат, а лише збільшує час розрахунку.

Структурні частини скінченно-елементної моделі: шари конструкції дорожнього одягу – чотиришарова модель, що складається з двох шарів покриття, шару основи, ґрунту земляного полотна. Елементи – гексагональні впорядковані прямокутні об'єми у кожному шарі конструкції із заданими фізичними властивостями матеріалу – модулем пружності і коефіцієнтом Пуассона. Оскільки постановка задачі передбачає оцінювання стану дорожнього одягу в розрахунковий період [26, 28, 204, 340], температура матеріалів шарів, що містять органічне в'язуче, дорівнює $+ 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Параметри навантаження: діаметр штампа і питомий тиск приймаються відповідно до розрахункового навантаження A2 і A3 згідно з [94]. Граничні умови на бічних поверхнях штампа відповідають циліндричному закріпленню (cylindrical support). Взаємодія навантаження з поверхнею покриття здійснюється з коефіцієнтом тертя 0,3, що відповідає взаємодії гумової покриття з вологою поверхнею асфальтобетонного покриття.

Досліджувалися моделі: без порушень суцільності шарів покриття (без тріщин); з порушенням суцільності нижнього шару покриття (приховані тріщини); з порушеннями суцільності на всю глибину покриття (наскрізні тріщини). Представницький об'єм моделей, що мають розриви суцільності шарів (що містять тріщини) має форму прямокутного паралелепіпеда (рис. 2.6) або циліндра (рис. 2.7).

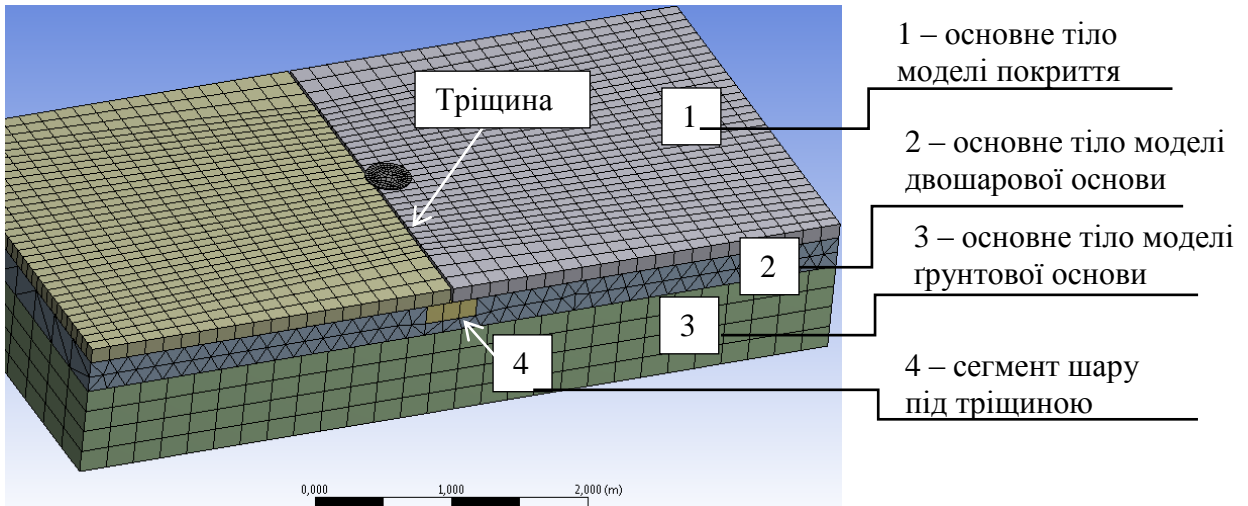


Рисунок 2.6 – Модель для розрахунку НДС конструкції дорожнього одягу з наскрізною тріщиною в покритті

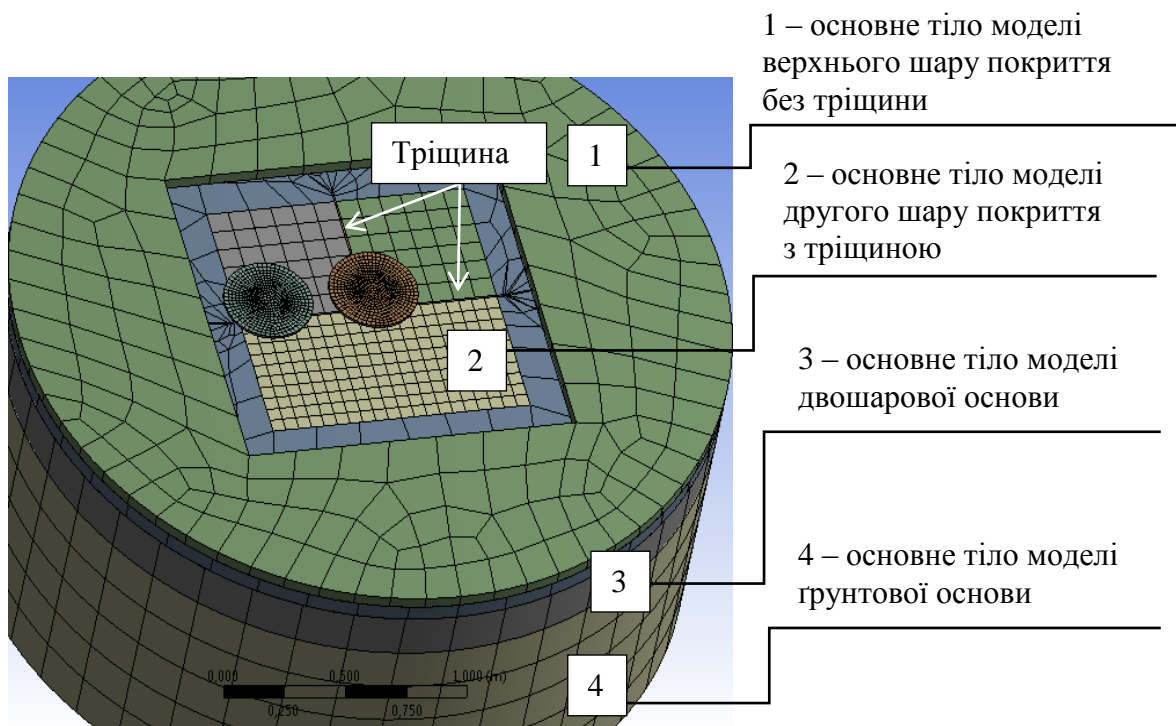


Рисунок 2.7 – Модель для розрахунку НДС конструкції дорожнього одягу з прихованою тріщиною у нижньому шарі покриття

Для досліджень НДС конструкції дорожнього одягу без тріщин, через осьову симетрію задачі представницький об'єм має форму циліндра діаметром 3,0 м і висотою 1,3 м (рис. 2.8).

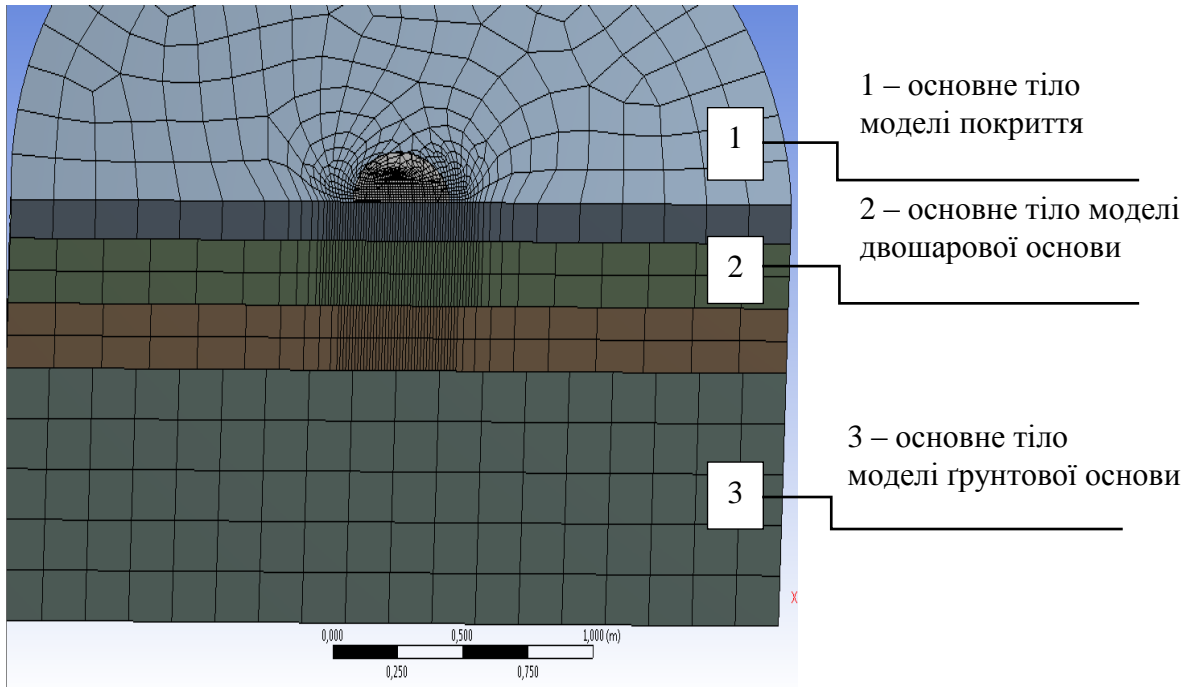


Рисунок 2.8 – Модель для розрахунку НДС конструкції дорожнього одягу без тріщин

2.4 Модель оцінювання стану дорожнього одягу

Для дорожнього одягу, що знаходиться в експлуатації, характерні значні відмінності у фізико-механічних характеристиках матеріалів та геометричних параметрах шарів, що змінюються у процесі експлуатації. Дослідження, що проведені Б.С. Радовським, І.А.Золотарем, М.С. Коганзоном, В.К. Некрасовим, С.В. Коноваловим, В.В. Філіпповим, В.М. Шестаковим, Ю.М. Яковлевим [41, 159, 163, 340 – 342], А.В. Семеновим [187], В.В. Столяровим [343, 344], І.П. Гамляком [57], доводять істотну мінливість фізико-механічних характеристик матеріалів дорожніх одягів та ґрунтів земляного полотна. Дослідженнями Б.С. Радовського [67], І.П. Гамляка [57], В.В. Столярова [343],

А.Г. Батракової [243] експериментально підтверджено неоднорідність геометричних параметрів дорожніх одягів, що знаходяться в експлуатації, навіть на незначних за довжиною ділянках автомобільних доріг. Отже, основною метою даного параграфа є обґрунтування можливості врахування мінливості вихідних даних під час оцінювання стану дорожнього одягу, розроблення показників, що характеризують його стан, встановлення зв'язку між показниками стану та надійністю конструкції дорожнього одягу.

2.4.1 Постановка задачі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики

2.4.1.1 Критерії оцінювання стану дорожнього одягу

Основним показником, що характеризує стан дорожнього одягу, є його надійність, яка враховує фактичний розкид параметрів конструкції дорожнього одягу та їх змінювання у процесі експлуатації. З іншого боку, оцінювання стану дорожнього одягу, що знаходяться в експлуатації, доцільно проводити за показниками, які характеризують здатність конструкції чинити опір впливу транспортного навантаження та погодно-кліматичних факторів, і спираються на результати інструментальної діагностики [57, 82, 164, 345]. Тому, показник, що характеризує стан дорожнього одягу, має враховувати: жорсткість конструкції, яка визначається коефіцієнтом запасу міцності за допустимим пружним прогином (K_E); здатність конструкції чинити опір дії зсувних напружень у ґрунтах земляного полотна (K_τ); здатність монолітних шарів конструкції чинити опір дії розтягуючих напружень (K_σ). Тоді, аналогічно підходу [243], модель оцінювання стану дорожнього одягу, що ґрунтується на результатах діагностики, може бути представлена у вигляді [243, 346]:

$$F(H) = f(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_M | \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_N), \quad (2.26)$$

де d_j – зовнішні параметри;

χ_i – внутрішні (приховані) параметри.

Під зовнішніми параметрами моделі будемо розуміти критерії граничного стану дорожнього одягу [73] – коефіцієнти запасу міцності за допустимим пружним прогином (K_E), за опором зсуву у ґрунтах земляного полотна (K_τ), за опором розтягуючим напруженням при згині монолітних шарів конструкції дорожнього одягу (K_σ). Внутрішні параметри – геометричні параметри і фізико-механічні характеристики матеріалів шарів дорожнього одягу і ґрунтів земляного полотна, що визначають граничний стан дорожнього одягу.

З урахуванням (2.26), модель оцінювання стану дорожнього одягу у загальному вигляді може бути записана:

$$F(H) = f \left[TCI(K_E, K_\tau, K_\sigma); CV(TCI) \mid \Phi(E_i, h_i, D_i, \mu_i, E_{zp}, \varphi_{zp}, c_{zp}, \mu_{zp}, R_u, m) p, N \right], \quad (2.27)$$

де $F(H)$ – функціонал, що відображає зв'язок надійності конструкції дорожнього одягу з її фізико-механічними і геометричними параметрами;

TCI – індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу;

$CV(TCI)$ – коефіцієнт варіації індексу технічного стану;

K_E, K_τ, K_σ – коефіцієнт запасу міцності за допустимим пружним прогином, за критерієм зсуву в ґрунтах 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 -м шарі конструкції;

μ_i, μ_{zp} – коефіцієнт Пуассона i -го шару конструкції та ґрунту земляного полотна відповідно;

$E_{zp}, \varphi_{zp}, c_{zp}$ – модуль пружності (МПа), кут внутрішнього тертя (град.) і коефіцієнт зчеплення (МПа) ґрунту відповідно;

R_u, m – опір розтягу при згині монолітних матеріалів (МПа) і показник

втоми відповідно;

p – питомий тиск колеса на покриття відповідно до типу розрахункового навантаження [73], МПа;

N – кількість прикладань розрахункового навантаження за термін експлуатації дорожнього одягу, авт.

Запишемо індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу TCI (Technical Condition Index), що запропонований в [243, 346]:

$$TCI = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^3 \alpha_i \times f_i}{\sum_{i=1}^3 \alpha_i} \right], \quad (2.28)$$

де α_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію граничного стану;

f_i – показник стану за i -м критерієм граничного стану конструкції.

Часткові показники стану конструкції та вагові коефіцієнти, що їм відповідають, визначаються [243]:

$$f_i = \frac{K_i}{K_{i\max}}; \quad \alpha_i = \frac{K_{i\max}}{K_{i\min}}, \quad (2.29)$$

де $K_i, K_{i\max}, K_{i\min}$ – коефіцієнт запасу міцності за i -м критерієм граничного стану, відповідно, фактичний, максимальний, мінімально допустимий.

Максимальне значення коефіцієнтів запасу міцності приймаємо рівними їх нормативним значенням на початку експлуатації ($t = 0$) [73]. Мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності відповідає максимально допустимій втраті несучої здатності дорожнього одягу згідно з [347].

Коефіцієнт запасу міцності за допустимим пружним прогином може бути записаний у вигляді $K_E = f(p, N, E_i, h_i, D_i, \mu_i, W)$ і визначається [73]:

$$K_E = E_{заг} / E_{номп}, \quad (2.30)$$

де K_E – коефіцієнт запасу міцності дорожнього одягу за критерієм допустимого пружного прогину;

$E_{заг}$ – загальний модуль пружності конструкції дорожнього одягу, МПа;

$E_{номр}$ – потрібний модуль пружності конструкції дорожнього одягу з урахуванням капітальності, типу покриття та інтенсивності навантаження, визначається відповідно до [73], МПа.

Розрахунок загального еквівалентного модуля пружності проводиться:

а) для покриттів, які не мають видимих руйнувань [26]:

$$E_{заг} = \frac{p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{w} \cdot K, \quad (2.31)$$

де p – питомий тиск від навантаження згідно з [73], МПа;

D – діаметр кола, рівновеликого відбитку колеса під навантаженням, см;

μ – коефіцієнт Пуассона;

w – фактичний пружний прогин дорожнього одягу, приведений до розрахункового навантаження, см;

K – кліматичний коефіцієнт, що приводить значення фактичного модуля пружності конструкції дорожнього одягу до розрахункової температури покриття 10°C і розрахункової вологості ґрунту земляного полотна.

Прогин дорожнього одягу під центром навантаженої площадки визначається за результатами натурних випробувань [26], чисельного моделювання НДС дорожнього одягу [83]. Для наближеної оцінки може бути застосовано теоретичне рішення, що отримане Б.С. Радовським [342]:

$$w = pD \left[\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \left(\sqrt{m^2 + 1} - m \right) \cdot \left(\frac{\left(\frac{1 + \mu_2}{E_2} - \frac{1 + \mu_1}{E_1} \right) \cdot m}{2\sqrt{m^2 + 1}} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} - \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \right) \right], \quad (2.32)$$

де

$$m = 2 \frac{h_1}{D} \left(\frac{E_1(1-\mu_2^2)}{E_2(1-\mu_1^2)} \right)^{1/3};$$

б) для покриттів, що мають руйнування, через незначну точність вимірювань пружного прогину доцільно скористатися теоретичною оцінкою $E_{заг}$ за формулою Е. Барбера для двошарового півпростору [57, 348]

$$E_{заг} = E_1 \cdot \left[1 + (E_1 / E_2 - 1) / \left[1 + 4 \left(\frac{h}{D} \right)^2 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \right]^{-1} \quad (2.33)$$

або з рішенням В.Д. Казарновського, що враховує зниження розподільчої здатності монолітного шару у процесі експлуатації внаслідок накопичення втомних руйнувань і деструкції монолітного шару [148]:

$$E_{заг}^{t=T} = \frac{1}{\frac{1}{E_{осн}} - \frac{2}{\pi} \left[\arctg \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_{нок}}{D} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{E_{осн}} - \frac{1}{E_{нок}} \right], \quad (2.34)$$

де $E_{заг}^{t=T}$ – загальний модуль пружності дорожнього одягу, що відповідає граничному стану конструкції за критерієм втрати розподільчої здатності, МПа;

$E_{осн}, E_{нок}$ – модуль пружності основи і покриття відповідно, МПа;

h_a – товщина пакету асфальтобетонних шарів, см;

D – діаметр штампа, рівновеликого відбитку колеса розрахункового автомобіля, см;

n – коефіцієнт, що відображає характер розподілу напружень у шаруватій системі [11]:

$$n = 1,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{нок}}{E_{осн}} \cdot \frac{(1-\mu_{осн}^2)}{(1-\mu_{нок}^2)}}, \quad (2.35)$$

де $\mu_{осн}, \mu_{пок}$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу основи і покриття відповідно.

Коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву у ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язаних матеріалів у даній постановці завдання представляється як $K_\tau = f(p, N, E_i, h_i, D_i, \mu_i, E_{zp}, \varphi_{zp}, c_{zp}, \mu_{zp}, W)$ і визначається [73]:

$$K_\tau = T_{zp} / \tau_{акт}, \quad (2.36)$$

де K_τ – коефіцієнт запасу міцності дорожнього одягу за критерієм опору зсуву у ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язаних матеріалів;

T_{zp} – граничне напруження зсуву, перевищення якого викликає порушення міцності на зсув відповідно до [73], МПа;

$\tau_{акт}$ – розрахункове активне напруження зсуву у розрахунковій точці конструкції під дією навантаження, МПа.

Активне напруження зсуву у ґрунті від короткочасного навантаження визначається з точних рішень теорії пружності із застосуванням методів чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу:

$$\tau_{акт} = [(\sigma_1 - \sigma_2) - (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi] / (2 \cdot \cos \varphi), \quad (2.37)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – максимальні головні напруження (приймається $\sigma_1 \geq \sigma_3 = \sigma_2$).

Вихідні дані, що отримані за результатами інструментальної діагностики, дозволяють скористатися спрощеним розрахунком активного напруження зсуву [349, 350]:

$$\tau_{акт} = \tau_n + \tau_\sigma = \frac{P \cdot e^{-\frac{\varphi_{zp}}{33}}}{4 + 2,28 \cdot \left(\frac{H}{D} \cdot \left(\frac{E_{сер}}{E_{zp}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^2} + 10^{-5} (5 - 0,3 \cdot \varphi_{zp}) \cdot H, \quad (2.38)$$

де τ_n, τ_e – напруження зсуву у ґрунті земляного полотна від зовнішнього навантаження та від ваги шарів дорожнього одягу, що розташовані вище, відповідно, МПа;

φ_{sp} – кут внутрішнього тертя ґрунту, що визначається методом георадарного зондування згідно з [266, 351], град.;

$E_{сер}$ – середній модуль пружності пакету шарів дорожнього одягу, МПа;

P – питомий тиск колеса на дорожній одяг, МПа;

E_{zp} – модуль пружності ґрунту у розрахунковий період, що визначається методом георадарного зондування згідно з [266, 351], МПа;

D – діаметр відбитку рухомого колеса згідно з [73], м ;

H – товщина шарів дорожнього одягу, що визначається методом георадарного зондування згідно з [300, 352], м.

Коефіцієнт запасу міцності за опором монолітних шарів розтягу при згині представляється як $K_\sigma = f(p, N, E_i, h_i, D_i, \mu_i, R_u, m, T)$ і визначається [73]:

$$K_\sigma = R_{зз} / \sigma_r, \quad (2.39)$$

де K_σ – коефіцієнт запасу міцності дорожнього одягу за критерієм опору напруженням розтягу при згині, що виникають під дією навантаження;

$R_{зз}$ – гранично допустиме напруження розтягу монолітного матеріалу шару з урахуванням втоми, МПа;

σ_r – напруження розтягу у монолітному шарі під дією навантаження, МПа.

За відсутності строгих аналітичних рішень, основним методом, що застосовується для оцінювання розтягуючих напружень (σ_r) у монолітному шарі, якій має розриви суцільності, а також у шарі, що спирається на шар з розривами суцільності, є чисельне моделювання НДС конструкції дорожнього одягу [83, 421] із залученням методу скінченних елементів (п. 2.3).

Згідно з дослідженнями проф. Б.С. Радовського, міцність матеріалу покриття у рік проведення інструментальної діагностики визначається [57, 350]:

$$R_i = R_0 \left[1 - \frac{T_i}{T_0} \right]^{b_i}, \quad (2.40)$$

де R_i – залишкова міцність монолітного шару після кількості прикладань розрахункового навантаження N_i з амплітудою напружень σ_i або після строку служби T_i , МПа;

T_i, T_0 – термін експлуатації монолітного шару покриття і нормативний термін служби дорожнього одягу до капітального ремонту відповідно, років;

b_i – показник втоми матеріалу монолітних шарів.

Тоді індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу запишемо у вигляді [243]:

$$TCI = 100 \times \left[\frac{\alpha_E \times f_E + \alpha_\sigma \times f_\sigma + \alpha_\tau \times f_\tau}{\alpha_E + \alpha_\sigma + \alpha_\tau} \right], \quad (2.41)$$

де f_E, f_σ, f_τ – часткові показники стану конструкції за критерієм допустимого пружного прогину, критерієм опору монолітних шарів розтягу при згині, критерієм опору ґрунтів і шарів з незв'язаних матеріалів зсувним напруженням відповідно;

$\alpha_E, \alpha_\sigma, \alpha_\tau$ – ваговий коефіцієнт критерію допустимого пружного прогину, критерію опору монолітних шарів розтягу при згині, критерію опору ґрунтів і шарів з незв'язаних матеріалів дії зсувних напружень відповідно.

2.4.1.2 Врахування впливу тріщин на несучу здатність дорожнього одягу

Вплив тріщини на несучу здатність дорожнього одягу може бути врахований: приведенням фактичної товщини шару покриття, що містить тріщину, до еквівалентної товщині шару покриття без тріщини [57]; приведенням фактичних допустимих напружень зсуву у ґрунтах земляного

полотна і шарах з незв'язаних матеріалів у конструкції дорожнього одягу, що містить тріщину, до еквівалентних допустимих напружень у конструкції без тріщини. У дослідженні [57] запропоновано враховувати вплив тріщини на зниження несучої здатності дорожнього одягу приведенням фактичної товщини шару покриття без тріщини (h_{in}) до еквівалентної товщині шару покриття з тріщинами (h_{cr}) за формулою [57]:

$$h_{cr} = h_{in} \cdot K_h, \quad (2.42)$$

де K_h – коефіцієнт впливу тріщини на циліндричну жорсткість покриття, який визначається за формулою [57]:

$$K_h = \sqrt[3]{\frac{w_{in}}{w_{cr}}}, \quad (2.43)$$

де w_{in} , w_{cr} – прогин покриття без тріщини і з тріщиною відповідно, що визначаються за результатами чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу.

Розглянемо можливість врахування наявності тріщини у покритті через напруження, що діють у конструкції дорожнього одягу. Відповідно до загальних критеріїв теорії міцності [353] і критеріїв розрахунку нежорсткого дорожнього одягу оцінювання стану проводиться із залученням таких результатів чисельного моделювання НДС: вертикальні переміщення на поверхні покриття під навантаженням; розтягуючі напруження на нижньої фібри покриття; активні напруження зсуву у шарах з незв'язних матеріалів і ґрунті земляного полотна. Розтягуючі напруження на нижній фібри покриття у такій постановці задачі чисельно дорівнюють головним напруженням (principal stress). Ця вимога відноситься до третьої гіпотези міцності [353]. Максимальні дотичні напруження при об'ємному напруженому стані, що зв'язує перше σ_1 і третє σ_3 головні напруження визначається [353]:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \quad (2.44)$$

Активні напруження зсуву (τ) у шарах з незв'язних матеріалів і ґрунті земляного полотна повинні задовольняти умові:

$$\tau \cdot K_\tau \leq \tau_\partial; \quad \tau \leq \tau_\partial \times 1/K_\tau; \quad (2.45)$$

τ_∂ – граничне напруження зсуву, що обумовлено зчепленням у ґрунті або матеріалі, МПа;

K_τ – коефіцієнт запасу міцності.

Стандартним інструментом оцінювання впливу тріщини у покритті на несучу здатність дорожнього одягу є коефіцієнт, що враховує зміну напружень у конструкції з тріщинами відносно конструкцій без тріщин.

Введемо поняття коефіцієнт «концентрації напружень», який визначається як відношення напружень у конструкції з тріщиною до напружень у конструкції без тріщини ($k_{кн}$). Припустимо, за аналогією з (2.43), що у нашому випадку цей коефіцієнт дорівнює відношенню максимальних зсувних напружень (τ^{mp}) у шарах з незв'язних матеріалів і ґрунті земляного полотна у конструкції з тріщиною до максимальних напружень зсуву (τ) у шарах з незв'язних матеріалів і ґрунті земляного полотна у конструкції без тріщини:

$$k_{кн} = \frac{\tau^{mp}}{\tau}. \quad (2.46)$$

Тоді умову міцності за критерієм зсуву у ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язних матеріалів запишемо у вигляді:

$$\tau^{mp} \leq \tau_\partial \times 1/K_\tau \quad (2.47)$$

або

$$\tau \leq \tau_\partial / k_{кн} \times 1/K_\tau. \quad (2.48)$$

2.4.2 Імовірнісна модель оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу

Як було зазначено раніше (п.2.4), складність оцінювання стану дорожнього одягу на етапі експлуатації, пов'язана зі значною неоднорідністю його геометричних і фізико-механічних параметрів, а, отже, й інтегральних показників. Подолання зазначених труднощів у дисертаційному дослідженні пов'язується із застосуванням теоретико-імовірнісного підходу [343, 354].

Згідно з [343, 354], надійність є мірою адекватності проекту і розглядається як ймовірність безвідмовної роботи конструкції, за якою не буде перевищено граничний стан. Математично надійність може бути представлена [355] у вигляді:

$$H = 1 - P(S \leq 0), \quad (2.49)$$

де S – запас міцності, що визначається як різниця між опірністю конструкції і діючим навантаженням.

Будемо трактувати надійність як ймовірність безвідмовної роботи дорожнього одягу за інтегральним критерієм технічного стану (TCI) [97]. Обчислимо рівень надійності:

$$H = \int_{TCI_{\min}}^{TCI_{\max}} f(TCI) dTCI, \quad (2.50)$$

де TCI_{\max} , TCI_{\min} – відповідно максимальне і мінімальне значення індексу технічного стану дорожнього одягу, за яким оцінюється рівень надійності конструкції дорожнього одягу;

$f(TCI)$ – функція розподілу параметра.

Оскільки більшість властивостей матеріалів, а також напруження у конструкціях підпорядковуються нормальному закону розподілу [57, 97],

вважатиме, що індекс технічного стану дорожнього одягу також підкорюється нормальному закону розподілу.

Для визначення ймовірності руйнування введемо випадкову величину – резерв (запас) безпеки (S) [355]. Припустивши, що характеристикою міцності є граничне значення індексу технічного стану ($R = TCI_{zp}$), а характеристикою навантаження – фактичний індекс технічного стану ($Q = TCI_{\phi}$), отримаємо:

$$S = R - Q = TCI_{zp} - TCI_{\phi}, \quad (2.51)$$

де S – запас міцності;

R – характеристика міцності конструкції;

Q – характеристика навантаження, що діє на конструкцію;

TCI_{zp} – граничний індекс технічного стану конструкції;

TCI_{ϕ} – фактичний індекс технічного стану конструкції.

Вважатиме, що R і Q взаємно незалежні випадкові величини, які підкорюються нормальному закону розподілу. Оскільки R і Q нормально розподілені, запас безпеки S також підкорюється нормальному закону розподілу зі середнім значенням $\bar{S} = \bar{R} - \bar{Q}$ і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_S = \sqrt{\sigma^2_R + \sigma^2_Q}$ (рис. 2.9).

Конструкція задовольняє вимогам міцності, якщо $S \leq 0$. Тоді ймовірність руйнування конструкції згідно [355]:

$$P(S) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{S-0}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{S}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{-S}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta), \quad (2.52)$$

де $\Phi(\beta)$ – нормована функція Лапласа, що визначається за формулою [355]:

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (2.53)$$

де β – характеристика безпеки.

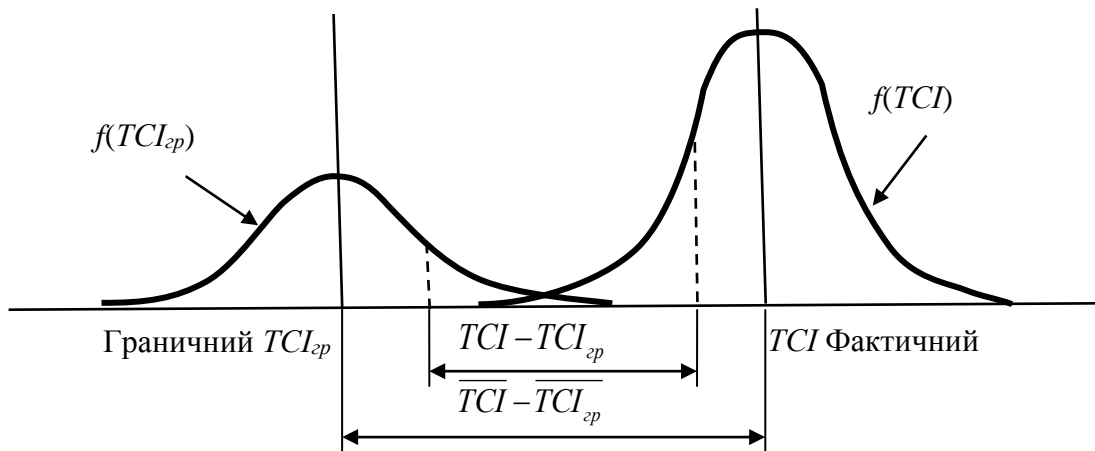


Рисунок 2.9 – Щільність розподілу параметрів TCI_{ϕ} і $TCI_{зр}$

Запишемо отримане рівняння з урахуванням (2.51)

$$P(TCI) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{-(TCI_{зр} - TCI_{\phi})}{\sigma_S}\right) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{TCI_{\phi} - TCI_{зр}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{зр})^2}}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta); \quad (2.54)$$

$$\beta = \frac{TCI_{\phi} - TCI_{зр}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{зр})^2}}, \quad (2.55)$$

де $TCI_{\phi}, TCI_{зр}$ – фактичний і граничний індекс технічного стану відповідно;

$\sigma_{\phi}, \sigma_{зр}$ – середньоквадратичне відхилення фактичного (TCI_{ϕ}) і граничного ($TCI_{зр}$) індексу технічного стану конструкції відповідно.

Тоді надійність можна представити у вигляді [355]:

$$H(TCI) = 1 - P(TCI) = 0,5 + \Phi(\beta) = 0,5 + \Phi\left[\frac{TCI_{\phi} - TCI_{зр}}{\sqrt{(\sigma_{\phi})^2 + (\sigma_{зр})^2}}\right]. \quad (2.56)$$

Середньоквадратичне відхилення граничного індексу технічного стану конструкції визначається за формулою:

$$\sigma_{zp} = CV_{zp} \cdot TCI_{zp}, \quad (2.57)$$

де CV_{zp} – коефіцієнт варіації граничного індексу технічного стану.

Середньоквадратичне відхилення фактичного індексу технічного стану конструкції визначається за формулою:

$$\sigma_{\phi} = CV_{\phi} \cdot TCI_{\phi}, \quad (2.58)$$

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

$$CV_{\phi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TCI_i - \overline{TCI})^2}{n-1}} / \overline{TCI}, \quad (2.59)$$

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

$$\overline{TCI} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n TCI_i, \quad (2.60)$$

де n – загальна кількість значень, отриманих за результатами діагностики;

TCI_i – значення TCI на i -й ділянці.

Передбачається, що коефіцієнт варіації $CV_{zp} = CV_{\phi}$, тобто дорожній одяг з граничним значенням індексу технічного стану має ту ж однорідність, що й дорожній одяг з фактичним індексом технічного стану. Як доведено у [343], тільки в цьому випадку TCI_{zp} і TCI_{ϕ} будуть порівнянними.

Аналіз формули (2.54) дозволяє встановити, що:

а) за $TCI_{\phi} = TCI_{zp}$ ймовірність руйнування становить $P(TCI) = 0,5$;

б) за $TCI_{\phi} > TCI_{zp}$ ймовірність руйнування $P(TCI) \xrightarrow{TCI} 0$;

в) за $TCI_{\phi} < TCI_{zp}$ ймовірність руйнування $P(TCI) \xrightarrow{TCI} 1$.

Отже, запропонований підхід до оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу дозволяє:

а) встановити функціональний зв'язок між індексом технічного стану і надійністю конструкції дорожнього одягу (рис. 2.10);

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

в) оцінити надійність дорожнього одягу за результатами діагностики.

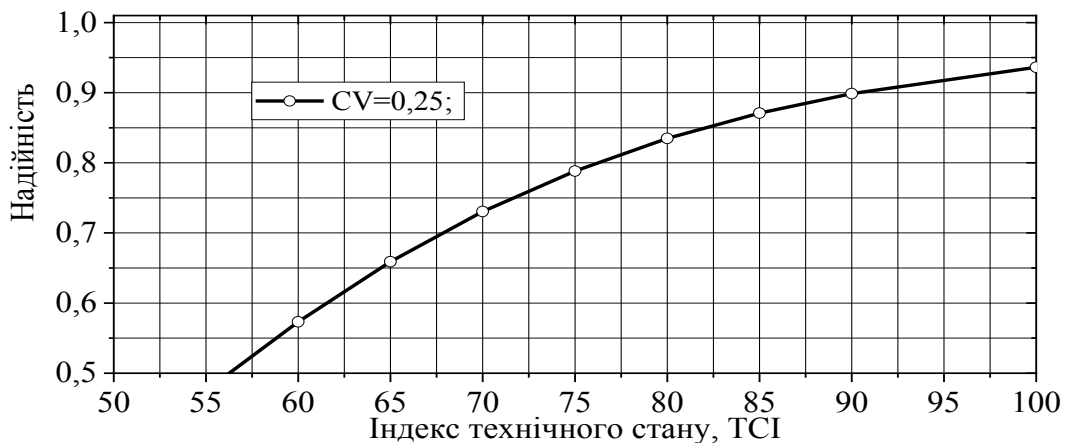


Рисунок 2.10 – Зв'язок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу з надійністю. Коефіцієнт варіації $C_{\phi} = 0,25$

Для подальшої реалізації запропонованої моделі оцінювання стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу необхідно визначити критерії граничного стану, що відповідають заданому ризику руйнування.

2.4.3 Критерії граничного стану дорожнього одягу

Рішення задачі визначення критеріїв граничного стану зводиться до розрахунку індексу технічного стану за заданого ризику руйнування. Математичний апарат щодо вирішення даного класу задач із застосуванням основних положень теорії ризику докладно викладено у роботах [343, 355-357]. Аналогічно методам [355, 356], під час розрахунку граничних значень індексу технічного стану дорожнього одягу в формулах згортки за параметр, що визначає граничний стан, прийнятий ризик руйнування, якій відповідає заданому рівню надійності [73]. Отже, під граничним будемо розуміти значення індексу технічного стану дорожнього одягу, що відповідає граничному рівню руйнування за умовою надійності [41]:

$$R_{zp}(TCI) = 1 - H. \quad (2.61)$$

Оскільки нормативний коефіцієнт надійності залежить від категорії автомобільної дороги [73], то граничний рівень руйнувань і граничне значення індексу технічного стану дорожнього одягу визначатимуться категорією автомобільної дороги.

Ризик руйнування визначаємо сумуванням розподілу індексу технічного стану (TCI) з розподілом індексу технічного стану дорожнього одягу, що відповідає граничному стану (TCI_{zp}). Тоді граничне значення ризику руйнування у термінах задачі визначається [424]:

$$R_{zp}(TCI) = 0,5 - \Phi \left[\frac{TCI_{\max} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\max})^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right], \quad (2.62)$$

де $R_{zp}(TCI)$ – граничний ризик руйнування за умови заданої надійності конструкції дорожнього одягу (табл. 2.2);

TCI_{\max} , TCI_{zp} – максимальний і граничний індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу відповідно;

σ_{\max} , σ_{zp} – середньоквадратичне відхилення максимального і граничного індексу технічного стану конструкції відповідно.

Таблиця 2.2 – Граничний ризик руйнування дорожнього одягу

Категорія дороги	Тип дорожнього одягу	Коефіцієнт надійності, H	Граничний ризик руйнування, $R_{zp}(TCI)$
Ia	Капітальний	0,97	0,03
Iб - II	Капітальний	0,95	0,05
III	Капітальний	0,90	0,10
IV	Полегшений	0,85	0,15

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 ризику руйнування $R_{zp}(TCI)$ (табл. 2.2).

Застосовуючи підхід, що викладений у [343], і позначивши $B = 0,5 - R_{zp}(TCI)$ і $U = \frac{TCI_{\max} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\max})^2 + (\sigma_{zp})^2}}$, запишемо рівняння (2.62) у вигляді:

$$\Phi \left[\frac{TCI_{\max} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\max})^2 + (\sigma_{zp})^2}} \right] = 0,5 - R_{zp}(TCI); \quad (2.63)$$

$$\Phi[U] = B. \quad (2.64)$$

Умова (2.68) виконується, якщо

$$\frac{TCI_{\max} - TCI_{zp}}{\sqrt{(\sigma_{\max})^2 + (\sigma_{zp})^2}} = U. \quad (2.65)$$

За дотримання умови $U = f(B)$ вважатиме величину U відомою, що дозволяє записати рівняння відносно TCI_{zp} у вигляді:

$$TCI_{zp} = TCI_{\max} - U \cdot \left(\sqrt{(\sigma_{\max})^2 + (\sigma_{zp})^2} \right). \quad (2.66)$$

Записав $\sigma_{zp} = CV_{zp} \cdot TCI_{zp}$, де CV_{zp} – коефіцієнт варіації параметра TCI_{zp} , і підставивши у (2.66), отримаємо квадратне рівняння вигляду:

$$TCI_{zp}^2 - 2 \cdot TCI_{zp} \cdot TCI_{\max} + TCI_{\max}^2 = U^2 \cdot (\sigma_{\max})^2 + U^2 \cdot (CV_{zp} \cdot TCI_{zp})^2. \quad (2.67)$$

Вирішивши рівняння (2.67) відносно TCI_{zp} , отримаємо:

$$TCI_{zp} = \frac{\sqrt{TCI_{\max}^2 + (U^2 \cdot CV_{zp}^2 - 1) \cdot (TCI_{\max}^2 - U^2 \cdot (\sigma_{\max})^2)} - TCI_{\max}}{U^2 \cdot CV_{zp}^2 - 1}; \quad (2.68)$$

$$\sigma_{\max} = CV_{\max} \cdot TCI_{\max}, \quad (2.69)$$

де CV_{\max} – коефіцієнт варіації максимального індексу технічного стану конструкції, що визначається для відмінної якості будівництва згідно з [57].

Далі припустимо, що коефіцієнти запасу міцності за критеріями граничного стану (K_E , K_τ , K_σ), є взаємно незалежними величинами. Індекс технічного стану TCI не вимірюють безпосередньо, а визначають через вхідні

величини K_E, K_τ, K_σ за допомогою функціональної залежності, яку зручно навести у загальному вигляді $TCI = f(K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N)$. Вхідні величини, у свою чергу, також можна розглядати як величини, що залежать від інших вимірюваних параметрів (X_1, X_2, \dots, X_N - товщини шарів, модуля пружності матеріалу тощо).

Оцінку вимірюваної величини TCI , що позначається \overline{TCI} і має сенс математичного очікування, отримуємо з формули (2.41), підставляючи до неї вхідні оцінки $\overline{K_E}, \overline{K_\tau}, \overline{K_\sigma}, \overline{X_1}, \overline{X_2}, \dots, \overline{X_N}$ для величин $K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N$. Вихідна оцінка \overline{TCI} визначається як середнє арифметичне m незалежних величин TCI_i на ділянці дороги, за формулою [358]:

$$\overline{TCI} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m TCI_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(K_{Ei}, K_{\tau i}, K_{\sigma i}, X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{Ni}). \quad (2.70)$$

При цьому кожне незалежне визначення величини TCI_i засновано на повному наборі значень N вхідних величин ($K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N$), що отримані одночасно і характеризуються однаковою неоднорідністю.

Для розрахунку середньоквадратичного відхилення індексу технічного стану конструкції ($\sigma(TCI)$) слід скористатися рівнянням, що засноване на апроксимації функціональної залежності $TCI = f(K_E, K_\tau, K_\sigma, X_1, X_2, \dots, X_N)$ рядом Тейлора першого порядку [358]:

$$\sigma^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma^2(x_i). \quad (2.71)$$

Запишемо (2.41) у вигляді:

$$TCI = \frac{1}{\alpha_E + \alpha_\sigma + \alpha_\tau} \cdot \left[\frac{K_E}{K_{E \min}} + \frac{K_\tau}{K_{E \min}} + \frac{K_\sigma}{K_{E \min}} \right]. \quad (2.72)$$

Тоді

$$\sigma^2(TCI) = \left(\frac{\partial TCI}{\partial K_E}\right)^2 \cdot \sigma^2(K_E) + \left(\frac{\partial TCI}{\partial K_\tau}\right)^2 \cdot \sigma^2(K_\tau) + \left(\frac{\partial TCI}{\partial K_\sigma}\right)^2 \cdot \sigma^2(K_\sigma). \quad (2.73)$$

Прийнявши індекс технічного стану дорожнього одягу $TCI_{\max}=1$ (у частках одиниць), що відповідає гранично допустимим значенням коефіцієнтів запасу міцності по критеріях граничного стану ($K_{E\max}, K_{\sigma\max}, K_{\tau\max}$) згідно з [73], та записавши $\sigma(K_E) = CV_E \cdot K_{E\max}$, $\sigma(K_\tau) = CV_\tau \cdot K_{\tau\max}$, $\sigma(K_\sigma) = CV_\sigma \cdot K_{\sigma\max}$, після відповідних перетворень представимо рівняння (2.73) у вигляді:

$$\sigma_{\max}^2(TCI) = \frac{\alpha_E^2 \cdot CV_E^2 + \alpha_\tau^2 \cdot CV_\tau^2 + \alpha_\sigma^2 \cdot CV_\sigma^2}{(\alpha_E + \alpha_\tau + \alpha_\sigma)^2}, \quad (2.74)$$

Підставивши у ліву частину рівняння (2.74) вираз (2.69) і прийнявши $TCI_{\max}=1$, отримаємо:

$$CV_{\max} = \frac{\sqrt{\alpha_E^2 \cdot CV_E^2 + \alpha_\tau^2 \cdot CV_\tau^2 + \alpha_\sigma^2 \cdot CV_\sigma^2}}{\alpha_E + \alpha_\tau + \alpha_\sigma}. \quad (2.75)$$

Коефіцієнти варіації запасу міцності за допустимим пружним прогином (CV_E), опором зсуву у ґрунтах земляного полотна (CV_τ) і опору розтягу при згині (CV_σ) отримаємо, вирішивши рівняння (2.70) відносно відповідних коефіцієнтів запасу міцності.

У результаті проведених перетворень отримаємо:

$$CV_E = \sqrt{C_{zag}^2 + C_{нотр}^2}; \quad CV_\tau = \sqrt{C_{Тдон}^2 + C_\tau^2}; \quad CV_\sigma = \sqrt{C_{R32}^2 + C_\sigma^2}, \quad (2.76)$$

де C_{zag} , $C_{нотр}$ – відповідно коефіцієнт варіації загального і потрібного модуля пружності конструкції дорожнього одягу;

$C_{T_{дон}}$, C_{τ} – відповідно коефіцієнт варіації допустимого і активного напруження зсуву у ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язних матеріалів, що виникає від ваги конструкції дорожнього одягу і дії транспортного навантаження;

$C_{R_{зг}}$, C_{σ} – відповідно коефіцієнт варіації міцності на розтяг при згині матеріалу монолітного шару і напруження розтягу при згині, що виникають під дією транспортного навантаження.

Значення коефіцієнтів варіації міцності для відмінної якості будівництва дорожнього одягу [187, 359, 360] прийняті згідно з [57].

Таким чином, застосування теоретико-імовірнісного підходу дозволяє оцінити стан і надійність нежорсткого дорожнього одягу, а також визначити критерії оцінювання стану та показники однорідності конструкції нежорсткого дорожнього одягу.

2.5 Метод оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики

Запропоновано модель оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу (2.27), що спирається на результати інструментальної діагностики (внутрішні параметри моделі), які функціонально пов'язані з показниками міцності та надійності конструкції дорожнього одягу (зовнішні параметри моделі).

Реалізація запропонованої моделі здійснюється із залученням методів георадарної діагностики дорожнього одягу, що дозволяє отримати вихідні дані про товщину конструктивних шарів дорожнього одягу, наявність тріщин у шарах покриття та шарах основи з монолітних матеріалів, фізико-механічні параметри ґрунтів згідно з [351].

Основу запропонованих моделей георадарної діагностики у частині пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах дорожнього одягу складають:

а) методики застосування антенних блоків, що реєструють крос-поляризаційну компоненту сигналу, відбитого від порушень суцільності шарів конструкції дорожнього одягу;

б) методи пошуку та аналізу годографів дифрагованих хвиль;

в) методи відновлення діелектричної проникності та товщини шарів дорожнього одягу, що засновані на застосуванні формул Френеля (2.4 – 2.5);

г) методи обробки та аналізу імпульсних сигналів георадару, що базуються на відомому перетворенні Гільберта та на запропонованих у дисертації алгоритмах обробки сигналів георадарного профілю (рис. 2.3);

д) застосування компараційного алгоритму для вирішення задачі ідентифікації тріщин (2.8).

Обробка результатів георадарного зондування дозволяє отримати вихідні дані для оцінювання відповідності конструкції дорожнього одягу критеріям міцності та надійності (2.30, 2.36, 2.39, 2.41). Основу складають результати чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами, що залучає метод скінченних елементів та базується на обґрунтованих математичних скінчено-елементних моделях (рис. 2.6 – рис. 2.8).

Результати чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу створюють основу оцінювання стану конструкції за інтегральним показником – індексом технічного стану (2.41), та дозволяють оцінити надійність конструкції дорожнього одягу, яка базується на зв'язку між коефіцієнтом надійності та індексом технічного стану (2.50) і враховує неоднорідність конструкції дорожнього одягу (2.51 – 2.52).

Оцінювання стану дорожнього одягу за результатами діагностики здійснюється за величиною граничних значень індексу технічного стану (2.62), за яких імовірність відмови (руйнування) дорожнього одягу відповідає граничному ризику руйнування.

Метод оцінювання стану дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики може бути представлений відповідною схемою (рис. 2.11).

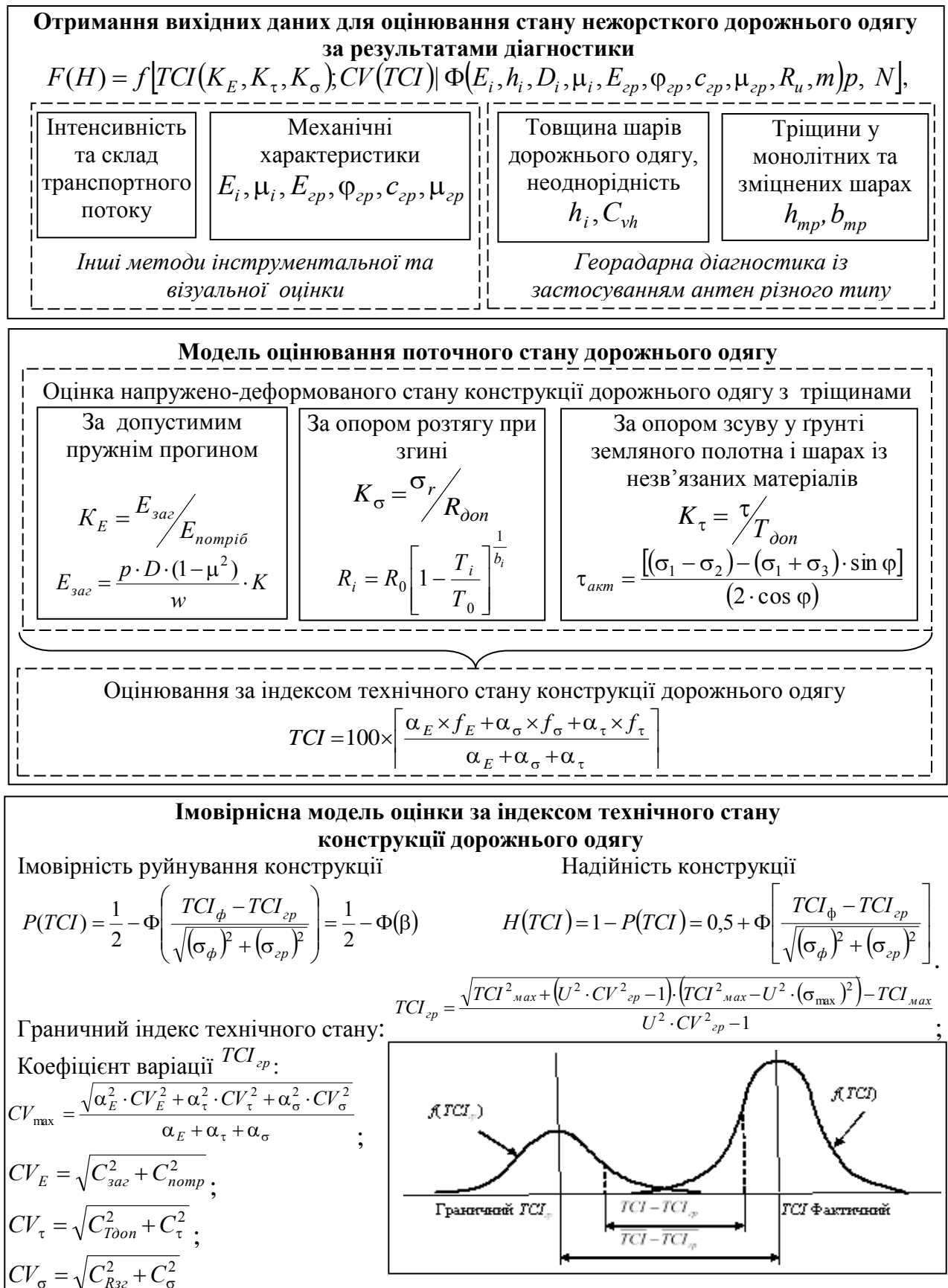


Рисунок 2.11 – Схема методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу

2.6 Висновки по розділу

1. 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 шарів дорожнього одягу та параметрами імпульсних сигналів георадару, (внутрішні параметри моделі) і показниками міцності та надійності конструкції дорожнього одягу (зовнішні параметри моделі). Модель ґрунтується на:

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

б) методі чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу, що залучає вихідні дані про внутрішню будову та приховані неоднорідності шарів дорожнього одягу, які отримані за результатами георадарної діагностики;

в) статистичних та імовірнісних методах оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, які дозволяють врахувати неоднорідність геометричних і фізико-механічних параметрів дорожнього одягу.

2. Запропоновано розв'язок задачі пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу з монолітних матеріалів, що передбачає розвиток та удосконалення:

а) способів застосування антенних блоків, що реєструють крос-поляризаційну компоненту сигналу, відбитого від порушень суцільності шарів конструкції дорожнього одягу;

б) методів пошуку та аналізу годографів дифрагованих хвиль;

в) методів обробки та аналізу поляризаційного стану імпульсних сигналів георадару для вирішення завдання позиціонування прихованих тріщин;

г) компараційного алгоритму для вирішення завдання ідентифікації тріщин у шарах покриття та шарах основи з монолітних матеріалів.

3. Обґрунтовано параметри скінченно-елементної моделі розрахунку НДС

дорожнього одягу з тріщинами у монолітних шарах шляхом залучення ітераційної процедури мінімізації функціоналу нев'язки, що дозволяє обґрунтувати розміри елементів і представницький об'єм моделі.

4. Розроблено показники і критерії оцінювання стану дорожнього одягу – індекс технічного стану (*TCS*) і коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу шляхом залучення теоретико-імовірнісного підходу та методів статистичної обробки результатів інструментальних вимірювань, що дозволило:

а) врахувати варіацію параметрів шарів дорожнього одягу, неоднорідність показників напружено-деформованого стану;

б) оцінити надійність конструкції дорожнього одягу, яка ґрунтується на встановленому зв'язку між коефіцієнтом надійності та індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу.

5. Застосування теорії ризику до задачі оцінювання стану дорожнього одягу дозволило встановити граничні значення індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу, за яких імовірність відмови дорожнього одягу відповідає заданому ризику руйнування.

6. Розроблено метод оцінювання стану дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики, що складається з:

а) комплексу методів обробки результатів георадарного зондування та отримання даних про будову та стан конструктивних шарів дорожнього одягу;

б) чисельного моделювання НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами та на тріщинуватій основі;

в) показників і критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу.

Основні результати досліджень другого розділу висвітлено у роботах автора: [309 - 316, 323, 330, 346, 361 - 363].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕОРЕТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

3.1 Завдання експериментальних досліджень

Моделі щодо оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики із залученням даних георадарного зондування, що розроблені у розділі 2, ґрунтуються на аналізі імпульсних сигналів георадару, методах чисельного моделювання НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу, статистичних методах обробки результатів діагностики та імовірнісних моделях оцінювання показників стану конструкції дорожнього одягу. Тому метою експериментальних досліджень є встановлення основних параметрів розроблених моделей та підтвердження адекватності теоретичних положень експериментальним даним.

Експериментальні дослідження щодо пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин виконувалася за допомогою лабораторних експериментів та польових випробувань на автомобільних дорогах загального користування. Основні параметри розрахункових моделей з оцінювання стану дорожнього одягу визначалися за результатами чисельного моделювання.

Виходячи з поставленої мети, задачами лабораторних досліджень є:

а) перевірка адекватності теоретичних моделей та алгоритмів обробки імпульсних сигналів георадару під час вирішення завдання дефектоскопії дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів;

б) обґрунтування параметрів теоретичних моделей щодо оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу:

1) оцінювання впливу геометричних параметрів прихованих тріщин на НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу;

2) встановлення зв'язку між показниками неоднорідності конструкції

дорожнього одягу, що визначаються за результатами діагностики та чисельного моделювання, запропонованим індексом технічного стану дорожнього одягу та надійністю конструкції нежорсткого дорожнього одягу;

3) визначення критеріїв оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу та їх граничних значень.

До задач польових випробувань належать:

а) перевірка адекватності методів пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин за допомогою польового георадару;

б) розроблення методики дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу за результатами георадарної діагностики;

в) розроблення методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів, що залучає результати георадарної діагностики.

3.2 Перевірка адекватності моделей пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу

Експериментальні дослідження щодо пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу за допомогою георадару проводилися у період з 2010 року до 2020 року на лабораторних моделях і на автомобільних дорогах загального користування, вулицях і дорогах населених пунктів на етапах будівництва, капітального ремонту та експлуатації.

3.2.1 Обладнання та програмне забезпечення

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.

В експериментальних дослідженнях застосовувалися антенні системи різних типів (рис. 3.1): 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 виявлення та позиціонування (рис. 3.1).

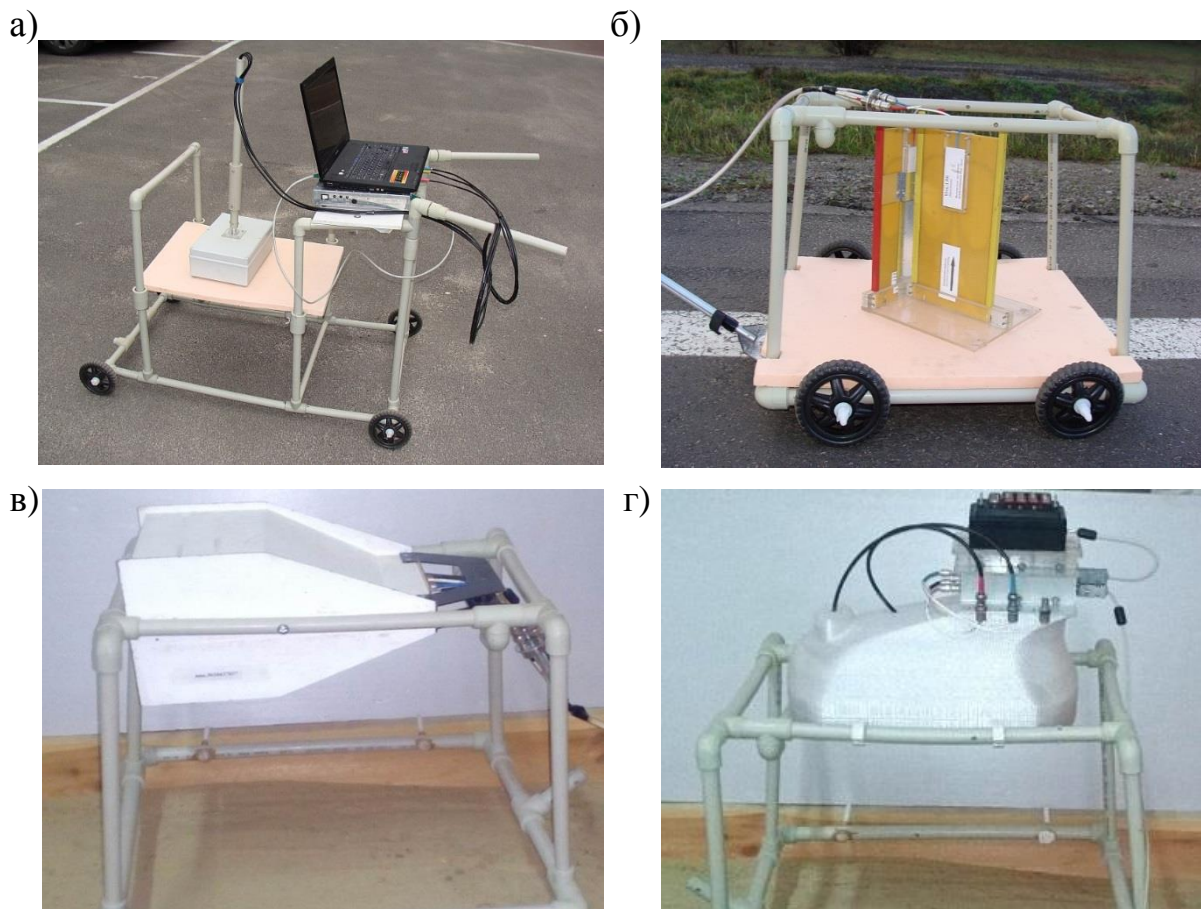


Рисунок 3.1 – Антенні блоки для дефектоскопії дорожнього одягу:
 а) планарна антена; б) антена щілинного типу; в) дипольна антена
 г) білстатична щілинна антена типу «Бобе»

Під час вибору антенних блоків необхідно враховувати взаємно суперечливі вимоги між точністю визначення параметрів верхніх шарів конструкції дорожнього одягу, що потребує застосування антенних блоків з високою центральною частотою (від 0,9 ГГц до 1,4 ГГц), та глибиною

зондування, враховуючі значне загасання сигналів за глибиною, що змушує зменшувати центральну частоту імпульсу (0,4 ГГц – 0,6 ГГц). Крім того, важливим з електродинамічної точки зору є спектр сигналу (рис. 3.2).

Під час вирішення задач пошуку та позиціонування прихованих тріщин у шарах покриття візуалізація та первинна обробка радарограм проводилася із застосуванням програмного забезпечення «GPR Proview» (рис. 3.3). Для обробки імпульсних сигналів георадару застосовувалася програма «GeoVisy-2», функції якої були удосконалені за результатами експериментальних досліджень відповідно до задач ідентифікації прихованих тріщин (рис. 3.4).

Оцінка адекватності результатів з пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин проводилася із залученням додаткових методів інструментальних вимірювань:

а) визначення пружного прогину дорожнього одягу під статичним навантаженням згідно з [73];

б) відбір кернів з конструкції дорожнього одягу згідно з [94, 364].

3.2.2 Лабораторні дослідження

3.2.2.1 Обґрунтування методики отримання даних георадарного зондування

Задача дефектоскопії дорожнього одягу вирішується шляхом обробки та аналізу імпульсних сигналів георадару, які є основним результатом георадарного зондування дорожнього одягу. Точність вирішення завдань дефектоскопії залежить від технічних параметрів георадару, швидкості його переміщення у процесі георадарного зондування, методів обробки сигналів. Тому для вирішення завдання обґрунтування методики отримання вихідних даних за результатами зондування проведені серії лабораторних експериментів щодо:

а) відбору основного засобу зондування – георадару і параметрів налаштування його антенного блоку;

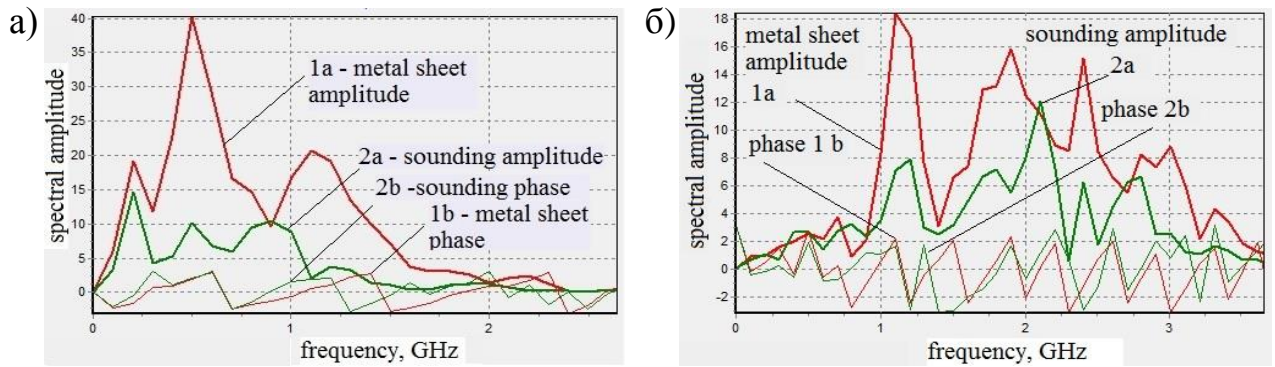


Рисунок 3.2 – Спектральні характеристики сигналів георадарів:
а) «ОДЯГ-1»; б) «ОДЯГ-1.6»

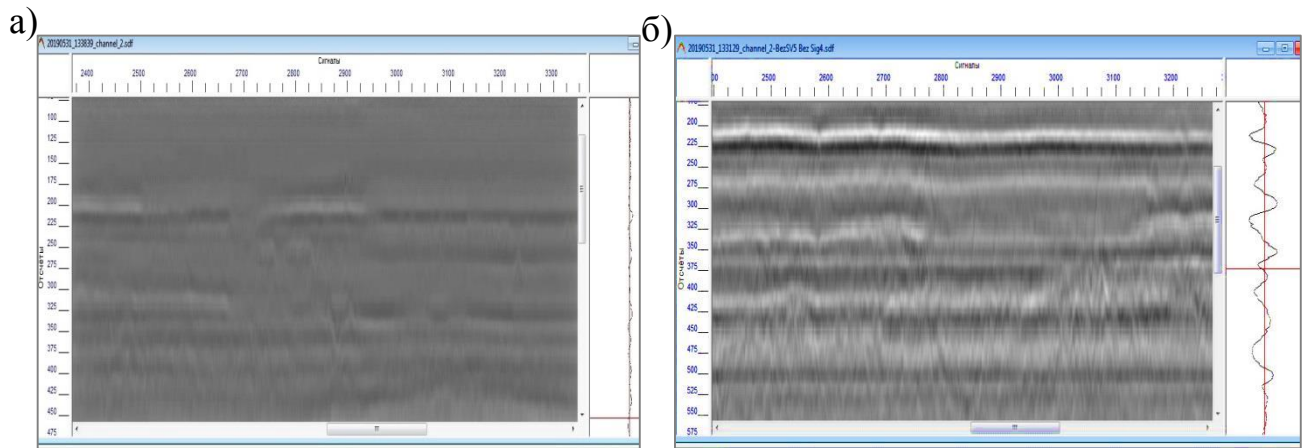


Рисунок 3.3 – Візуалізація радарограми у програмі «GPR Proview»: а) до первинної обробки; б) після первинної обробки

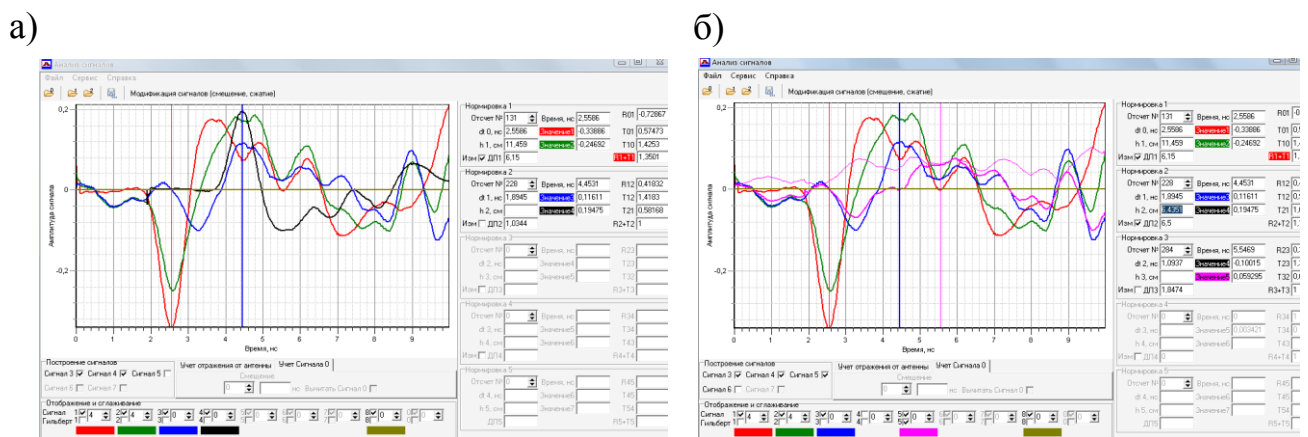



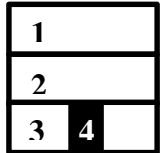
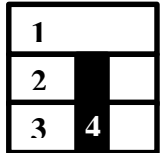
Рисунок 3.4 – Оцінювання глибини тріщини у програмі «GeoVisy - 2»: а) верхня границя; б) нижня границя

б) отримання еталонних сигналів, що використовуються під час первинної обробки радарограм;

в) обґрунтування параметрів зйомки.

У серії експериментів застосовані лабораторні моделі з конструкцією, що складалася з шарів асфальтобетону товщиною 5 см 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 (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри експерименту

Показники	Параметри знімання	Серії експериментів		
Настроювання георадару	Файл	103130	104737	104224
	Затримка сигналу	22508	22508	22508
	Посилення	8	8	8
	Накопичення	8	8	8
Конструкція	Шари конструкції: 1 – асфальтобетон 2 – асфальтобетон 3 – асфальтобетон 4 – тріщина у шарі			
Знімання	Вимірювання нерухомим георадаром:	Відліки сигналів георадару		
	- воздух	0-10	0-10	0-10
	- метал	11-20	11-20	11-20
	- еталонна ділянка	21-30	21-30	21-30
	- тріщина	31-40	51-60	52-60
	- тріщина з металевим стрижнем	41-52	61-70	61-70
	Вимірювання у русі			
	- еталонна ділянка	72	71	71
- тріщина	205	192	99	

Під час зондування аналізувалися імпульсні сигнали георадарів з різними конструкціями антенних блоків (рис. 3.2) і центральною частотою зонduючого надширококутвого імпульсного сигналу. Вибір антенного блоку здійснювався за результатами аналізу імпульсних сигналів георадару, що отримані під час зондування різних конструкцій та оцінювання амплітуди

імпульсу, відбитого від тріщини з різними геометричними параметрами. За результатами проведених експериментів обґрунтовано доцільність застосування у подальших дослідженнях георадарів: з бістатичною антенною системою (рис. 3.2 в) та з блоком антен щілинного типу (рис. 3.2 г), що мають центральну частоту імпульсного сигналу 1,2 ГГц.

Під час вирішення задачі дефектоскопії дорожнього одягу необхідно мати інформацію про еталонні сигнали георадару. До таких сигналів у дослідженні відносяться: зондуючий імпульс георадару і сигнали прямого проходження.

Знання зондуючого імпульсу необхідно під час позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин. Сигнали прямого проходження (з передавача у приймач), які завжди присутні у запису георадіолокаційного профілю, ускладнюють, а іноді й роблять неможливою обробку дифрагованих хвиль та сигналів, що відбиті від границь шарів конструкції дорожнього одягу та границь порушень суцільності монолітних шарів. Ці сигнали повинні бути видалені з запису георадарного профілю у процесі обробки.

За результатами попередніх експериментальних досліджень:

а) розроблено порядок отримання та обробки еталонних сигналів георадару, що відображений у [268] та складається з запису сигналу прямого проходження – сигнал у вільному просторі; запису зондуючого сигналу – сигнал, відбитий від металевого листа; запису сигналу від конструкції – сигнал, що використовується під час обробки радіолокаційного профілю.

б) встановлено основні вимоги до георадарного зондування:

1) рекомендована відстань до поверхні покриття від нижньої поверхні антенного блоку становить – 0,30 м;

2) швидкість горизонтального переміщення георадара не повинна перевищувати швидкість обробки і запису трас на реєструючий пристрій. У випадку перевищення швидкості буде відбуватися втрата трас;

3) крок зондування призначається залежно від детальності обстеження. Для антенної системи з центральною частотою 1,2 ГГц та діаграмою спрямованості $117,4^\circ$ крок зондування призначається: $\Delta = 0,01$ м – пошук і

позиціонування тріщин; $\Delta = 0,05$ м – визначення геометричних параметрів тріщин;

в) обґрунтовано основні параметри знімання під час проведення дефектоскопії дорожніх одягів (табл. 3.2).

За результатами експериментальних досліджень запропоновано схему зондування дорожнього одягу та оброблення сигналів георадару під час вирішення завдання дефектоскопії (рис. 3.5).

3.2.2.2 Оцінка адекватності моделі пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин

У серії експериментальних досліджень використовувалися лабораторні моделі з конструкцією, що складалася з шарів асфальтобетону різної товщини з тріщиною у нижньому шарі, шару сухого піску товщиною 17 см, шару суглинку товщиною 19 см, шару щебеню товщиною 15 см. Розміри моделі у плані: ширина 0,60 м, довжина 1,2 м, глибина 0,6 м. Під час експериментів варіювалася товщина асфальтобетонних шарів над тріщиною та товщина асфальтобетонних шарів, що містять тріщини, що дозволило моделювати різну висоту тріщини у шарі покриття (рис. 3.6).

Зондування здійснювалося різними георадарами (рис. 3.7) відповідно до порядку отримання георадарних даних (рис. 3.5).

Швидкість переміщення георадарів над конструкцією становила близько 1,0 км/год. Первинна обробка імпульсних сигналів георадару здійснювалася у програмах GPR Proview, аналіз сигналів георадару здійснювався у програмі GeoVisy-2.

У процесі аналізу сигналів георадару вирішувалися завдання:

- а) пошуку та позиціонування тріщини у шарі покриття;
- б) визначення верхньої та нижньої границь тріщини із застосуванням методів відновлення діелектричної проникності та товщини шару згідно з [243];
- в) оцінювання висоти та ширини розкриття тріщини.

Таблиця 3.2 – Параметри георадарного знімання

Параметр	Настроювання	Примітка
Розгортка - часовий розріз за глибиною	10 нс	Дослідження верхнього шару покриття
	10 нс; 15 нс	Дослідження монолітних шарів та шарів основи
	25 нс	Дослідження шарів основи та ґрунтів
Кількість накопичень сигналу	від 6 до 10	Сприяє зменшенню шумів і перешкод та збільшенню глибини зондування. Збільшення накопичень знижує швидкість передачі інформації, що може зажадати зниження швидкості переміщення георадару.
Програмне посилення сигналу	амплітуда сигналів не повинна перевищувати $\pm 0,8$	Візуально збільшує амплітуду сигналу, покращує результати аналізу сигналів. Доцільно використовувати у нижніх шарах конструкції.
Тип антенного блоку	бістатична щілинна антена	Пошук та позиціонування тріщин. Можлива зміна періоду зондування та робота у режимі вимірювання крос-поляризації.
	дипольна антена	Визначення глибини розташування тріщини.



Рисунок 3.5 – Порядок отримання георадарних даних та їх інтерпретації

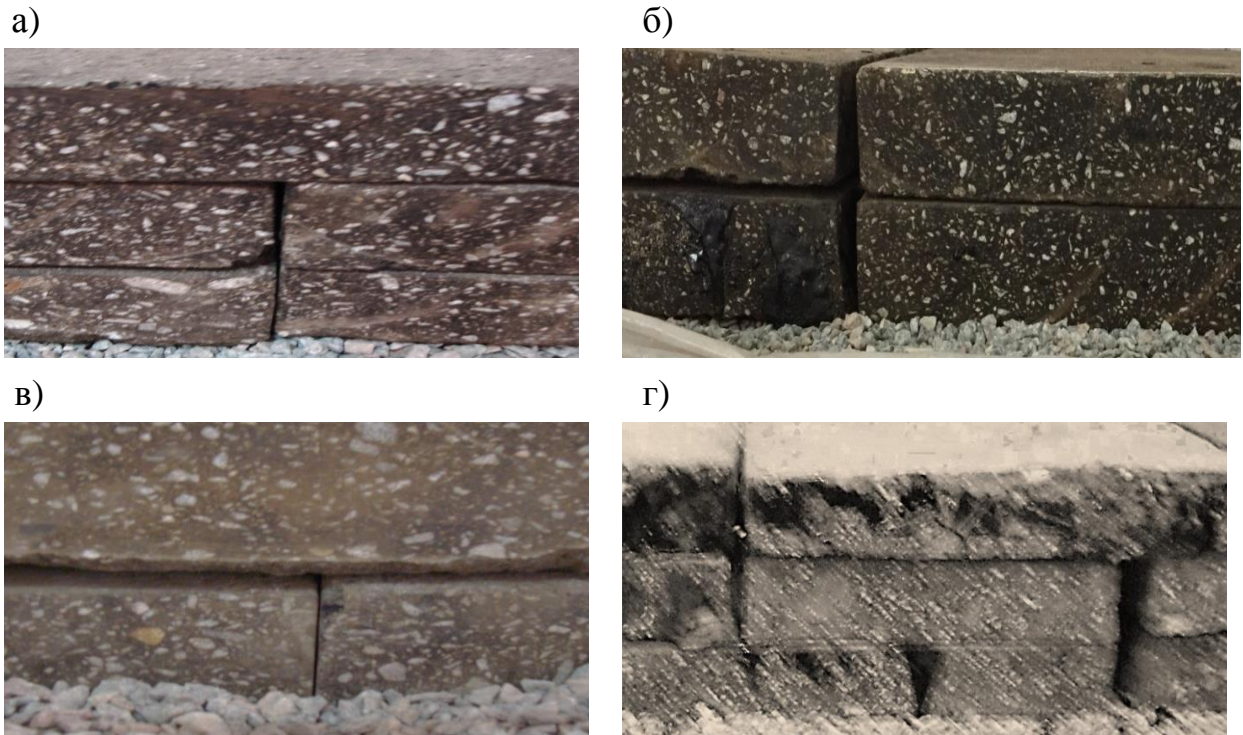


Рисунок 3.6 – Модель конструкції дорожнього одягу: а) тріщина у двох шарах покриття; б) наскрізна тріщина; в) тріщина у нижньому шарі двошарового покриття; г) комбінація наскрізних і прихованих тріщин

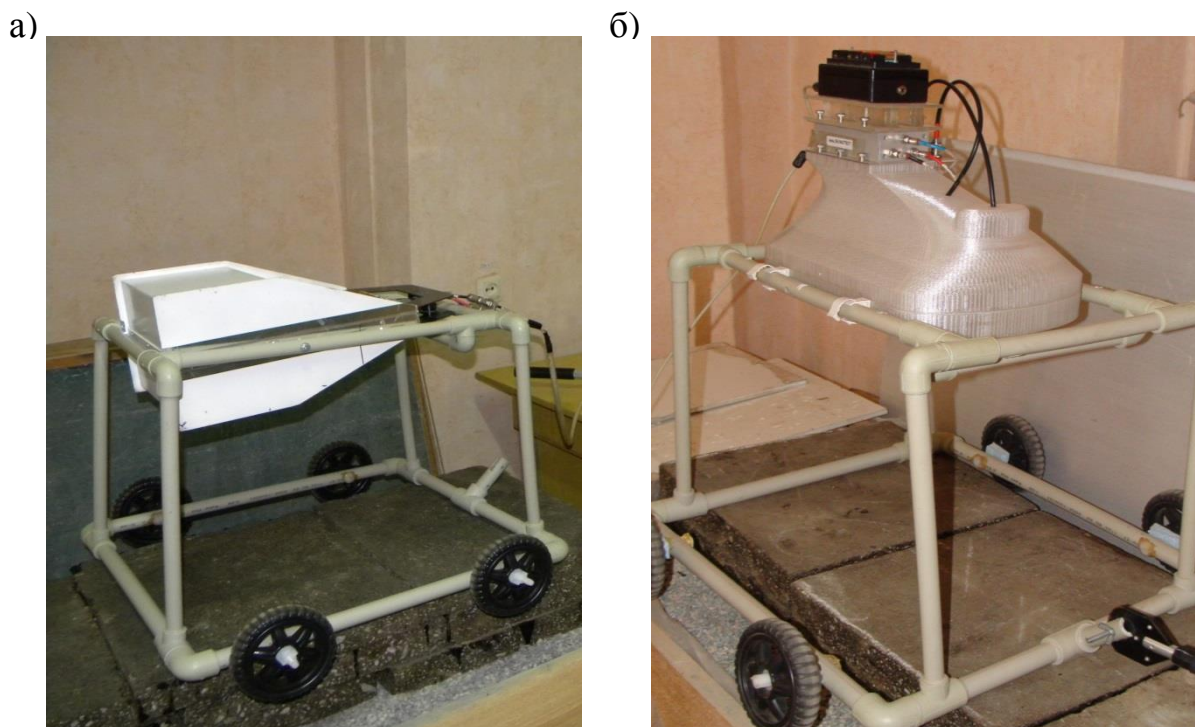


Рисунок 3.7 – Зондування георарадами з різними типами антен: а) дипольна антена; б) бістатична щілинна антена типу «Бобе»

За результатами обробки та аналізу сигналів георадару визначено:

а) місце розташування тріщин за різної глибини її розташування у шарі покриття (рис. 3.8);

б) діелектричну проникність шару покриття над тріщиною (табл. 3.3);

в) верхню та нижню границі тріщини та її висоту (табл. 3.4)

У процесі експериментальних досліджень встановлено, що максимальна відносна похибка вимірювань 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 вимірювань становить від 1 % до 7 %, що знаходиться у межах допустимих значень відхилень товщини шарів конструкції дорожнього одягу згідно з [94]. Оцінювання відтворюваності результатів вимірювань наведено у додатку А.

Таким чином, результати лабораторних досліджень дозволили підтвердити можливість вирішення завдання пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у конструкції нежорсткого дорожнього одягу.

3.2.3 Польові дослідження

Експериментальна перевірка адекватності методів дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу проводилася за допомогою георадара «ОДЯГ-1» згідно з положеннями М 02071168-706 [268], Р В.2.3-218-02071168-781 [258], М 02071168-725 [365], що розроблені за участю автора дисертації, на автомобільних дорогах загального користування:

а) М-03 Київ – Харків – Довжанський (2011 р. – 2012 р.);

б) Р-18 Красноград – Перещепино (2013 р.);

в) М-18 Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта, км 681+000 – км 686+000 (2013 р.);

в) автомобільна дорога в об'їзд м. Харків (2015 р. – 2017 р.);

а)



б)

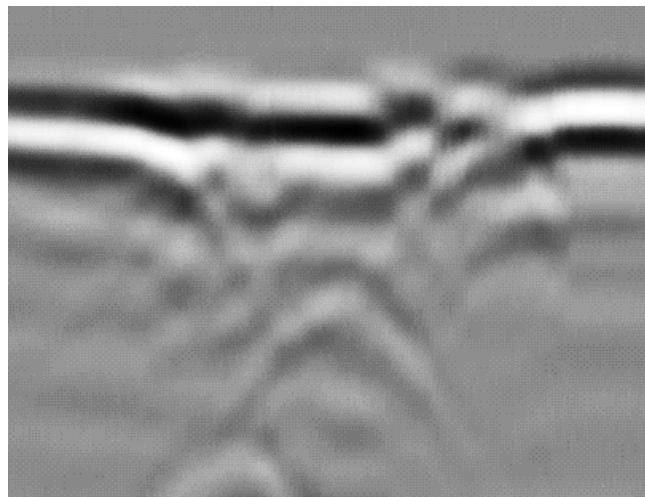


Рисунок 3.8 – Пошук прихованих тріщин: а) конструкція дорожнього одягу; б) радарограма конструкції після обробки

Таблиця 3.3 – Експериментальне визначення діелектричної проникності та товщини шару покриття над тріщиною

Діелектрична проникність		Товщина шару покриття над тріщиною, м		
табличне значення [304]	визначена методом обробки сигналів	фактична	визначена за табличним значенням діелектричної проникності	визначена методом обробки сигналів
7	6,03	0,05	0,04629	0,04987
7	5,98	0,07	0,06463	0,06993
7	5,81	0,12	0,10483	0,01213

Таблиця 3.4 – Оцінка геометричних параметрів прихованої тріщини

Серія вимірювань	Геометричні параметри тріщини, см					
	верхня границя тріщини		нижня границя тріщини		висота тріщини	
	фактична	розрахункова	фактична	розрахункова	фактична	розрахункова
1	5,0	4,987	11,0	11,121	6,0	6,134
2	6,0	5,985	13,0	12,783	7,0	6,798
3	6,2	6,168	11,2	11,268	5,0	5,082
4	7,0	6,993	18,0	18,234	11,0	11,241
5	11,2	10,699	17,2	17,065	6,0	6,366
6	12,0	12,132	17,0	17,081	5,0	4,949
7	13,2	12,988	18,2	18,438	5,0	5,350

г) Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка на ділянці від с. Лобойківка до с. Петриківка (2019 р.).

Результати георадарного зондування ділянок автомобільних доріг наведено у додатку Б.

Під час георадарного зондування дорожнього одягу застосовувалися блоки дипольних антен із центральною частотою зондувального імпульсу 1,2 ГГц, блок антен щілинного типу. Глибина зондування до 1,2 м. Паспортна роздільна здатність за глибиною $\pm 0,5$ см.

У процесі обстеження виконувалося сканування дорожнього одягу уздовж осі смуги руху ділянками завдовжки 200 м та у поперечному напрямку. Антенні блоки переміщалися вручну (рис. 3.9). Загальний порядок проведення експериментальних досліджень:

- а) перевірка працездатності георадарного обладнання;
- б) отримання еталонних сигналів георадару на початку маршруту зондування;
- в) георадарне сканування дорожнього одягу;
- г) оброблення радарограм, що отримані за результатами георадарного сканування дорожнього одягу, з метою пошуку прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи, визначення їх геометричних параметрів;
- д) вирубка кернів з конструкції дорожнього одягу з метою визначення наявності тріщин у шарах покриття та глибини їх розташування;
- е) порівняння результатів обробки радарограм (розрахункових значень глибини розташування тріщини) з фактичними даними щодо наявності тріщин та глибини їх розташування.

Первинна обробка радарограм проводилася з застосування програми GPR Proview. Аналіз та обробка імпульсних сигналів георадару проводилися у програмі GeoVisy-2, що реалізує алгоритм аналізу імпульсних сигналів георадару під час дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу.

За результатами обробки сигналів оцінювалася глибина розташування прихованих тріщин у шарах покриття.

Адекватність отриманих результатів фактичному стану нежорсткого дорожнього одягу оцінювалася шляхом їх зіставлення з кернами, що були відібрані на ділянках, де проводилося георадарне обстеження.

За результатами сканування дорожнього одягу на ділянці автомобільної дороги Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки - Решетилівка від с. Лобойківка до с. Петриківка (рис. 3.9) та обробки радарограм виявлені приховані неоднорідності у конструктивних шарах дорожнього одягу та проведено їх попереднє оцінювання (табл. 3.5).

За результатами візуальної оцінки стан ділянки характеризується як відмінний. Відбір кернів з конструкції дорожнього одягу (рис. 3.9), що був проведений ДП «Державним дорожнім науково-дослідним інститутом ім. М.П. Шульгіна», підтвердив наявність прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи, що дозволяє зробити висновок про адекватність результатів георадарного обстеження фактичному стану нежорсткого дорожнього одягу.

У процесі експериментальних досліджень реєструвалися крос-поляризаційні сигнали за різних кутів розташування антени відносно тріщини з кроком 10 градусів. Для прикладу, що наведений на рисунку 3.10, виміряна амплітуда сигналу становить 40 мВ, тривалість імпульсу – 2,0 нс, тривалість фронту імпульсу – 0,5 нс, кут розташування тріщини відносно напрямку руху становить 50 градусів.

Верифікація даних проводилася також шляхом зіставлення радарограм, які отримані під час проїздів по різних смугах, що виконувалися у різний час (лівий проїзд – 30.05.2019, 31.05.2019; правий проїзд – 31.05.2019).

За результатами зіставлення радарограм отримано добрий збіг даних (стиківка прихованих тріщин по різних смугах проїзду), що дозволяє зробити висновок про адекватність отриманих даних фактичному стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці, що досліджується.

а)



б)



в)



г)



Рисунок 3.9 – Обстеження дорожнього одягу на ділянці від ПК 33+00 до ПК 39+00: а) георадарне сканування дорожнього одягу; б) дослідження на ділянці з тріщиною; в) керн на ПК 33+50; г) керн на ПК 38+60

Таблиця 3.5 – Результати обробки радарограм на ділянці від ПК 33+00 до ПК 39+00, смуга руху праворуч за напрямком руху

Пікет	Сигнал	Вид неоднорідності	Відлік сигналу	Розташування неоднорідності у конструкції дорожнього одягу
33+03,50	82	прихована	625-225	у шарах існуючої конструкції у шарі крупнозернистого асфальтобетону
33+50,57	1400	прихована	525-225	у шарах існуючої конструкції у шарі крупнозернистого асфальтобетону
33+67,68	1646	прихована	450 - 225	у шарах існуючої конструкції у шарі крупнозернистого асфальтобетону
33+93,50	2274	наскрізна	-	у шарах існуючої конструкції у шарах покриття
34+12,66	2740	наскрізна	-	у шарах існуючої конструкції у шарах покриття
34+40,63	3420	наскрізна	-	у шарах існуючої конструкції у шарах покриття
37+46,88	1115	прихована	456-275	у шарах існуючої конструкції у шарі крупнозернистого асфальтобетону
37+54,60	1287	наскрізна	-	у шарах існуючої конструкції у шарах покриття
38+23,04	2900	наскрізна	-	у шарах існуючої конструкції у шарах покриття
38+60,48	3971	прихована	467-285	у шарах існуючої конструкції у шарі крупнозернистого асфальтобетону

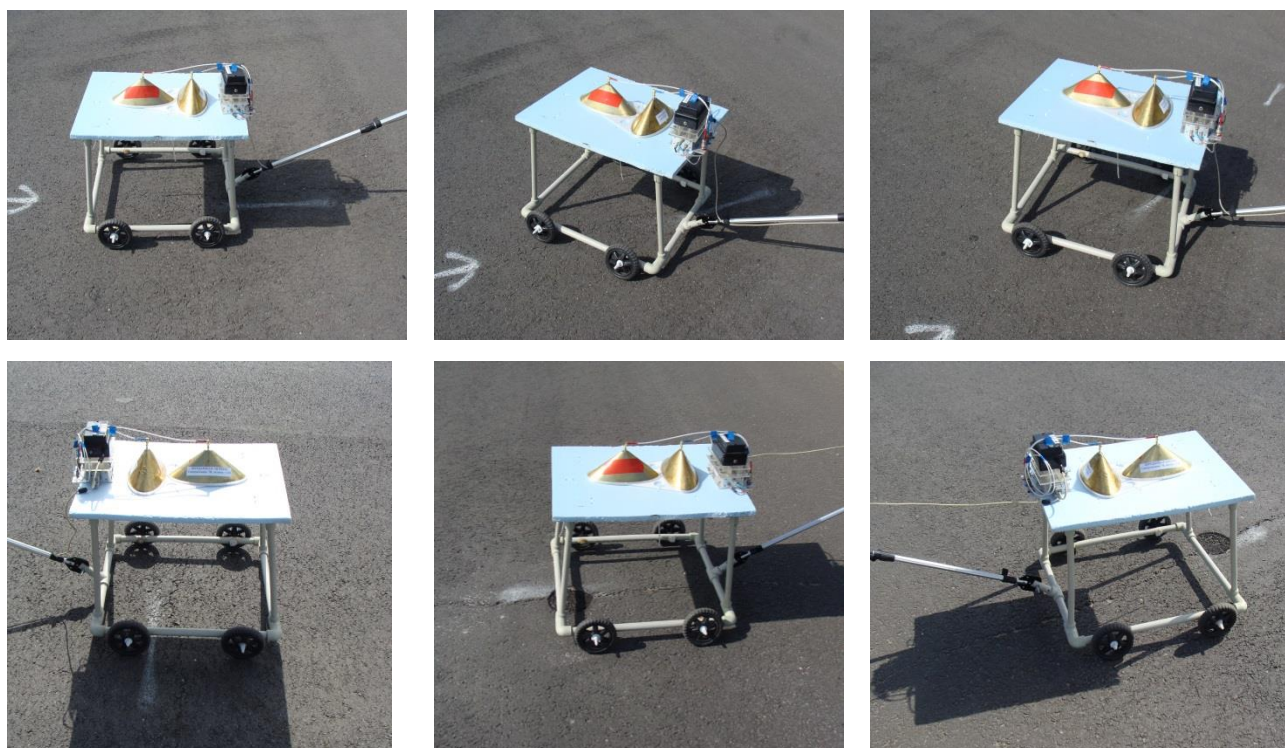


Рисунок 3.10 – Визначення напрямку тріщини методом реєстрації крос-поляризаційної компоненти сигналу

Одним з супутніх результатів, що був отриманий у процесі експериментальних досліджень, є виявлення втрати зчеплення між шарами покриття (рис. 3.11), що призводить до передчасного руйнування нежорсткого дорожнього одягу.

Зіставлення результатів обробки сигналів георадару щодо глибини розташування ділянки з втратою міжшарового зчеплення з результатами вимірювання за керном підтверджує допустиму точність визначення глибини розташування підповерхневих дефектів (табл. 3.6). Даний результат також підтверджує ефективність запропонованого методу та відкриває принципові можливості щодо застосування георадарної діагностики для вирішення завдання пошуку ділянок з втратою зчеплення між шарами покриття.

Таким чином, результати георадарного зондування нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування дозволили:

а) визначити найбільш небезпечні ділянки, для яких характерна значна неоднорідність конструкції у вигляді прихованих лінійних неоднорідностей (тріщин);

б) підтвердити адекватність методів пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин.

3.3 Дослідження впливу тріщин у монолітних шарах на показники поточного стану конструкції дорожнього одягу

Проблеми, що пов'язані з впливом тріщин в асфальтобетонних шарах покриття нежорсткого дорожнього одягу на його напружено-деформований стан, досліджували Б.С. Радовський [52], В.О. Золотарьов [53], В.В. Мозговий [54], І.І. Леонович [13], В.А. Веренько [97], І.П. Гамеляк [57], Л.Б. Гезенцевей [98], Н.В. Горелишев [100], В.Д. Казарновський [60], А.Е. Мерзлікін [61]. Этими проблемами занимались также Д. Пайс и Д. Сауса [129], Э. Оскарсон [130], Р. Литтон [131], М. Кони [134], Аль-Куади [135], Д. Риго [136].

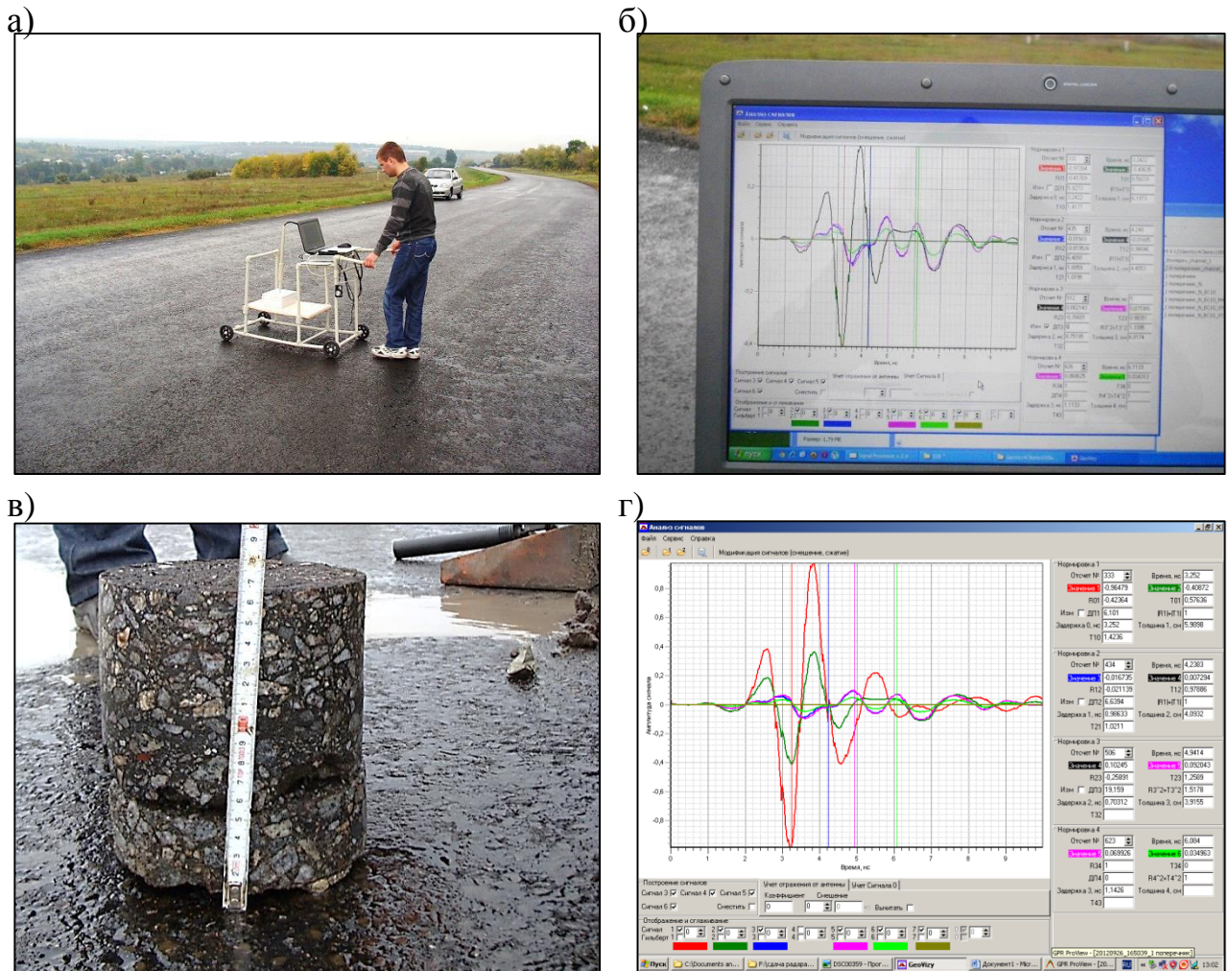


Рисунок 3.11 – Георадарне обстеження ділянки автомобільної дороги М-03 км 528+000: а) сканування дорожнього одягу; б) обробка результатів георадарного обстеження у польових умовах; в) вимірювання глибини розташування ділянки з втратою міжшарового зчеплення; г) обробка та аналіз сигналів георадару на ділянці

Таблиця 3.6 – Визначення глибини розташування дефекту

Показники	Фактичне значення за керном, см	Розрахункове значення за результатами георадарного обстеження, см
Сумарна товщина шарів покриття над дефектом	10,0	10,083
Верхній шар покриття	6,0	5,9598
Другий шар покриття	4,0	4,0932
Третій шар покриття	4,0	3,9155

Згідно з моделлю оцінювання поточного стану дорожнього одягу за результатами діагностики (2.27), основними показниками, що характеризують міцнісні та деформаційні властивості конструкції дорожнього одягу та визначають його поточний стан є: коефіцієнти запасу міцності за критеріями граничного стану, які, у свою чергу, залежать від загального еквівалентного модуля пружності конструкції, напружень розтягу у монолітних шарах конструкції; напружень зсуву у ґрунтах земляного полотна та шарах із незв'язаних матеріалів.

Оскільки строгі аналітичні рішення для оцінювання стану дорожнього одягу, що містить тріщини, отримані для обмеженої кількості модельних задач [140, 141], широке поширення отримав метод скінченних елементів (МСЕ). Конструкція розглядається як деяка сукупність конструкційних елементів, які з'єднані в кінцевому числі вузлових точок. Співвідношення теорії пружності між силами і переміщеннями для кожного елемента дозволяють описати властивості і поведінку всієї конструкції при заданих граничних і початкових впливах. Математично це означає відшукування рішення крайової задачі як набору функцій, визначених на кінцевих елементах. Компоненти матриці жорсткості визначаються координатами вузлів елементів і їх пружними характеристиками: модулем пружності (E) і коефіцієнтом Пуассона (μ). Будемо розглядати постановку задачі в рамках такого підходу.

Для реалізації поставленої задачі проведені серії експериментів з моделювання роботи конструкції дорожнього одягу із залученням методу скінченних елементів, що дозволяє:

- а) обґрунтувати найбільш небезпечне розташування розрахункового навантаження у розрахунках НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами;
- б) оцінити вплив одиночної тріщини, її геометричних параметрів на напруження розтягу у монолітних шарах конструкції дорожнього одягу;
- в) оцінити вплив відстані між тріщинами на НДС конструкції дорожнього одягу;
- г) обґрунтувати підходи до розрахунку дорожнього одягу з тріщинами за

критерієм опору зсуву у ґрунтах земляного полотна.

Моделювання НДС конструкції дорожнього одягу здійснювалося для статичного навантаження гнучким круглим штампом з параметрами розрахункового навантаження:

- а) група навантаження: $A_2 - 115$ кН, $A_3 - 100$ кН;
- б) питомий тиск на покриття: $p = 0,8$ МПа, $p = 0,6$ МПа;
- в) діаметр штамп: $D = 34,5$ см, $D = 37,0$ см.

3.3.1 Обґрунтування положення навантаження у розрахунках НДС конструкції нежорсткого дорожнього одягу з тріщинами

Основним завданням є оцінка впливу положення навантаження відносно тріщини на НДС конструкції дорожнього одягу. Очевидно, що вплив наскрізної і прихованої тріщини у монолітних шарах покриття на НДС конструкції дорожнього одягу буде різним.

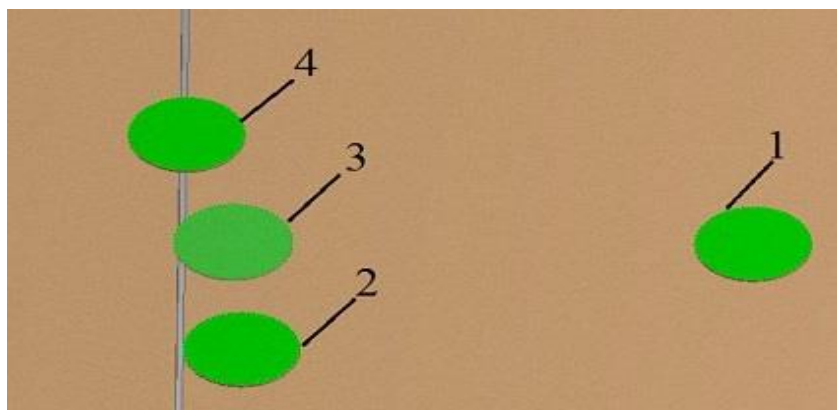
3.3.1.1 Оцінка впливу положення навантаження відносно наскрізної тріщини

Обчислювальна модель являє собою прямокутний представницький об'єм з розмірами: ширина 0,4 м; довжина 0,2 м; висота 1,07 м. Для виявлення принципів особливостей впливу наскрізних тріщин розроблено модель, що складається з:

- а) верхнього шару покриття товщиною 12 см, модуль пружності матеріалу шару $E = 2600$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,35$;
- б) проміжного шару товщиною 25 см, модуль пружності матеріалу шару $E = 450$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,30$;
- в) нижнього шару основи товщиною 70 см, модуль пружності матеріалу шару $E = 120$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,32$.

Модель навантаження являє собою еластичний тонкий циліндр діаметром 34,5 см, до зовнішньої поверхні якого рівномірно докладено тиск 0,8 МПа.

Модель тріщини являла собою прямолінійний «розріз» правильної прямокутної форми. Розглянемо «граничні» випадки розташування навантаження (рис. 3.12): без тріщини; у кромки тріщини; з частковим зміщенням на тріщину; симетрично відносно тріщини.



- 1 – без тріщини; 2– у кромки тріщини;
3 – з частковим зміщенням на тріщину;
4 – симетрично відносно тріщини

Рисунок 3.12 – Розташування навантаження відносно тріщини

Результати розрахунків (табл. 3.7) доводять, що найбільш несприятливим є розташування навантаження з частковим перекриттям тріщини (3, рис. 3.12), тому під час розрахунків НДС конструкції дорожнього одягу з наскрізною тріщиною слід розглядати саме це положення навантаження.

Таблиця 3.7 – Оцінка параметрів НДС конструкції дорожнього одягу

Параметри НДС конструкції	Змінення параметрів НДС за різних варіантах розташування навантаження (рис. 3.1), %			
	1	2	3	4
Максимальні головні напруження на нижній границі покриття	100	115	184	141
Максимальні напруження зсуву в шарі основи з незв'язаних матеріалів	100	190	235	173
Максимальні напруження зсуву на верхній границі ґрунтової основи	100	149	161	117

Як свідчать дослідження автора, часто тріщини мають Т-подібну форму або розташовані паралельно на незначній відстані. Очевидно, що для

T-подібних тріщин НДС конструкції дорожнього одягу буде істотно залежати від положення навантаження.

Для оцінювання впливу T-подібних тріщин, конструкція дорожнього одягу представлена чотиришаровою моделлю, що складається з шару покриття, двох шарів основи, шару ґрунту (рис. 3.13). Елементи моделі – гексагональні впорядковані прямокутні об'єми у кожному шарі дорожньої конструкції із заданими фізичними властивостями матеріалу. По границях робочого тіла задані граничні умови (2.23 – 2.25). Представницький об'єм у всіх обчислювальних експериментах мав форму циліндра діаметром 3 м і висотою 1,3 м. Ширина розкриття тріщин прийнята 3 мм. Основні параметри моделі наведені у таблиці 3.8.

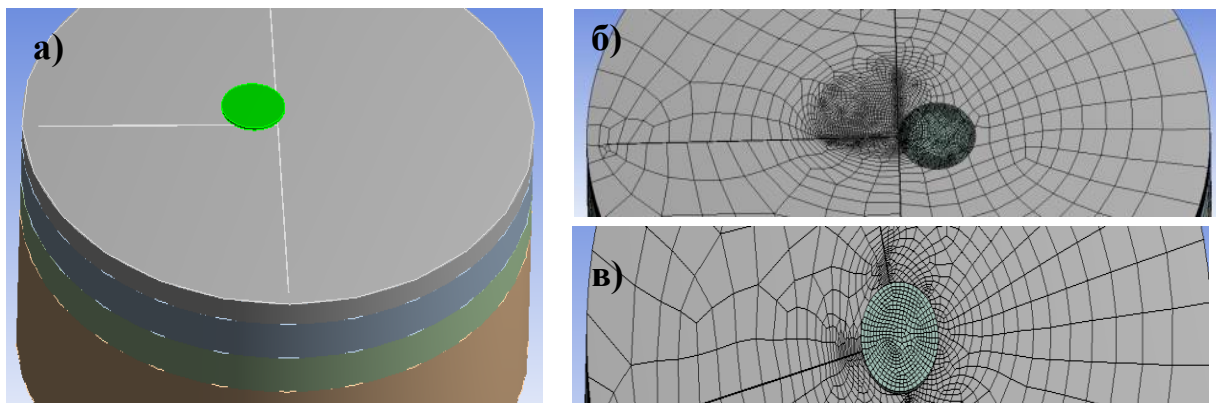


Рисунок 3.13 – Модель конструкції дорожнього одягу за різного положення навантаження відносно тріщини: а) кутове; б) крайове; в) симетричне

Таблиця 3.8 – Розрахункові параметри моделі

Матеріал шару	Розрахункові характеристики матеріалу шару		
	модуль пружності, МПа	товщина, м	коефіцієнт Пуассона
1 Монолітний матеріал	от 1500 до 4500	0,12	0,35
2 Щебінь	350	0,20	0,3
3 Піщано-гравійна суміш	180	0,20	0,3
4 Ґрунтовий півпростір	71,8	-	0,32

У процесі обчислень варіювалося розташування навантаження відносно тріщини і модуль пружності матеріалу шару покриття. Основними результатами розрахунку, що характеризують НДС конструкції дорожнього одягу за наявності тріщин, згідно [11] прийняті горизонтальні напруження розтягу (σ_x, σ_y) на границях шарів покриття, дотичні напруження (τ_{xy}), прогин під навантаженням (w_z) (рис. 3.3 - 3.4) [61].

Проведені розрахунки довели, що наявність тріщини призводить до збільшення максимального прогину під навантаженням за його кутового розташування у 1,92 рази відносно прогину конструкції без тріщини (рис. 3.14). Максимальні напруження розтягу на нижній границі покриття діють за умови крайового прикладання навантаження. Наявність наскрізної тріщини призводить до збільшення напружень (σ_x) до 239 % відносно конструкції дорожнього одягу без тріщин (рис. 3.14). Слід зазначити, що найбільшу небезпеку за наявності наскрізної тріщини являють дотичні напруження (τ_{xy}) на верхній границі основи, які зростають за умови кутового розташування навантаження більш ніж у два рази (234 %) відносно напружень, що діють за умови центрального розташування навантаження, і зростають практично на порядок відносно напружень, що діють у конструкції дорожнього одягу без тріщини (рис. 3.15). Зазначені закономірності слід враховувати у розрахунках нежорсткого дорожнього одягу у проектах ремонту.

Аналіз просторового розподілу максимальних напружень дозволяє зробити висновок, що вони зосереджені поблизу границь сінгулярностей (ребер тріщин) або в області під ними, що узгоджується із загальними фізичними уявленнями і результатами досліджень [154, 366, 367].

3.3.1.2 Оцінка впливу положення навантаження відносно прихованої тріщини

Дослідження НДС конструкції дорожнього одягу з прихованими тріщинами здійснювалося на п'ятишарових моделях.

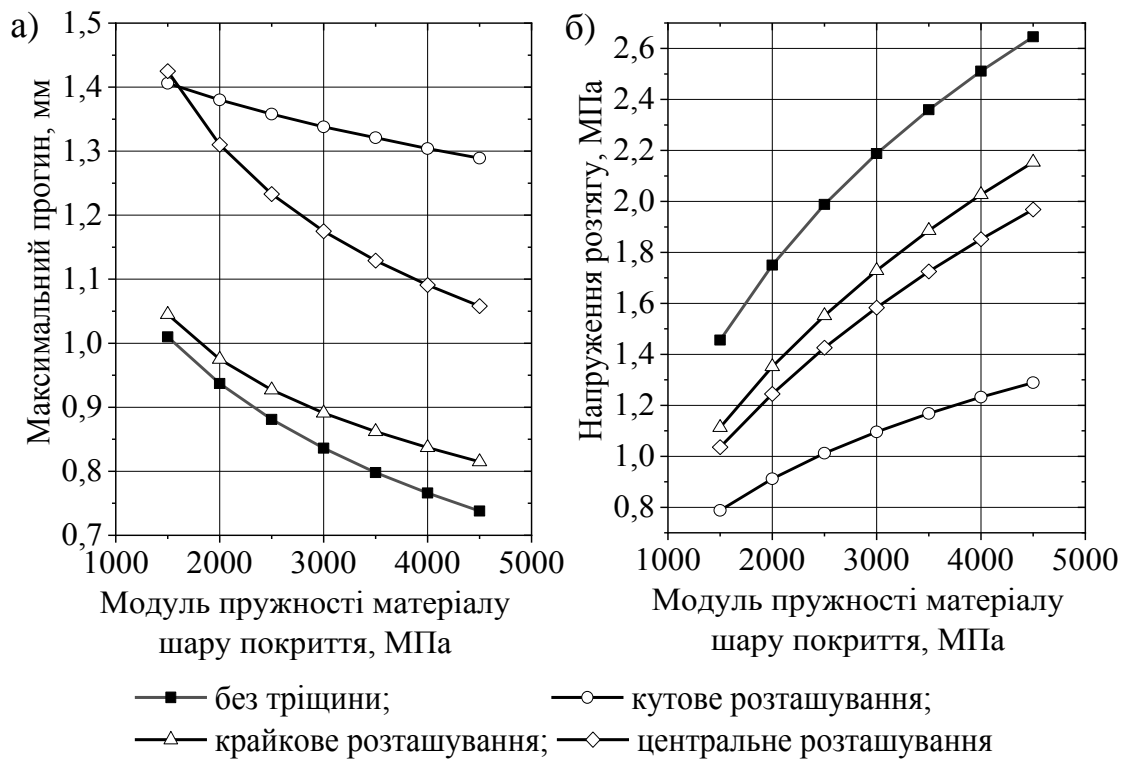


Рисунок 3.14 – Змінювання НДС за різного положення навантаження: а) максимального прогину на поверхні покриття; б) горизонтальних напружень на нижній границі покриття

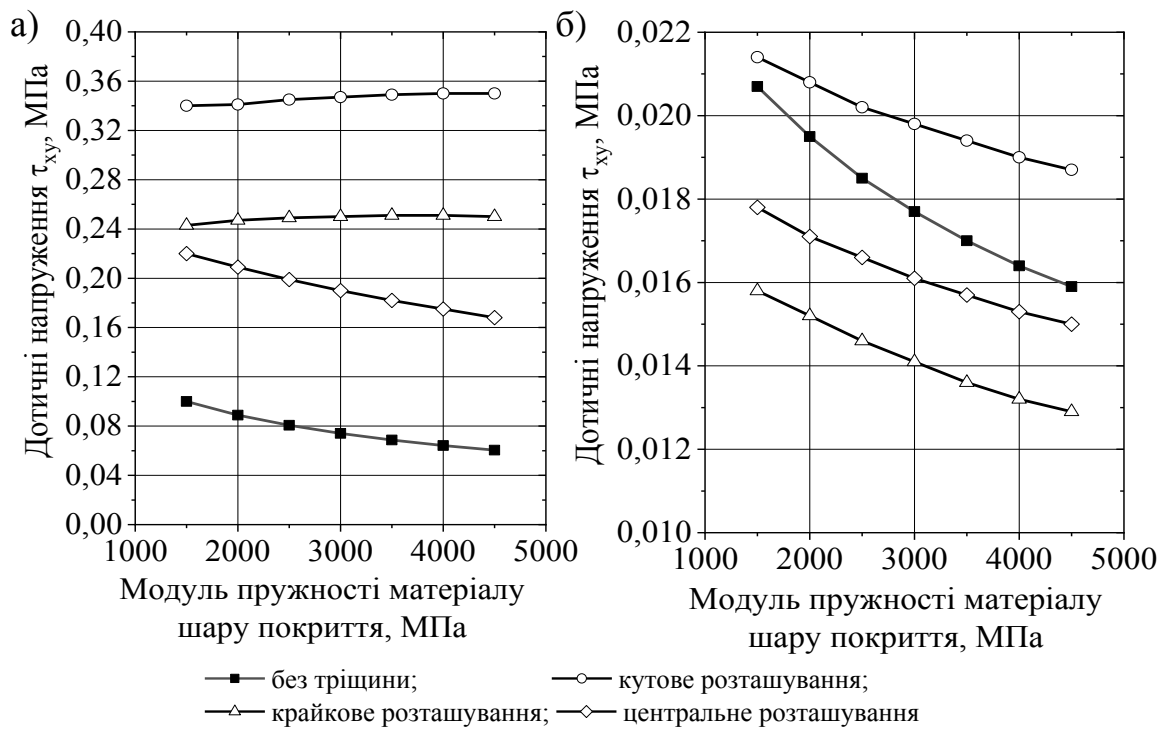


Рисунок 3.15 – Змінювання дотичних напружень за різного розташування навантаження: а) на верхній границі основи; б) на верхній границі ґрунтового півпростору

Основні моделі, що застосовані у розрахунках (табл. 3.9): модель без тріщини; модель з одиночної тріщиною і крайовим розташуванням навантаження; модель з Т-подібною тріщиною і кутовим розташуванням навантаження; модель з Т-подібною тріщиною і центральним розташуванням навантаження; модель з Т-подібною тріщиною і крайовим розташуванням навантаження. Ширина розкриття тріщини дорівнює 0,03 м.

Таблиця 3.9 – Розрахункові параметри моделі

Матеріал шару	Розрахункові характеристики матеріалу шару		
	модуль пружності, МПа	товщина, м	коефіцієнт Пуассона
1 Асфальтобетон	від 1500 до 4500	0,05	0,35
2 Асфальтобетон	1500	0,07	0,3
3 Щебінь	350	0,20	0,3
4 Піщано-гравійна суміш	180	0,20	0,3
5 Ґрунтовий півпростір	71,8	0,78	0,32

Показники НДС, що розраховувалися:

а) максимальний прогин на поверхні покриття, горизонтальні напруження на нижній границі верхнього шару і верхній границі нижнього шару двошарового покриття, що містить тріщину у нижньому шарі покриття;

б) еквівалентні напруження (за Мізесом) на нижній границі верхнього шару покриття (рис. 3.16).

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що вид підповерхневої тріщини (одиночна або Т-подібна) не суттєво впливає на НДС конструкції дорожнього одягу. Горизонтальні напруження розтягу на нижній границі верхнього шару покриття максимальні за центрального розташування навантаження, тоді як у шарі покриття, що містить приховану тріщину, найбільш небезпечними є напруження, які виникають за кутового розташування навантаження.

Таким чином, положення навантаження відносно тріщини найбільш суттєво впливає на показники НДС конструкції дорожнього одягу за значної жорсткості покриття (модуль пружності), що слід враховувати під час розрахунку підсилення дорожнього одягу.

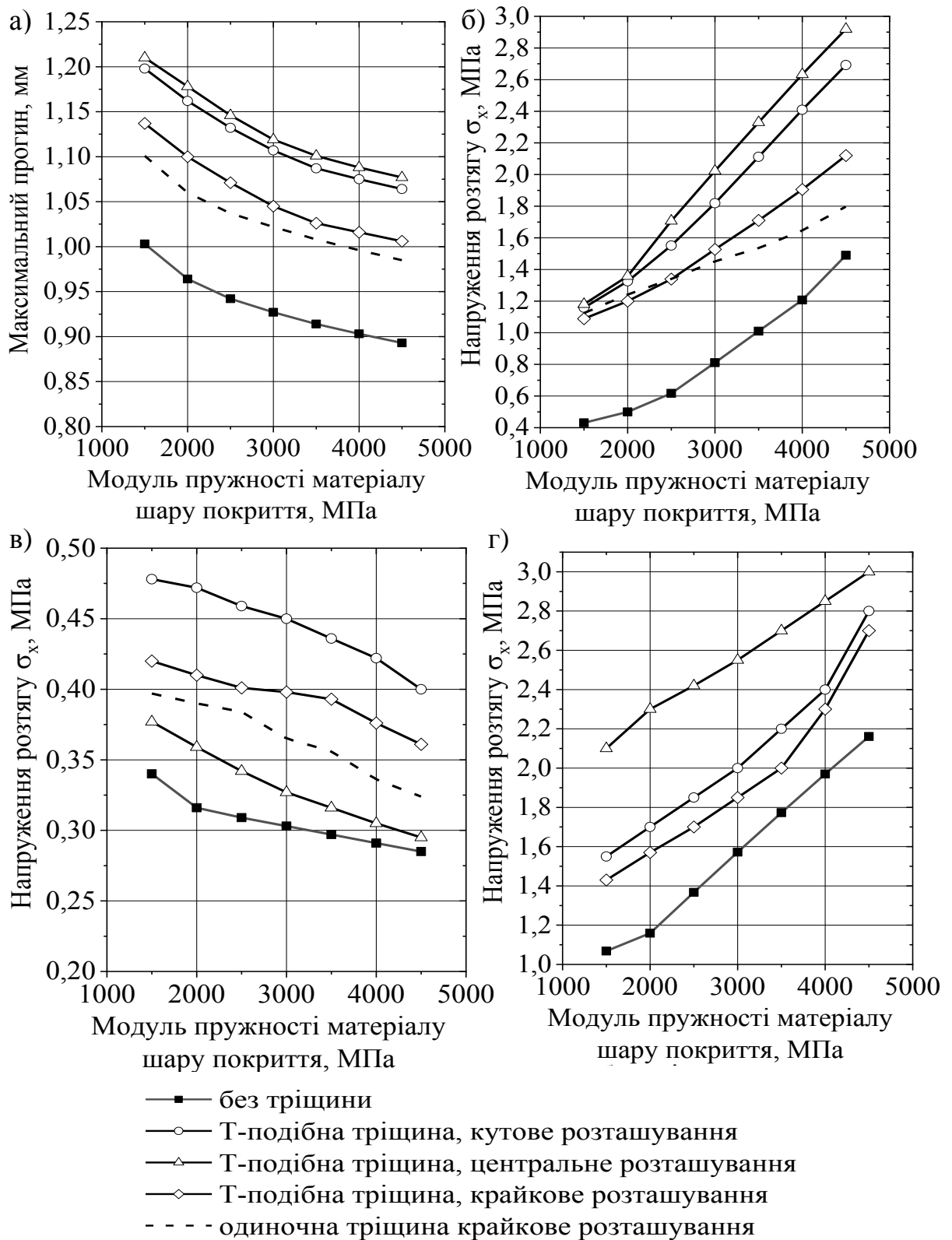


Рисунок 3.16 – Зв'язок параметрів НДС з положенням навантаження та видом тріщини: а) прогин на поверхні покриття; б) горизонтальні напруження по нижній фібрі верхнього шару покриття; в) горизонтальні напруження по верхній фібрі нижнього шару покриття; г) еквівалентні напруження (за Мізесом) по нижній фібрі верхнього шару покриття

Зі зменшенням модуля пружності покриття положення навантаження не суттєво впливає на зміну НДС конструкції. Відзначимо, що у складних напружено-деформованих станах, пов'язаних з наявністю сингулярностей (ребер тріщин) необхідно враховувати головні напруження ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) або їх еквівалент ($\sigma_{vonMises}$).

Під час аналізу НДС конструкції дорожнього одягу важливу роль відіграють не тільки максимальні значення напружень (деформацій) в окремих точках, а й площа їх локалізації (рис. 3.17).

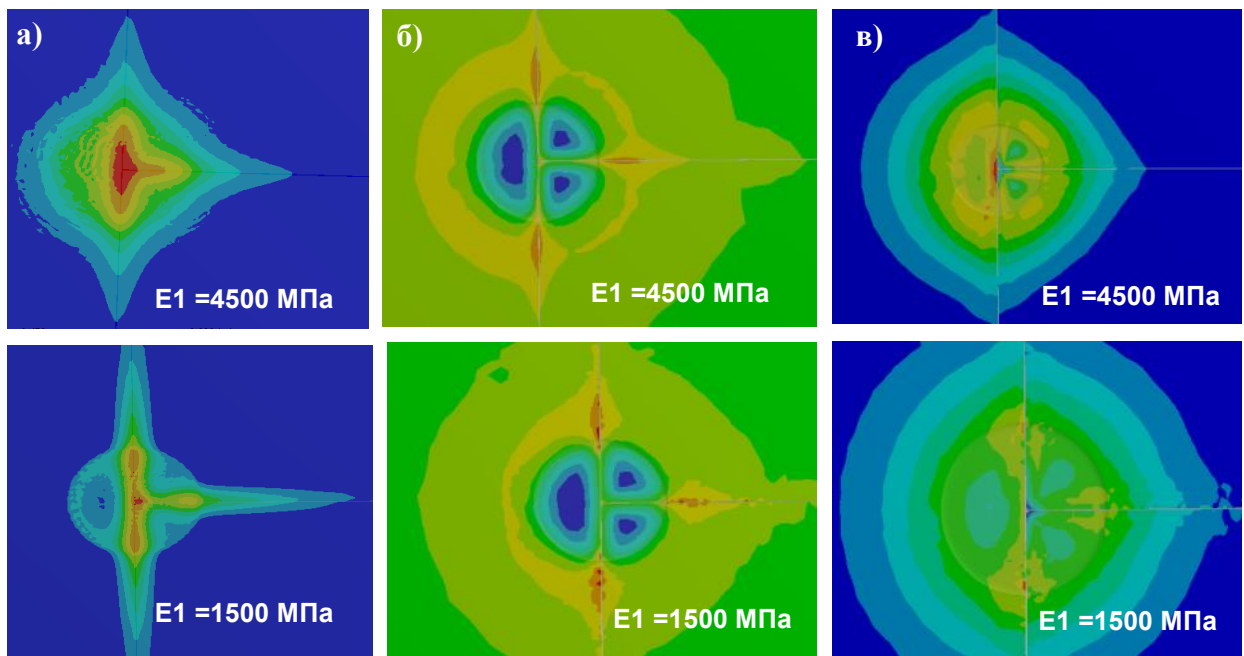


Рисунок 3.17 - Розподіл напружень за наявності прихованої тріщини у нижньому шарі покриття: а) на нижній фібрі верхнього шару покриття (вид знизу); б) на верхній фібрі нижнього шару покриття (вид зверху); в) дотичні напруження на верхній фібрі нижнього шару покриття (вид зверху)

Зменшення модуля пружності матеріалу верхнього шару покриття призводить до збільшення площі локалізації горизонтальних напружень розтягу (σ_x) на нижній фібрі верхнього шару і зниження їх максимальних значень (рис. 3.17). Локалізація горизонтальних напружень (σ_x), що діють поблизу

ребер і граней тріщини, практично не залежить від модуля матеріалу верхнього шару, в той час як розподіл дотичних напружень (τ_{xy}) істотно змінюється зі зменшенням модуля пружності матеріалу шару над тріщиною (рис. 3.17).

Аналіз локалізації напружень у конструкції дорожнього одягу з прихованою тріщиною за різного розташування навантаження (рис. 3.18) дозволив встановити, що несиметричне навантаження є найбільш небезпечним.

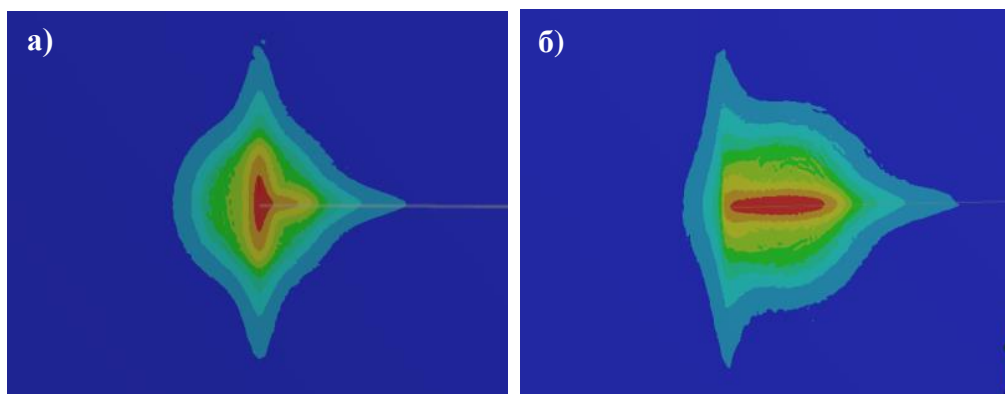


Рисунок 3.18 – Розподіл напружень розтягу на нижній фібрі верхнього шару за різного положення навантаження: а) симетрично; б) на краю тріщини

Зі змінюванням положення навантаження відносно тріщини, горизонтальні напруження (σ_x) на нижній фібрі верхнього шару покриття змінюються незначно:

а) симетричне навантаження: $\sigma_{x1} = 2,78$ МПа;

б) несиметричне навантаження: $\sigma_{x1} = 2,69$ МПа.

Горизонтальні напруження розтягу (σ_x) та дотичні напруження (τ_{xy}) на верхній фібрі другого шару зростають:

а) симетричне навантаження: $\sigma_{x2} = 0,464$ МПа; $\tau_{xy2} = 0,234$ МПа;

б) несиметричне навантаження: $\sigma_{x2} = 1,109$ МПа і $\tau_{xy2} = 0,542$ МПа.

Отже, у розрахунках конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів слід приймати модель з несиметричним розташуванням навантаження.

3.3.2 Чисельне моделювання впливу геометричних параметрів тріщини на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу

Оцінювання впливу одиночної тріщини на НДС конструкції дорожнього одягу здійснювалося на моделі з Т-подібною тріщиною. Прикладання розрахункового навантаження передбачено по центру тріщини. Параметрами, що варіювалися у обчислювальних експериментах були: модуль пружності матеріалу шару покриття з тріщиною; модуль пружності матеріалу заповнення тріщини; товщина шарів над тріщиною; ширина розкриття тріщин (рис. 3.19, рис. 3.20).

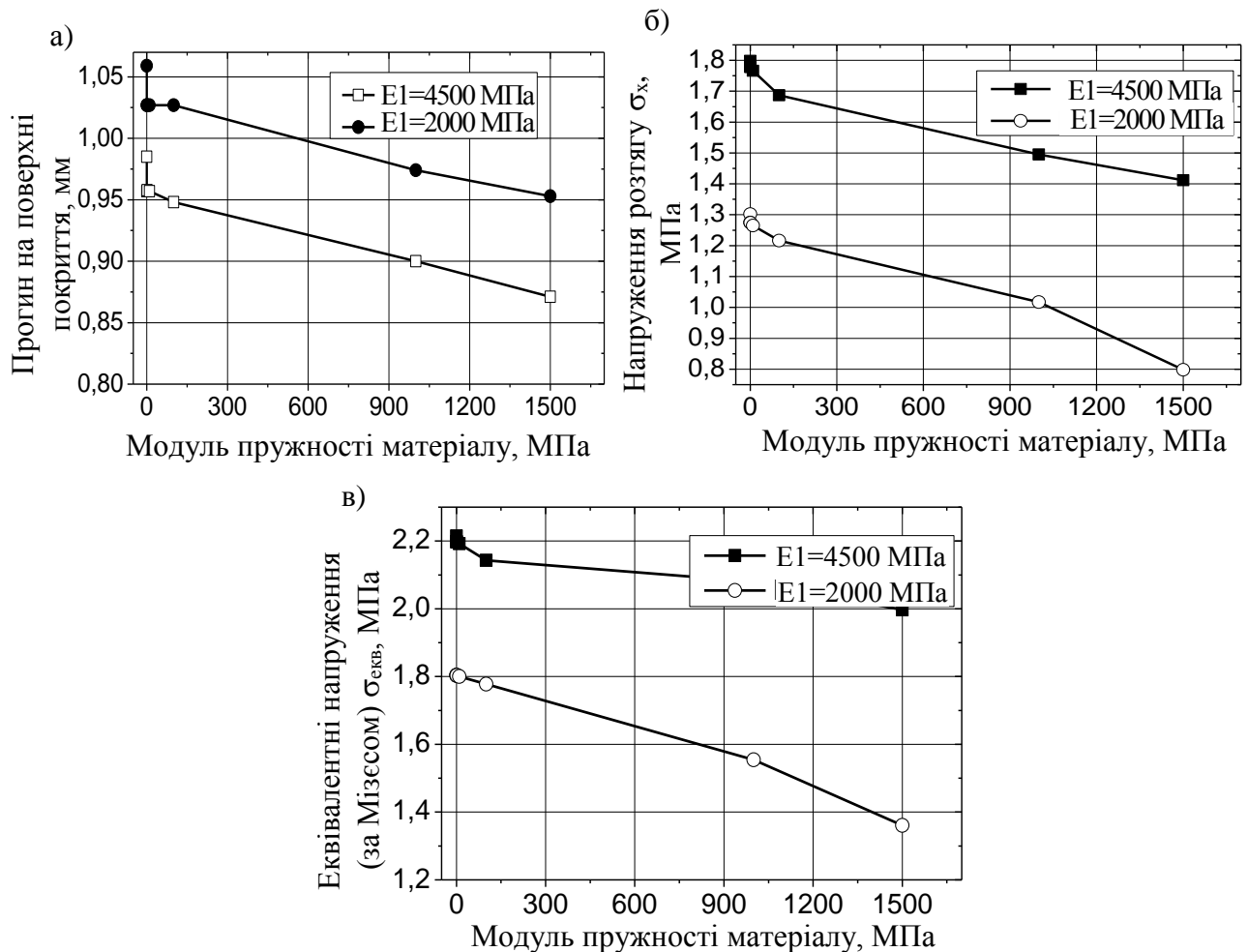


Рисунок 3.19 – Вплив матеріалу заповнення тріщин на показники НДС:
 а) прогин на поверхні покриття; б) горизонтальні напруження між шарами покриття; в) еквівалентні напруження за Мізесом між шарами покриття

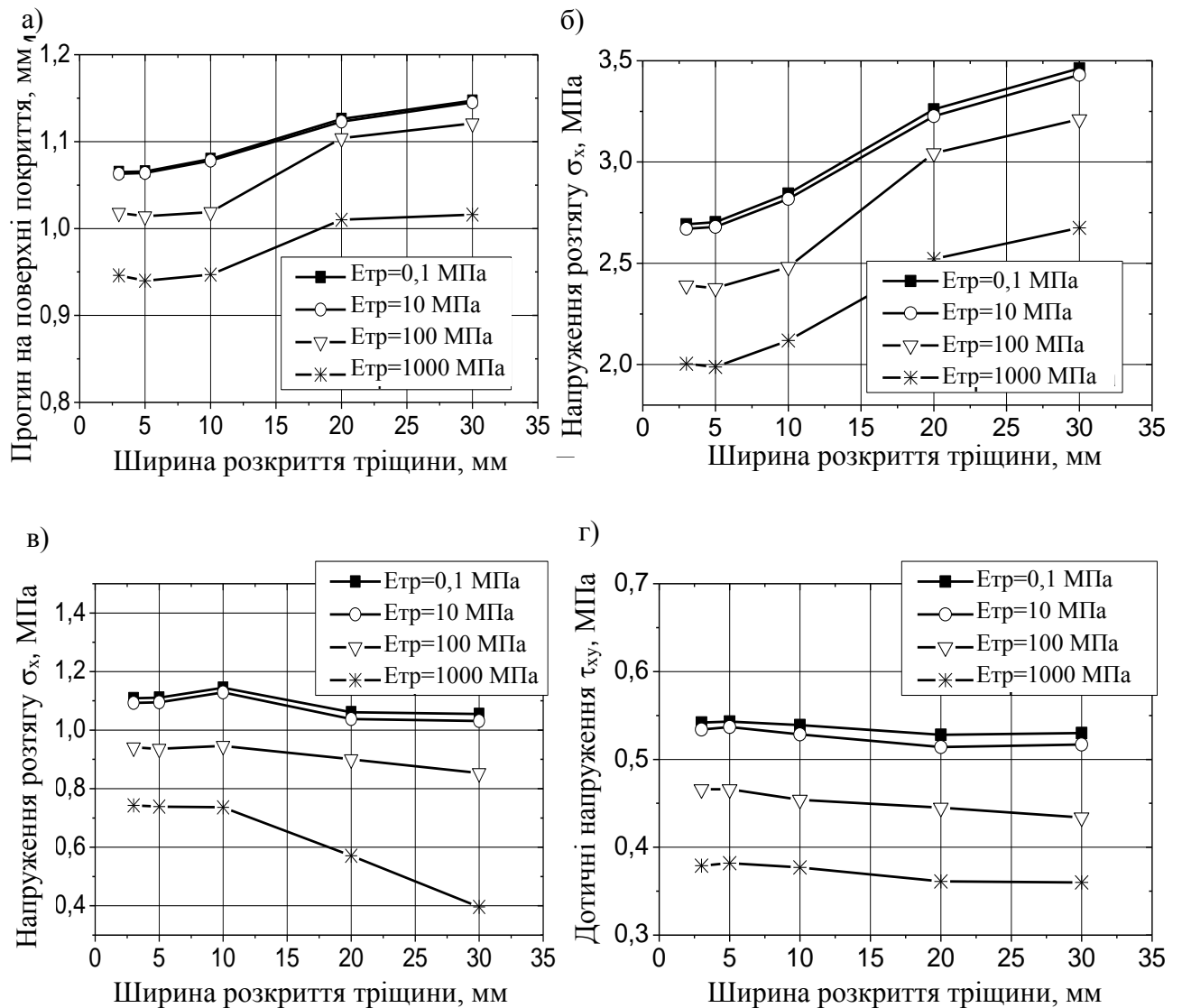


Рисунок 3.20 – Вплив ширини розкриття тріщини та матеріалу заповнювача на показники НДС: а) прогин на поверхні покриття; б) горизонтальні напруження на нижньої фібрі верхнього шару; в) горизонтальні напруження на верхньої фібрі другого шару покриття; г) дотичні напруження на верхньої фібрі другого шару покриття

Аналіз результатів чисельного моделювання свідчить про значний вплив тріщин у нижньому монолітному шарі покриття (рис. 3.19, рис. 3.20) та доводить, що збільшення модуля пружності матеріалу заповнення тріщин у 1,5-2 рази зменшує горизонтальні напруження (σ_x) на верхньої фібрі першого та другого шарів покриття. При цьому горизонтальних напружень між шарами покриття пропорційно зменшенню модуля пружності шару (рис. 3.19).

Зазначимо також, що закономірності зміни напружень на границях шарів покриття істотно залежать від ширини розкриття тріщини. Розрахунок напружень у монолітних шарах конструкції дорожнього одягу доводить, що зі збільшенням ширини розкриття тріщини зменшуються горизонтальні напруження розтягу на нижньої фібри двошарового покриття (σ_x), що відповідає границі «покриття - основа» (рис. 3.20). Разом з тим, горизонтальні напруження між шарами покриття (σ_x), що діють нормально до тріщини, істотно збільшуються із зростанням ширини розкриття тріщини, що пов'язано із втратою зчеплення у місці контакту верхнього шару покриття з тріщиною та призводить до роботи шару як плити обпертої по контуру.

Аналіз результатів моделювання дозволяє оцінити ефективну ширину розкриття тріщини, за якої зменшуються напруження розтягу (σ_x) на нижній фібри пакету монолітних шарів покриття. Розкриття тріщини до 0,01 м (10 мм) фактично не змінює розподіл напружень у шарах покриття та основи, тоді як розкриття тріщини завширшки 10 мм призводить до зменшення напружень розтягу на границі «покриття – основа» (рис. 3.20). Для запобігання зростання горизонтальних напружень розтягу (σ_x) заповнення тріщини повинно виконуватися матеріалами з модулем пружності понад 1000 МПа.

Закономірності зміни НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у нижньому монолітному шарі покриття залежно від товщини та деформаційних характеристик матеріалів шарів покриття та основи, а також залежно від відношення $E_{ср_пок}/E_{основ}$ ($E_{ср_пок}$ – середньозважений модуль пружності покриття, МПа; $E_{основ}$ – загальний еквівалентний модуль пружності на поверхні основи) досліджено в [243]. Чисельне моделювання НДС конструкцій дорожнього одягу з тріщинами, що виконано у дисертаційному дослідженні, підтверджує висновки [243] про наявність «ефективної товщини» покриття, яка забезпечує незалежність напружень розтягу на нижній фібри шарів покриття від відношення $E_{ср_пок}/E_{основ}$ та наявність граничного значення $E_{ср_пок}/E_{основ}$,

за якого збільшення товщини шарів покриття призводить до зменшення напружень розтягу на нижній фібрі покриття.

Ще один можливий підхід до зменшення напружень у шарах конструкції дорожнього одягу з тріщинами полягає у влаштуванні проміжного шару – тріщиноперериваючого прошарку. Для порівняння напружень, що діють у шарах конструкції з одним шаром посилення та у конструкції з двома шарами (шар посилення і тріщиноперериваючий прошарок), використовувалися дві ідентичні по інших параметрах моделі. Як свідчать отримані результати, тріщиноперериваючий прошарок знижує напруження на нижній фібрі верхнього шару покриття на 12,5 %. Характерно, що при цьому знижуються також й напруження розтягу (σ_x) у шарі з тріщиною.

Результати, що отримані при моделюванні НДС конструкцій з прихованими тріщинами, можуть бути застосовані як при оцінюванні стану дорожнього одягу, так й при розробленні проектів капітального ремонту нежорсткого дорожнього одягу.

3.3.3 Моделювання впливу відстані між тріщинами на напружено-деформований стан конструкції дорожнього одягу

Основним завданням даного етапу дослідження була оцінка впливу відстані між тріщинами на НДС конструкції дорожнього одягу. Досліджувалась модель конструкції дорожнього одягу з двома паралельними прихованими тріщинами. Параметри моделі:

- а) товщина верхнього шару покриття – 5 см;
- б) товщина нижнього шару покриття з прихованими тріщинами – 7 см;
- в) модуль пружності шарів покриття : верхнього шару – E_1 ; нижнього шару – E_2 ;
- г) коефіцієнт Пуассона шарів покриття $\mu = 0,35$, шарів основи $\mu = 0,30$;
- д) ширина розкриття тріщини – 0,003 м.

У процесі обчислень варіювалися відстань між тріщинами (L) та модуль пружності матеріалу, що заповнює тріщину (E_{mp}).

За первинні параметри, що характеризують поточний стан дорожнього одягу на блочній основі [61], прийняті напруження розтягу на границях шарів покриття (σ_x), дотичні напруження на верхній границі шару з тріщиною (τ_{xy}) і загальний прогин під навантаженням.

Проведені розрахунки довели:

а) максимальний прогин під навантаженням збільшується, якщо відстань між прихованими тріщинами становить менше за діаметр штампу рівновеликого відбитку колеса (0,37 м);

б) заповнення тріщини незначно змінює величину максимального прогину на поверхні конструкції дорожнього одягу (рис. 3.21).

Таким чином, наявність блочної основи незначно впливає на величину максимального прогину під статичним навантаженням, отже, вимірювання величини прогину не може служити надійним інструментом діагностики наявності прихованих тріщин, особливо для міцних конструкцій.

Збільшення напружень розтягу на нижній фібрі верхнього шару покриття відбувається лише за значних значеннях модуля пружності матеріалу і відстані між тріщинами, що не перевищує 0,4 м (рис. 3.22).

Заповнення тріщин знижує максимальні напруження розтягу у діапазоні від 5 % до 10 % . При цьому нижня межа діапазону відповідає модулю пружності матеріалу верхнього шару покриття 2000 МПа, верхня межа – модулю пружності матеріалу верхнього шару покриття 4500 МПа.

Під час аналізу НДС конструкції дорожнього одягу необхідно враховувати не тільки максимальні значення напружень, а й характер їх просторового розподілу (рис. 3.23). Аналіз розподілу напружень (рис. 3.23) свідчить, що за певних співвідношень між параметрами тріщин і шарів конструкції залежно від кількості тріщин, виникають зони значних напружень розтягу. За наявності прихованих тріщин, у нижньому шарі покриття виникають напруження розтягу на верхній границі, що концентруються поблизу тріщин.

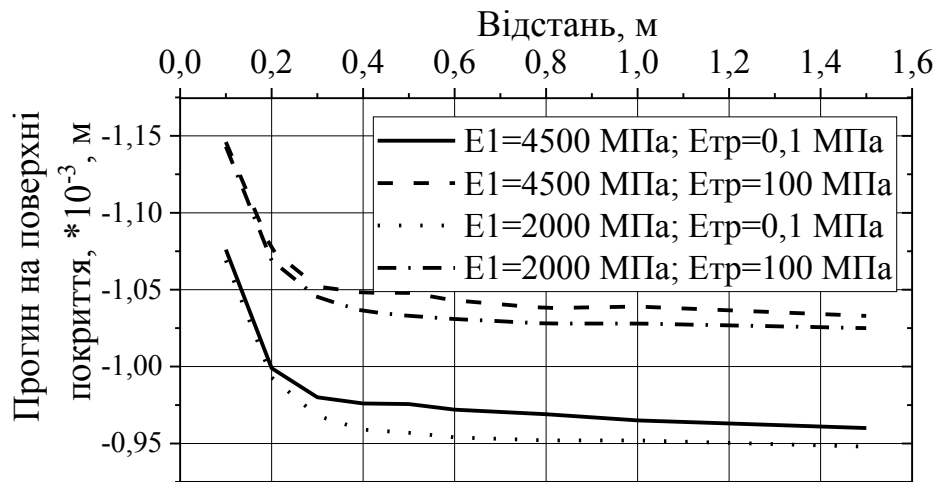


Рисунок 3.21 – Зв'язок максимального прогину з відстанню між тріщинами

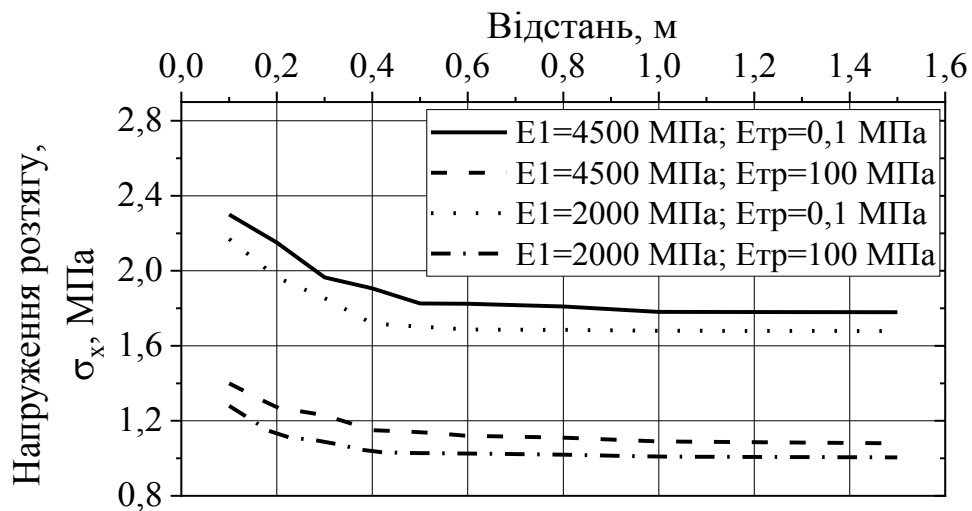


Рисунок 3.22 – Зв'язок напружень розтягу (σ_x) з відстанню між тріщинами

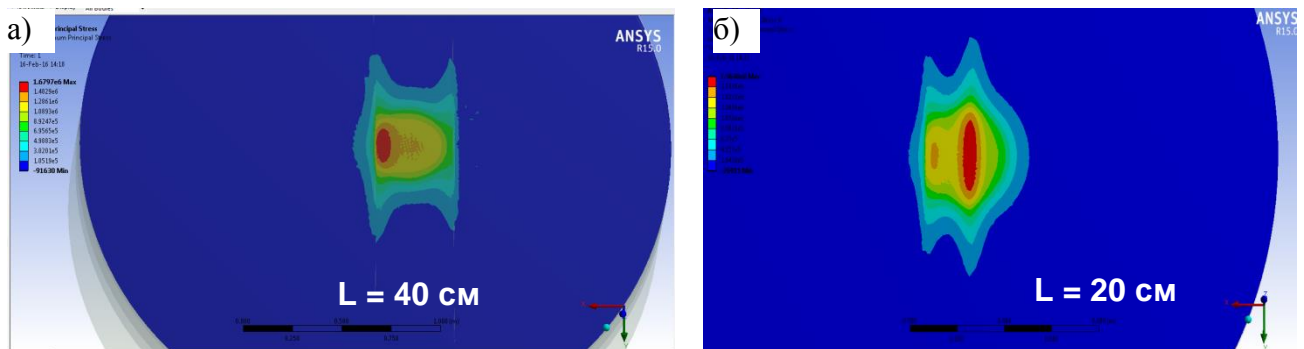


Рисунок 3.23 – Розподіл горизонтальних напружень (σ_x) на нижній фібрі верхнього шару покриття за різної відстані між тріщинами: а) 40 см; б) 20 см

Таким чином, моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з прихованими тріщинами у шарах покриття доводить що, незважаючи на незначний вплив відстані між тріщинами на величину прогину на поверхні покриття (збільшення на 1,9 %), відстань між тріщинами більш суттєво впливає на максимальні горизонтальні напруження на нижній фібрі верхнього шару покриття (збільшення на 3,3 %). Окрім зміни максимальних напружень у шарах покриття, приховані тріщини призводять до змінювання картини їх просторового розподілу.

3.3.4 Моделювання впливу тріщин на напружено-деформований стан шарів із незв'язаних матеріалів і ґрунтів земляного полотна

Робочою гіпотезою даного етапу досліджень є припущення, що за наявності наскрізних тріщин у покритті зростає вологість нижніх шарів основи (ґрунту) у локальній зоні, що розташована під тріщиною, внаслідок потрапляння води через тріщини у покритті до нижніх шарів основи і підстильного ґрунту. Наявність у нижньому шарі конструкції дорожнього одягу локальної зони підвищеної вологості призводить до змінювання НДС конструкції дорожнього одягу.

Для проведення обчислювальних експериментів з моделювання впливу вологості ґрунту на НДС конструкції дорожнього одягу з тріщиною була створена модель з розмірами: ширина 0,4 м, довжина 0,2 м; висота 1,07 м. Модулі пружності матеріалів шарів (E_i) і коефіцієнт Пуассона (μ_i) мали значення:

а) шар покриття: товщина 12 см; $E_1=2600$ МПа; $\mu_1=0,35$; матеріал шару – асфальтобетон;

б) шар основи: товщина 25 см; $E_2=200$ МПа, $\mu_3=0,30$; матеріал шару – щебінь рядовий;

в) шар ґрунту: товщина 70 см; модуль пружності (E_3) змінюється

залежно від відносної вологості ґрунту у діапазоні від 75 МПа до 40 МПа; $\mu_3 = 0,32$; матеріал шару – суглинок важкий пілуватий.

Модель навантаження – циліндричний штамп (відбиток колеса автомобіля) діаметром 34,5 см, висотою 1 см з навантаженням на зовнішню площину у вигляді рівномірно розподіленого тиску 0,8 МПа.

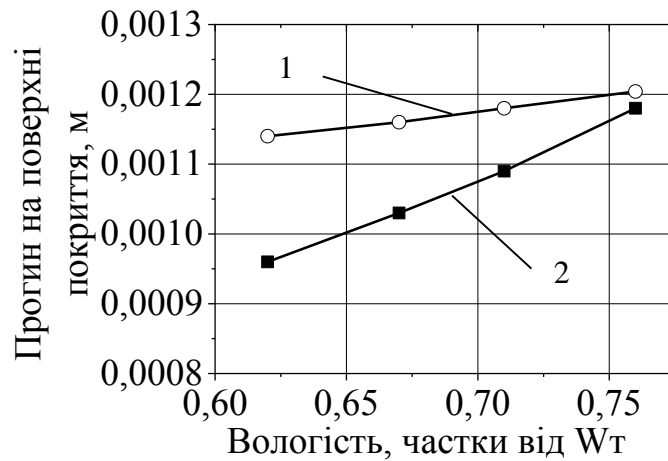
Взаємодію навантаження з поверхнею покриття описує модель контакту з тертям. Коефіцієнт тертя прийнятий $\varphi = 0,3$, що відповідає взаємодії колеса автомобіля з вологим асфальтобетонним покриттям (Frictional).

За результатами моделювання НДС визначались:

- а) вертикальні переміщення (загальний прогин) конструкції дорожнього одягу під навантаженням;
- б) розтягуючі напруження на нижньої фібри шару покриття;
- в) напруження зсуву у шарах з незв'язних матеріалів і ґрунті.

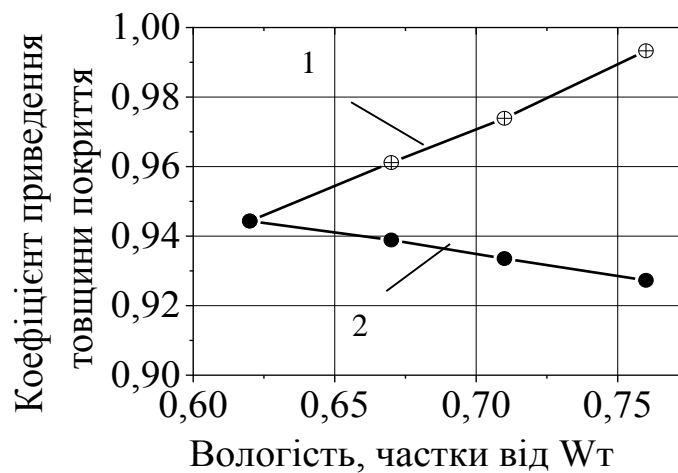
Результати моделювання загального прогину конструкції (рис. 3.24), дозволяють визначити коефіцієнт впливу тріщини на циліндричну жорсткість покриття і еквівалентну товщину шару покриття з тріщинами. Як свідчать результати розрахунків (рис. 3.25), тріщина у покритті зменшує еквівалентну товщину шару покриття на 5,5 %. За значного збільшення відносної вологості ґрунту (до 0,75 від вологості на межі текучості), тріщини у покритті практично не впливають на зміну несучої здатності конструкції дорожнього одягу, оскільки основний внесок у загальний прогин конструкції в цьому випадку вносять деформації ґрунту земляного полотна.

Припустимо, що єдиним джерелом зволоження ґрунту є вода, яка потрапляє через тріщину в покритті. Тоді вологість ґрунту у конструкції без тріщини не змінюється. У цьому випадку збільшення вологості ґрунту у конструкції з тріщиною призводить зменшення товщини шару покриття на 8 % (рис. 3.25). Таким чином, вплив одиночної тріщини на несучу здатність КДО враховується шляхом зменшення товщини шару покриття на величину від 5,5 % до 8 %.



1 – конструкція з тріщиною; 2 – конструкція без тріщини

Рисунок 3.24 – Зв'язок загального прогину на поверхні покриття з відносною вологістю ґрунту



1 – вологість збільшується у конструкції без тріщини та у конструкції з тріщиною;

2 – у конструкції без тріщини вологість не збільшується

Рисунок 3.25 – Залежність коефіцієнта приведення товщини покриття з тріщиною до товщини покриття без тріщини від вологості ґрунту

Розглянемо можливість врахування наявності тріщини у покритті через напруження, що діють у конструкції дорожнього одягу, керуючись положеннями п. 2.1.4.2.

Наявність наскрізної тріщини у покритті призводить до зменшення максимальних головних напружень на нижній фібрі пакету монолітних шарів покриття. При цьому, зміна вологості ґрунту має більший вплив на максимальні

головні напруження у покритті без тріщини (рис. 3.26). З іншого боку, наявність тріщини у покритті призводить до істотного (понад 200 %) збільшення дотичних напружень у проміжних шарах з незв'язаних матеріалів (рис. 3.27 а) і підстильному ґрунті (рис. 3.27 б).

Як було зазначено раніше (п. 2.4.1.2), стандартним інструментом опису зміни несучої здатності конструкції дорожнього одягу на ділянці, що містить тріщину у покритті, є коефіцієнт «концентрації напружень», що визначається за (2.46) і зменшує допустимі напруження зсуву у конструкції в $k_{кн}$ разів відповідно до (2.48).

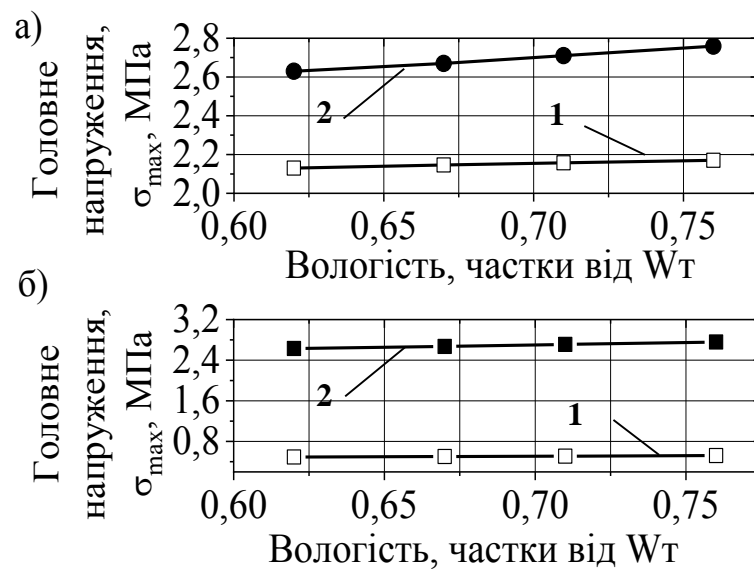
Згідно з результатами розрахунків (рис. 3.28 а), наявність тріщини у покритті може бути врахована шляхом зменшення допустимого напруження зсуву у шарах з незв'язаних матеріалів у 2,5 - 2,4 рази. Для другого граничного випадку, коли основним джерелом зволоження ґрунту є вода, яка потрапляє через тріщину у покритті, а вологість ґрунту у конструкції дорожнього одягу без тріщини не змінюється, збільшення вологості ґрунту у конструкції з тріщиною призводить до зменшення допустимого напруження зсуву у шарах з незв'язаних матеріалів у 2,5 - 2,6 рази (рис. 3.28 а).

Для підстильного ґрунту наявність тріщини у покритті слід враховувати зменшенням допустимого напруження зсуву у ґрунті:

а) за наявності декількох джерел зволоження – вологість ґрунту у конструкції дорожнього одягу без тріщин і з тріщинами у покритті змінюється незалежно від наявності тріщин: в 1,6 - 1,4 рази (рис. 3.28 б);

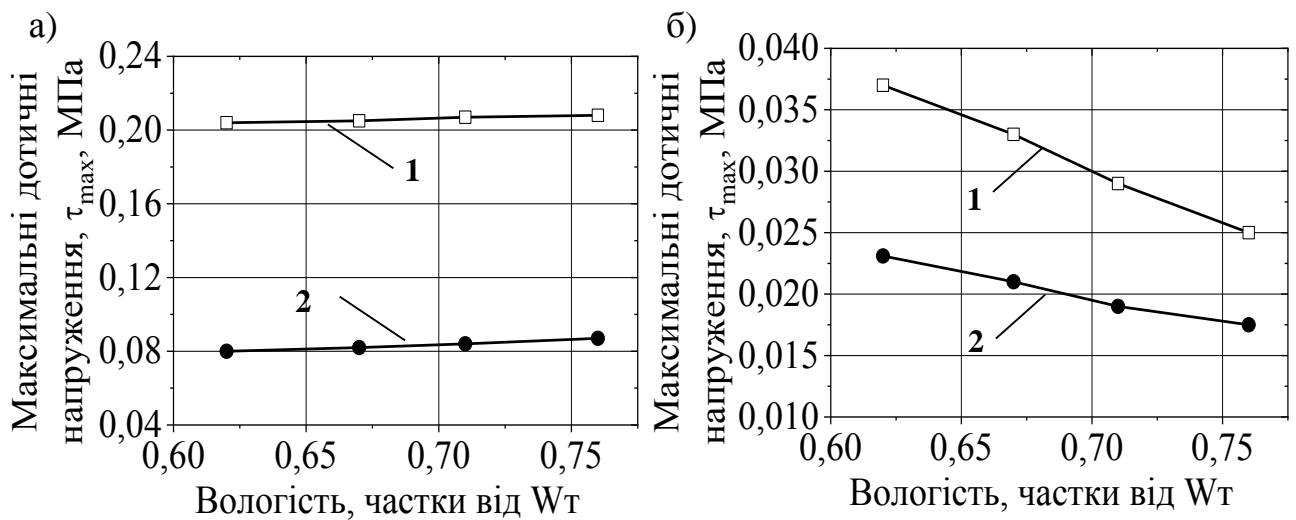
б) за наявності одного джерела зволоження – вологість ґрунту у конструкції дорожнього одягу змінюється через потрапляння води через тріщини у покритті: в 1,6 - 1,1 рази (рис. 3.28 б).

Отримані результати вдосконалять та розвинуть методи розрахунку нежорстких дорожніх одягів, надаючи можливість врахувати наявність тріщин у шарах покриття у розрахунку конструкції дорожнього одягу за критеріями міцності [73].



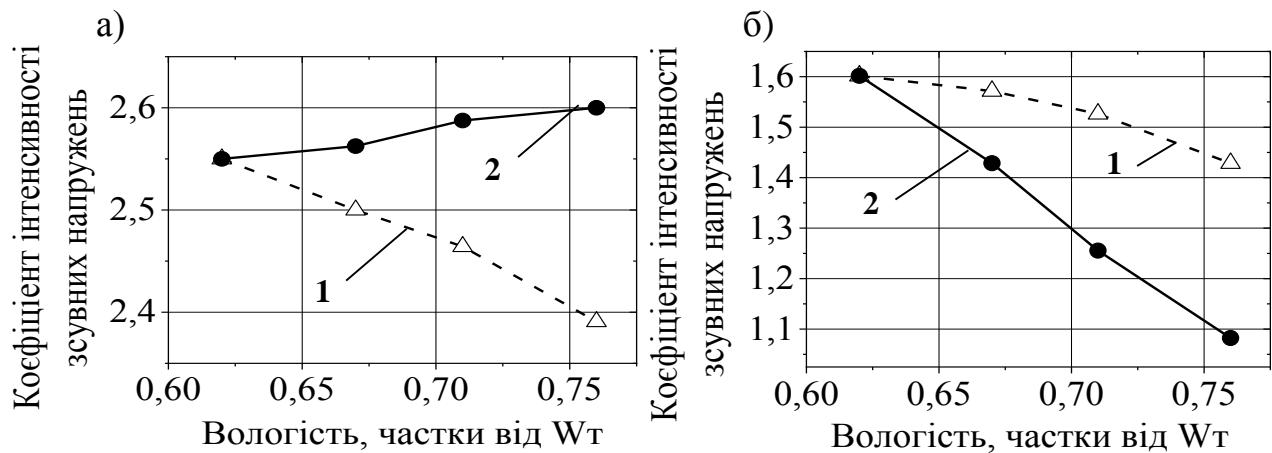
1 – конструкція з тріщиною; 2 – конструкція без тріщини

Рисунок 3.26 – Зв'язок максимальних головних напружень на границі «покриття - основа» з вологістю ґрунту: а) праворуч; б) зліва від тріщини



1 – конструкція з тріщиною; 2 – конструкція без тріщини

Рисунок 3.27 – Зв'язок максимальних зсувних напружень з вологістю ґрунту: а) в проміжному шарі основи з незв'язаних матеріалів; б) на границі «основа - ґрунт»



- 1 – вологість збільшується в конструкції без тріщини і в конструкції з тріщиною;
 2 – в конструкції без тріщини вологість не збільшується

Рисунок 3.28 – Зв'язок коефіцієнта інтенсивності напружень з відносною вологістю ґрунту: а) у шарі основи з незв'язаних матеріалів; б) на границі «основа - ґрунт земляного полотна»

3.3.5 Адекватність моделей оцінювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу з тріщинами

Основним завданням даного етапу експериментальних досліджень є перевірка адекватності моделей оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у покритті зіставленням результатів вимірювання вертикальних переміщень під навантаженням на фізичних моделях конструкції дорожнього одягу з різною шириною розкриття тріщини у нижньому шарі покриття з результатами численного моделювання НДС аналогічних моделей конструкцій дорожнього одягу.

Фізична модель конструкції дорожнього одягу складається з двох шарів покриття, шару основи зі щебеню фракції 5-10, шару ґрунту (табл. 3.10). Розмір моделі: ширина 0,60 м; довжина 0,60 м; висота 0,63 м. Геометричні параметри моделі обґрунтовані за умови теорії подібності та співрозмірності, виходячи зі співвідношення $L/D \geq 3$, де L – $1/2$ ширини (довжини) моделі, D – діаметр штампу.

Таблиця 3.10 – Параметри експериментальної моделі

Номер шару	Характеристика шару	Товщина, м	Модуль пружності, МПа
1	Асфальтобетонне покриття	0,04	2200
2	Асфальтобетонне покриття з тріщиною	0,04	2200
3	Основа – щебінь	0,15	200
4	Грунт - суглинок	0,40	52

Вертикальні переміщення визначалися за допомогою важільного пресу відповідно до [94]. Навантаження на модель здійснювалося через жорсткий круглий штамп діаметром 75 мм та 100 мм. Вертикальні переміщення штампу вимірювалися двома датчиками електронного типу DIGICO 10 з ціною поділки 0,001 мм (рис. 3.29). Датчики розташовувалися на кромках штампу по лінії діаметру. Значення переміщення приймалося, як середнє арифметичне двох датчиків.

У процесі експериментальних вимірювань варіювалася ширина розкриття тріщини від 0,001 м до 0,20 м.

Результати експериментальних вимірювань вертикальних переміщень на поверхні моделі з тріщиною та моделювання НДС аналогічної конструкції наведено у таблиці 3.11 та на рисунку 3.30.

Оцінювання адекватності розрахункової моделі експериментальним даним проводилося за критерієм Фішера, що застосовується для малої вибірки даних (табл. 3.12).

Експериментальний критерій Фішера визначається [368]:

$$K_{\text{фе}} = \frac{D_a}{D_{\text{сер}}}, \quad (3.1)$$

де $K_{\text{фе}}$ – експериментальний критерій Фішера;



Рисунок 3.29 – Модель для вимірювання переміщень під навантаженням

Таблиця 3.11 – Вертикальні переміщення

Ширина розкриття тріщини, мм	Вертикальні переміщення, $1 \cdot 10^{-3}$ м					розрахунок
	серії лабораторних вимірювань					
	1	2	3	4	5	
1	0,282	0,305	0,293	0,291	0,295	0,286
5	0,291	0,285	0,295	0,285	0,292	0,288
10	0,295	0,293	0,295	0,295	0,302	0,292
20	0,313	0,315	0,305	0,303	0,305	0,304
без тріщини	0,284	0,275	0,285	0,293	0,286	0,283

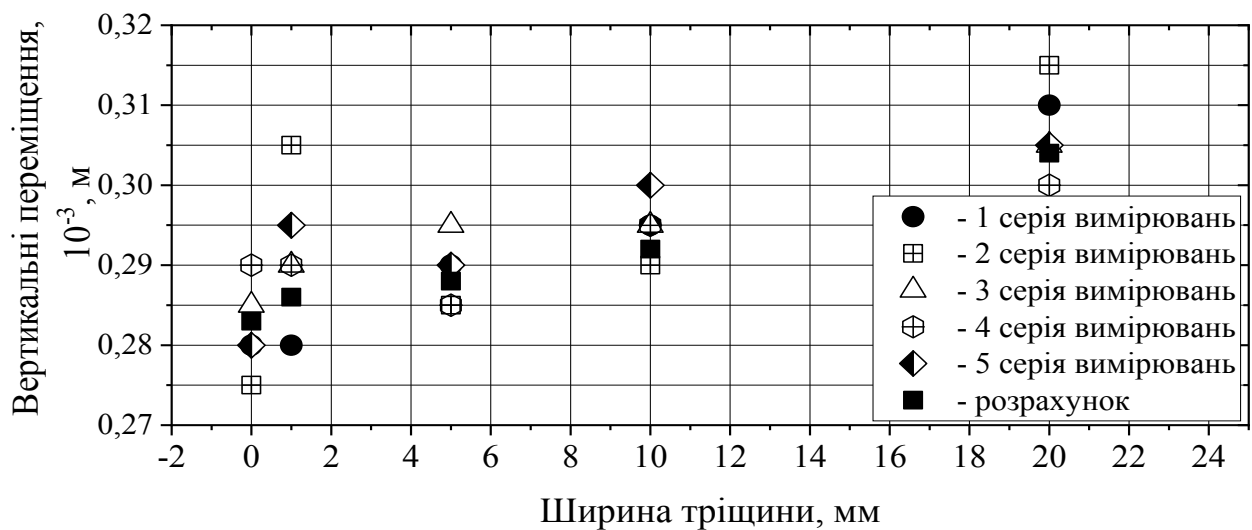


Рисунок 3.30 – Переміщення на поверхні покриття під дією навантаження

Таблиця 3.12 – Розрахунок критерію Фішера

Ширина тріщини	Виміряні значення y_{ie} у серії експериментів					Середнє значення $\overline{\sum_{i=1}^m y_{ie}}$ $y_{ie} = \frac{i}{m}$	y_{im}	$y_{im} - \overline{y_{ie}}$	$(y_{im} - \overline{y_{ie}})^2$	$\frac{\sum_{i=1}^m (y_{im} - y_{ie})^2}{m}$
	1	2	3	4	5					
0	0,282	0,305	0,293	0,291	0,295	0,2932	0,283	0,0102	0,000104	0,0001586
1	0,291	0,285	0,295	0,285	0,292	0,2896	0,286	0,0036	0,000013	0,0000288
5	0,295	0,293	0,295	0,295	0,302	0,296	0,288	0,008	0,000065	0,0000736
10	0,313	0,315	0,305	0,303	0,305	0,3082	0,292	0,0162	0,000262	0,0002858
20	0,284	0,275	0,285	0,293	0,286	0,2846	0,304	0,0194	0,000376	0,0004094
Всього									0,000821	0,0009562

D_a – дисперсія адекватності, що визначається за формулою [368]

$$D_a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{im} - \overline{y_{ie}})^2}{n - d}; \quad (3.2)$$

$D_{сер}$ – середня дисперсія експерименту, що визначається [368]

$$D_{сер} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{im} - y_{ie})^2}{m \cdot n}, \quad (3.3)$$

де y_{im} – розрахункове значення параметру для кожного вимірювання;

$\overline{y_{ie}}$ – середнє експериментальне значення параметру;

y_{ie} – експериментальне значення параметрів із m серій вимірювань;

n – кількість вимірювань в одній серії;

d – кількість коефіцієнтів рівняння теоретичної регресії.

$$D_a = \frac{0,000821}{5-1} = 0,000205; \quad D_{сер} = \frac{0,0009562}{5} = 0,0001912; \quad K_{фе} = \frac{0,000205}{0,0001912} = 1,07.$$

Теоретичне значення критерію Фішера згідно з [368] $K_{\phi m} = 5,85$. Оскільки $K_{\phi e} = 1,07 < K_{\phi m} = 5,85$, розрахункова модель адекватна експериментальним даним, тобто модель з 95 % довірчою імовірністю описує процес, що досліджується. Тому результати чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах покриття можуть бути застосовані під час вирішення завдання оцінювання стану дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики.

3.4 Аналіз параметрів моделі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу

3.4.1 Визначення граничних значень індексу технічного стану

Визначення граничних значень індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу за результатами діагностики за (2.66) ґрунтується на таких положеннях:

а) граничне значення індексу технічного стану (TCI_{zp}) відповідає коефіцієнту надійності $K_n = 0,5$ і коефіцієнтам запасу міцності за граничними станами $K_{mic} = 1,0$ згідно з [73, 94];

б) ризик руйнування конструкції дорожнього одягу, що знаходиться у граничному стані ($TCI = TCI_{zp}$) становить $R_{zp}(TCI) = 0,5$ відповідно до [343];

в) виконується умова рівності коефіцієнтів варіації максимального (CV_{max}) і граничного (CV_{zp}) індексів технічного стану конструкції дорожнього одягу $CV_{zp} = CV_{max}$.

Граничні значення індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (TCI_{zp}) для автомобільних доріг різних категорій визначаються у такому порядку:

а) розраховують коефіцієнти варіації запасу міцності за допустимим

пружнім прогином (CV_E), зсувом у ґрунтах земляного полотна та шарах із незв'язаних матеріалів (CV_τ), опором розтягу при згині (CV_σ) за формулою (2.76). Нормативні коефіцієнти варіації загального та потрібного модуля пружності ($C_{заг}$, $C_{потр}$), допустимого та активного напружень зсуву в ґрунтах земляного полотна і шарах з незв'язаних матеріалів ($C_{Тдон}$, C_τ), міцності на розтяг при згині матеріалу монолітного шару ($C_{Rзг}$, C_σ) для відмінної якості будівництва приймають згідно з таблицею 3.13 за даними [57];

б) визначають коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (CV_{max}) за формулою (2.75), таблиця 3.14;

в) визначають граничне значення індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу за формулою (2.68), таблиця 3.14.

Значення коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (CV_{max}) узгоджуються з дослідженнями В.В. Столярова [343], В.О. Семенова [187], Н.Є. Кокодеєвої [354].

Згідно досліджень В.В. Столярова, В.О. Семенова [343] коефіцієнт варіації параметрів дорожнього одягу автомобільної дороги III категорії для відмінної якості будівництва становить $CV = 0,12$, що узгоджується з результатами розрахунків (табл. 3.14).

Градація індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу спирається на вимоги, що регламентуються нормативними документами з проектування, експлуатації та ремонту нежорсткого дорожнього одягу [73, 347, 369], світову практику діагностики нежорсткого дорожнього одягу [49, 206, 370] та положення, що сформульовані у процесі дослідження [346]:

а) стан відмінний, якщо ризик руйнування на момент проведення діагностики не перевищує граничних значень (табл. 2.2) згідно з [73], коефіцієнти запасу міцності ($K_{міц}$) за критеріями граничного стану дорівнюють або перевищують нормативні значення ($K_{норм}$) для відповідної категорії

автомобільної дороги згідно з [73] $K_{норм} \leq K_{міц}$;

Таблиця 3.13 – Коефіцієнти варіації показників міцності [57]

Категорія дороги	Коефіцієнт варіації міцності			Коефіцієнт варіації напруження (потрібного модуля пружності), для критеріїв розрахунку		
	міцність на розтяг при згині, $C_{Rzг}$	загальний модуль пружності, $C_{заг}$	міцність на зсув, $C_{Тдон}$	згин монолітних шарів, C_{σ}	пружний прогин, $C_{нотр}$	зсув у незв'язних шарах, C_{τ}
Ia	0,12	0,17	0,16	0,12	0,08	0,12
Iб - II	0,12	0,17	0,18	0,14	0,10	0,12
III	0,14	0,18	0,20	0,14	0,10	0,14
IV	0,16	0,20	0,24	0,16	0,10	0,16

Таблиця 3.14 – Граничні значення показників стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу

Категорія дороги	Коефіцієнти варіації запасу міцності			Коефіцієнт варіації індексу технічного стану, CV_{max}	Граничний індекс технічного стану, $TCl_{гр}$
	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, Iб	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

б) стан добрий, якщо коефіцієнти запасу міцності задовольняють умовам $K_{норм} > K_{міц} \geq 0,85 \cdot K_{норм}$ згідно з [371];

в) стан задовільний, якщо індекс технічного стану задовольняє умові $TCl_{добре} > TCl \geq TCl_{гр}$, що відповідає коефіцієнтам запасу міцності за критеріями граничного стану $K_{норм} > K_{міц} \geq 1,0$;

г) стан незадовільний, якщо індекс технічного стану менше за граничних значень $TCl < TCl_{гр}$, ризик руйнування конструкції дорожнього одягу $R(TCl) > 0,5$, коефіцієнти запасу міцності за граничними станами задовольняють умові $K_{міц} < 1,0$.

Визначення граничних значень показників стану нежорсткого дорожнього одягу (табл. 3.15) проводилося за умови рівності коефіцієнта варіації індексу технічного стану його граничним значенням для певної категорії автомобільної дороги, $CV = CV_{\max}$, (табл. 3.14). Граничні значення індексу технічного стану дозволяють: оцінити стан нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики; визначити надійність конструкції дорожнього одягу за заданим або визначеним за результатами діагностики коефіцієнтом варіації індексу технічного стану.

Таблиця 3.15 – Показники оцінювання стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики

Категорія дороги	Показники технічного стану конструкції	Оцінювання за граничними значеннями показників технічного стану конструкції дорожнього одягу			
		відмінно	добре	задовільно	незадовільно
I а, I б	риск руйнування	0,02	0,12	0,50	понад 0,50
	коефіцієнт надійності	0,98	0,88	0,50	менше ніж 0,50
	індекс технічного стану	98,0	81,5	70,7	менше ніж 70,7
II	риск руйнування	0,05	0,15	0,50	понад 0,50
	коефіцієнт надійності	0,95	0,85	0,5	менше ніж 0,50
	індекс технічного стану	95,0	79,9	71,5	менше ніж 71,5
III	риск руйнування	0,10	0,16	0,5	понад 0,50
	коефіцієнт надійності	0,90	0,84	0,5	менше ніж 0,50
	індекс технічного стану	90,0	75,1	70,9	менше ніж 70,9
IV	риск руйнування	0,15	0,23	0,5	понад 0,50
	коефіцієнт надійності	0,85	0,77	0,5	менше ніж 0,50
	індекс технічного стану	85,0	73,4	69,1	менше ніж 69,1

3.4.2 Аналіз впливу показників неоднорідності на стан нежорсткого дорожнього одягу

Основним показником неоднорідності конструкції дорожнього одягу в постановці задачі (2.50) є коефіцієнт варіації фактичного значення індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (CV_{ϕ}), що визначається відповідно до (2.59) за результатами діагностики. Тому у процесі досліджень оцінювався вплив коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції

дорожнього одягу на надійність конструкції дорожнього одягу для автомобільних доріг різних категорій і формування вибірки даних для забезпечення достовірної оцінки стану конструкції за результатами діагностики.

3.4.2.1 Аналіз впливу коефіцієнту варіації на надійність конструкції дорожнього одягу

Під час досліджень проведений розрахунок надійності конструкції дорожнього одягу для автомобільних доріг I – IV категорій за умови змінювання коефіцієнту варіації у діапазоні від 5 % до 35 %. (рис. 3.31 – 3.32).

Аналіз результатів розрахунків доводить:

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 коефіцієнту варіації для відповідної категорії автомобільної дороги (табл. 3.16), надійність конструкції дорожнього одягу не задовольняє нормативним вимогам [73];

в) якщо індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу (\overline{TCl}) перевищує граничне значення (TCl_{gp}), тобто ($\overline{TCl} \geq TCl_{gp}$), то збільшення коефіцієнту варіації призводить до зменшення надійності конструкції дорожнього одягу (рис. 3.33).

За умови $\overline{TCl} < TCl_{gp}$ збільшення коефіцієнту варіації призводить до збільшення надійності конструкції дорожнього одягу. Цей результат є не очевидним, але не є суперечливим. Оскільки збільшення коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу збільшує розкид значень TCl_i відносно \overline{TCl} , то у вибірці збільшується кількість ділянок, індекс технічного стану яких відхиляється як у бік менших, так й у бік більших значень відносно \overline{TCl} . Чим більше відхилення \overline{TCl} від TCl_{gp} , тим більш значною є асиметрія функції щільності розподілу параметру.

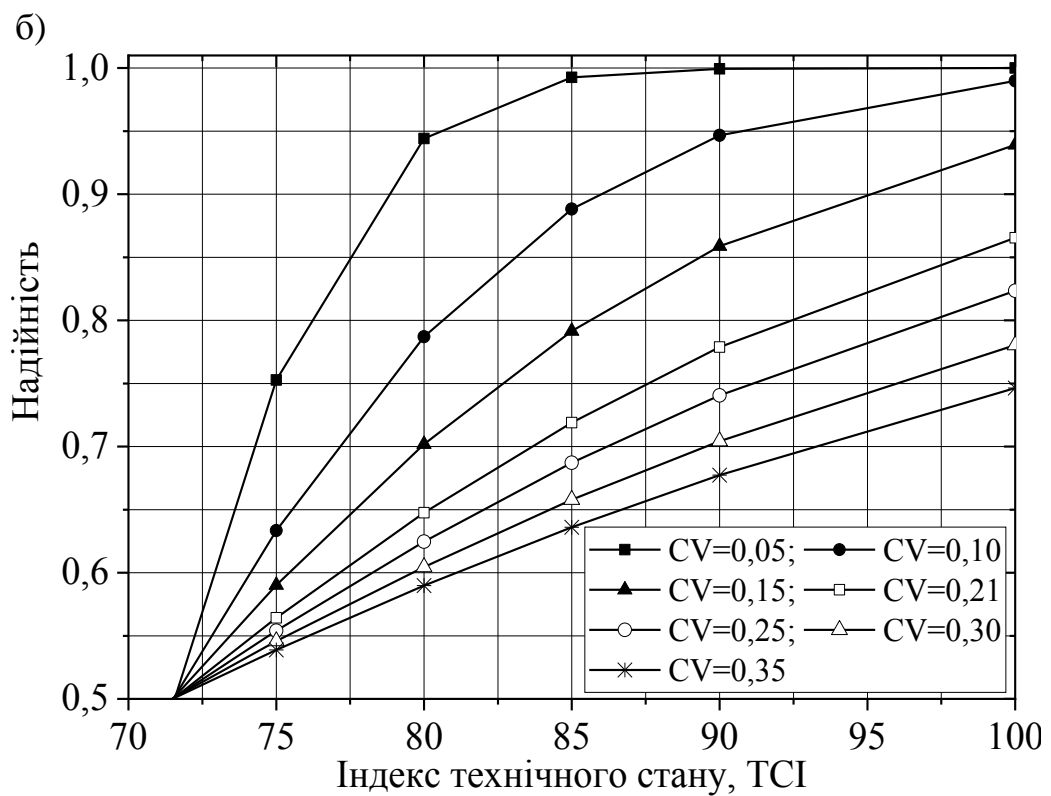
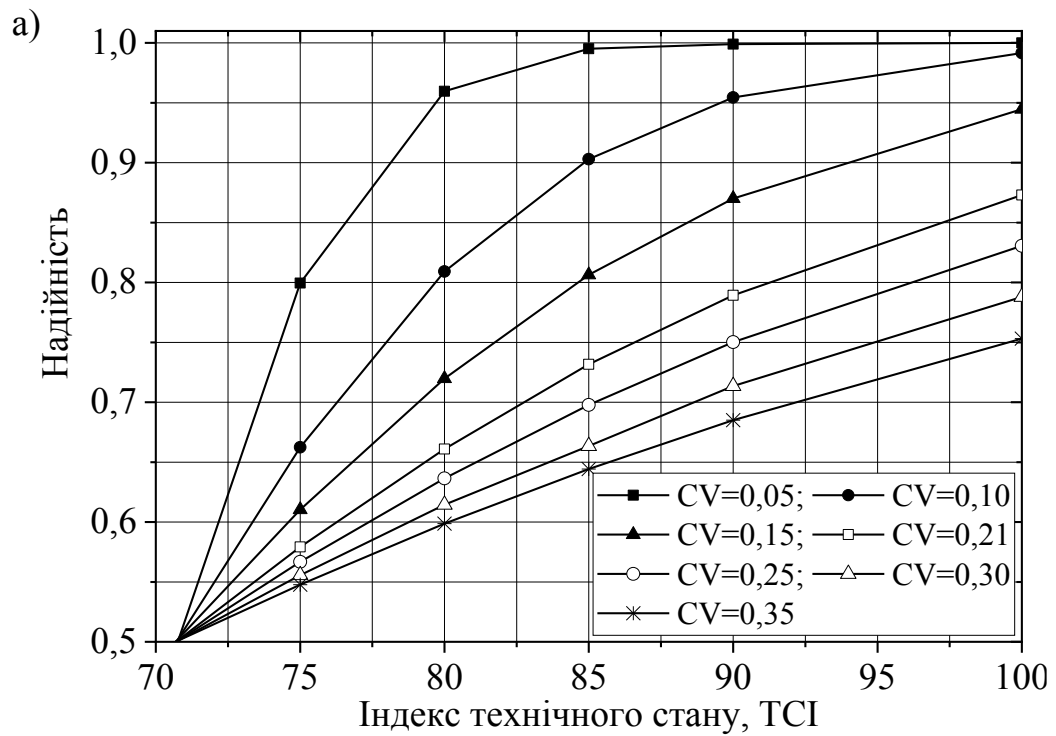


Рисунок 3.31 - Вплив коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на надійність: а) I-а, I-б категорія; б) II категорія

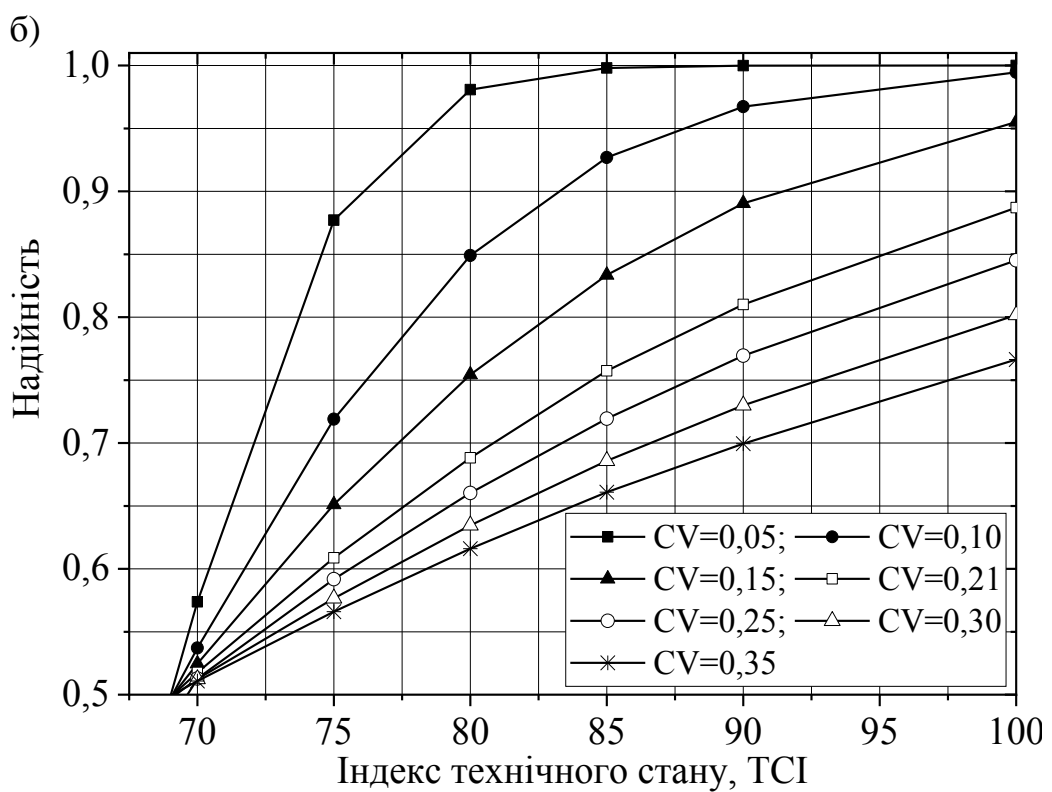
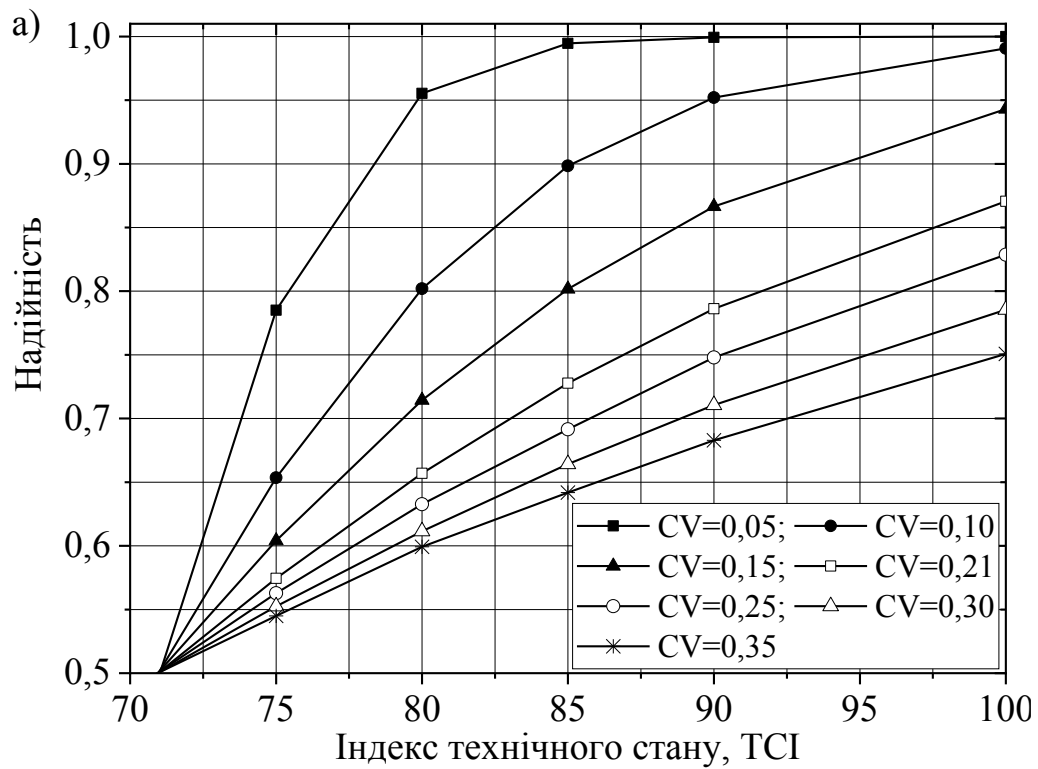


Рисунок 3.32 – Вплив коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на надійність: а) III категорія; б) IV категорія

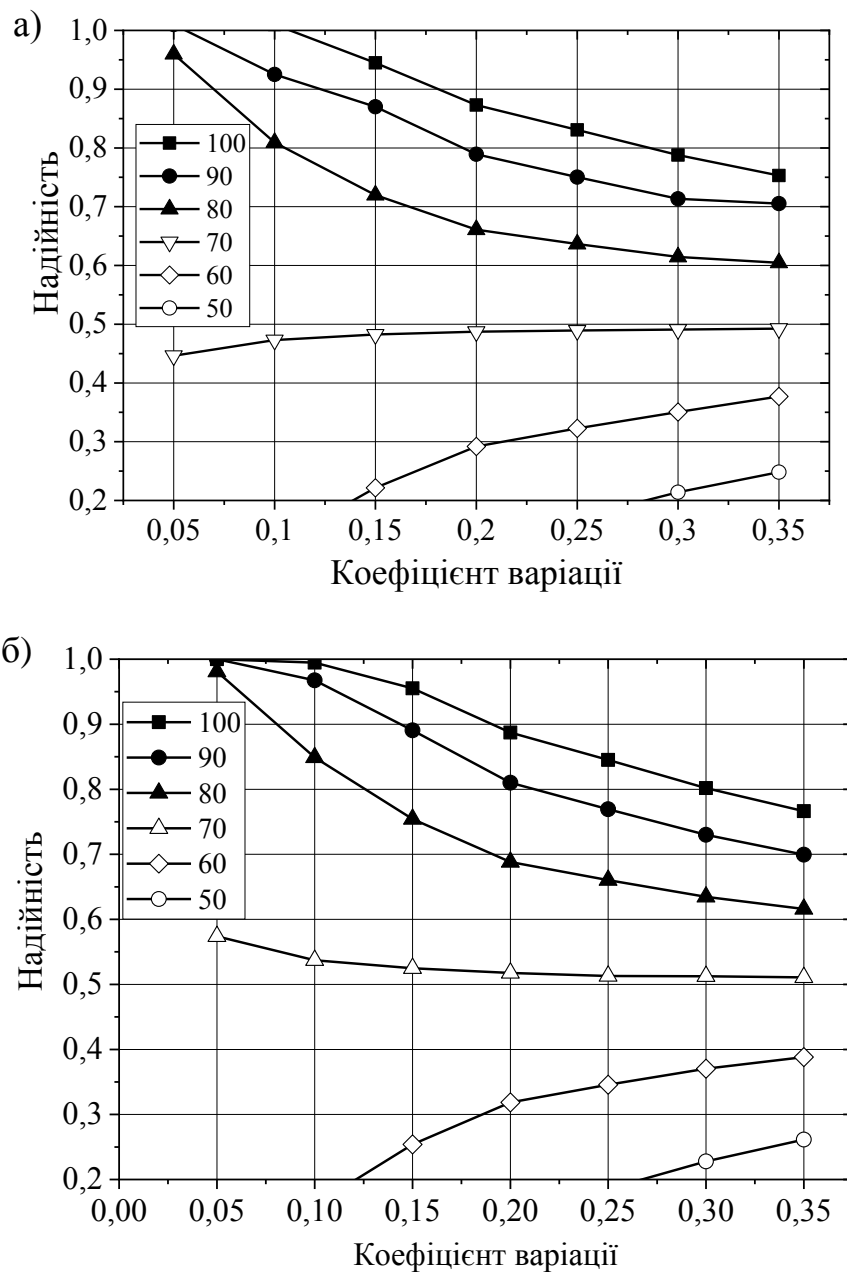


Рисунок 3.33 – Вплив коефіцієнту варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на надійність: а) I-а, I-б категория; б) IV категория. Цифри на графіку – індекс технічного стану

За умови ($\overline{TCS} \geq TCS_{cp}$) вибірка обмежується максимально можливим значенням індексу технічного стану конструкції $TCS_i = 100$ з відповідною надійністю $H = 1,0$, що призводить до зменшення надійності через збільшення кількості ділянок, індекс технічного стану яких відхиляється у бік менших значень відносно \overline{TCS} , що призводить до зменшення показника надійності (H).

За умови $\overline{TCl} < TCl_{ep}$ вибірка обмежується мінімально можливим значенням індексу технічного стану конструкції (TCl_{\min}), якому відповідає надійність $H=0,5$. Тоді збільшення коефіцієнту варіації призводить до збільшення кількості ділянок, індекс технічного стану яких відхиляється у бік більших значень відносно \overline{TCl} .

Таким чином, коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу можна вважати показником стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу, що визначається за результатами діагностики.

3.4.2.2 Перевірка адекватності моделі оцінювання стану дорожнього одягу за результатами діагностики

Оцінювання впливу коефіцієнту варіації індексу технічного стану на формування вибірки даних та перевірка адекватності моделі оцінювання стану дорожнього одягу за результатами діагностики проводилося на автомобільних дорогах загального користування. Дослідження проводилися у період з 2011 року по 2019 рік. Для дослідження обрані ділянки автомобільних доріг, що знаходяться у відмінному, доброму та задовільному стані згідно з [369] та характеризуються різним коефіцієнтом варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу:

а) автомобільна дорога М-03 Київ – Харків – Довжанський – стан задовільний;

б) автомобільна дорога М-18 Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта на ділянці у Сімферопольському районі АР Крим – стан добрий та відмінний;

в) автомобільна дорога Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка у Дніпропетровській області – стан відмінний.

Метою георадарного обстеження ділянок автомобільних доріг було отримання вихідних даних для оцінювання стану дорожнього одягу: визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, позиціонування прихованих тріщин у монолітних шарах покриття, оцінювання вологості

грунту. Георадарне зондування проводилося у поздовжньому напрямку із застосуванням георадарів різних модифікацій, що застосовувалися залежно від необхідної детальності обробки результатів георадарного зондування.

Індекс технічного стану визначався із застосуванням:

а) результатів георадарного зондування, що дозволило оцінити стан конструкції дорожнього одягу за критеріями опору розтягу при згині монолітних шарів дорожнього одягу, зсуву у шарах із незв'язаних матеріалів і грунтах земляного полотна методами чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу;

б) даних системи управління станом покриття (СУСП) з визначення загального еквівалентного модуля пружності конструкції дорожнього одягу на ділянці, що досліджується, що дозволило оцінити стан конструкції дорожнього одягу за критерієм допустимого пружного прогину.

Результати визначення індексу технічного стану конструкцій дорожнього одягу на ділянках автомобільних доріг наведено у додатку В.

За результатами діагностики отримано великі вибірки значень індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу, статистичні характеристики яких наведені у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Статистичні характеристики розподілу індексу технічного стану ділянок автомобільних доріг

Статистичні характеристики	Ділянка, що обстежується		
	М-03 Київ – Харків – Довжанський від км 396+000 до км 440+317	М-18 Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта від км 680+200 до км 685+200	Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка від км 0+150 до км 4+000
Кількість членів вибірки	49	137	44
Середнє	83,645	98,596	98,346
Дисперсія вибірки	45,341	10,837	28,341
Середньоквадратичне відхилення	6,733	3,291	5,323
Коефіцієнт варіації, %	8,05	3,34	5,41
Мінімальне значення	67,547	82,867	80,0469
Максимальне значення	95,2438	100	100

Для вибірок, що характеризуються значним середньоквадратичним відхиленням та значною неоднорідністю даних, потребує обґрунтування значення індексу технічного стану (\overline{TCS}), яке відповідає фактичному стану нежорсткого дорожнього одягу та може бути застосоване як інтегральна оцінка усїєї ділянки. Вирішення означеного завдання ґрунтується на припущенні, згідно з яким середнє арифметичне значення \overline{TCS} є достовірною оцінкою стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянці, якщо розподіл фактичних $TCS_{\phi i}$ наближується до теоретичного нормального розподілу TCS_{mi} , тобто \overline{TCS} максимально наближений до математичного очікування функції нормального розподілу. За результатами розрахунків отримано розподіл $TCS_{\phi i}$ на ділянках з різним коефіцієнтом варіації вихідних даних (від 7 % до 25 %) та індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (від 2 % до 8 %).

Розрахунок теоретичного розподілу проводився методом генерації випадкових чисел для нормального закону розподілу зі статистичними характеристиками, що отримані за результатами діагностики: стандартне відхилення індексу технічного стану конструкції (σ_{ϕ}), середньоарифметичне значення індексу технічного стану дорожнього одягу (\overline{TCS}).

Розподіл індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу ($TCS_{\phi i}$), що побудований за результатами діагностики дорожнього одягу автомобільних доріг загального користування, порівнювався з теоретичним розподілом індексу технічного стану, що отриманий методом генерації випадкових чисел для нормального закону розподілу (рис. 3.34 – 3.37) з метою встановлення однорідності вибірки.

Оскільки функції розподілу результатів діагностики не належать до визначеного параметричного розподілу, у дослідженні використано непараметричний критерій оцінювання однорідності вибірки – критерій Вилкоксона (Манна - Уїтні). Розрахунок статистики Вилкоксона ділянок автомобільних доріг наведений у додатку В.

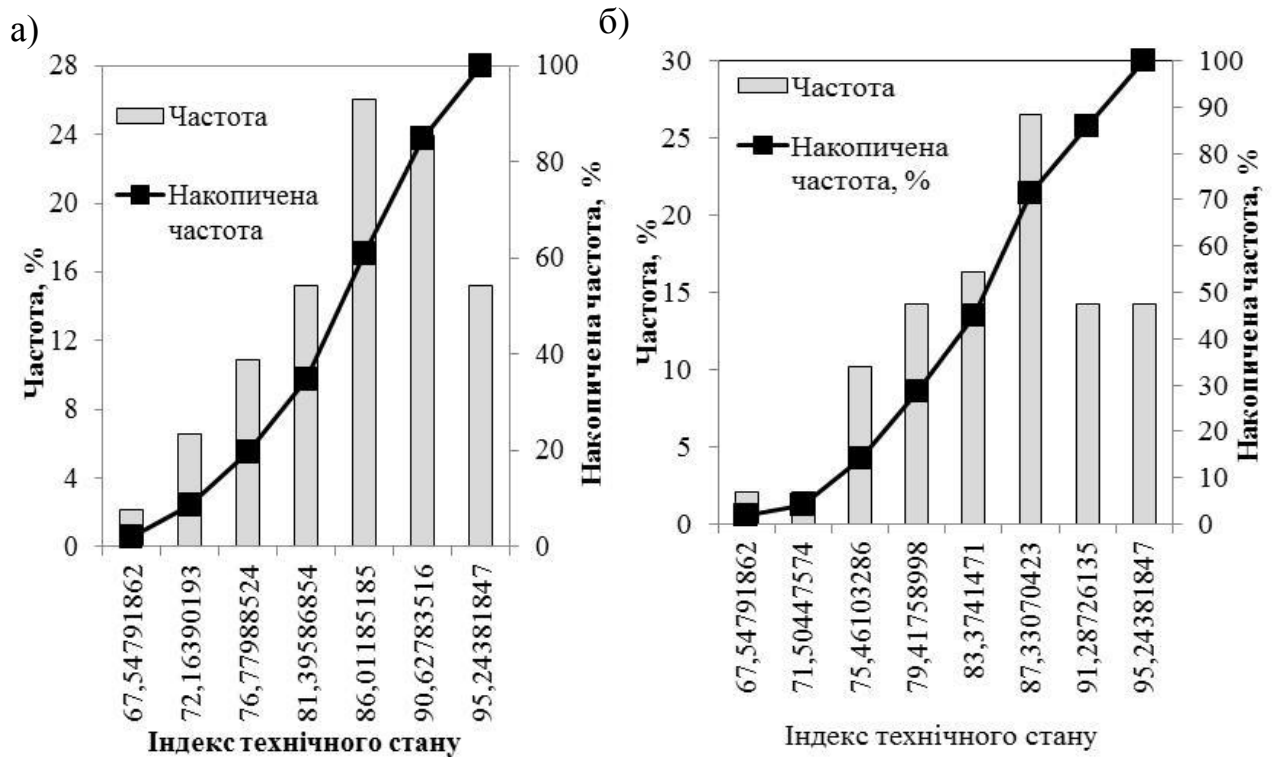


Рисунок 3.34 – Розподіл індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-03: а) фактичний; б) розрахунковий

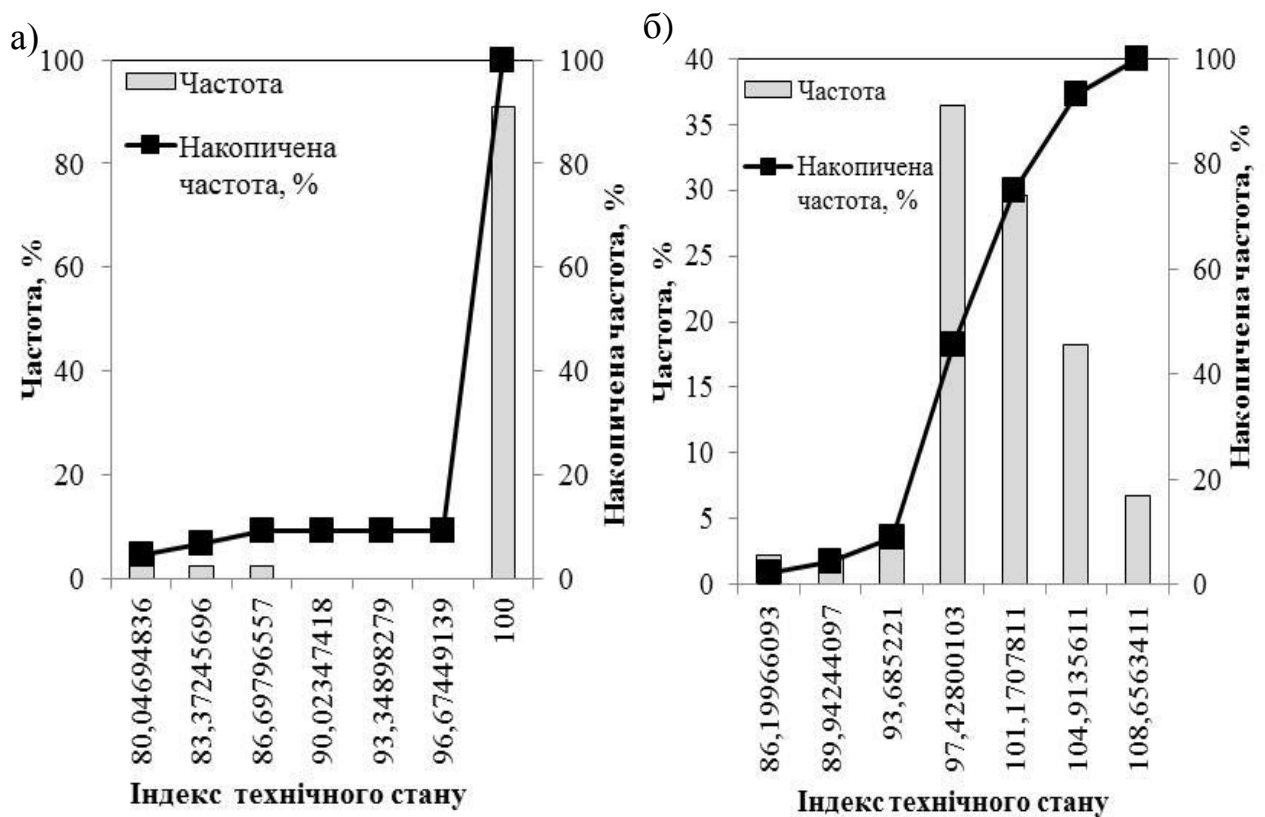


Рисунок 3.35 – Розподіл індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі Н-31: а) фактичний; б) розрахунковий

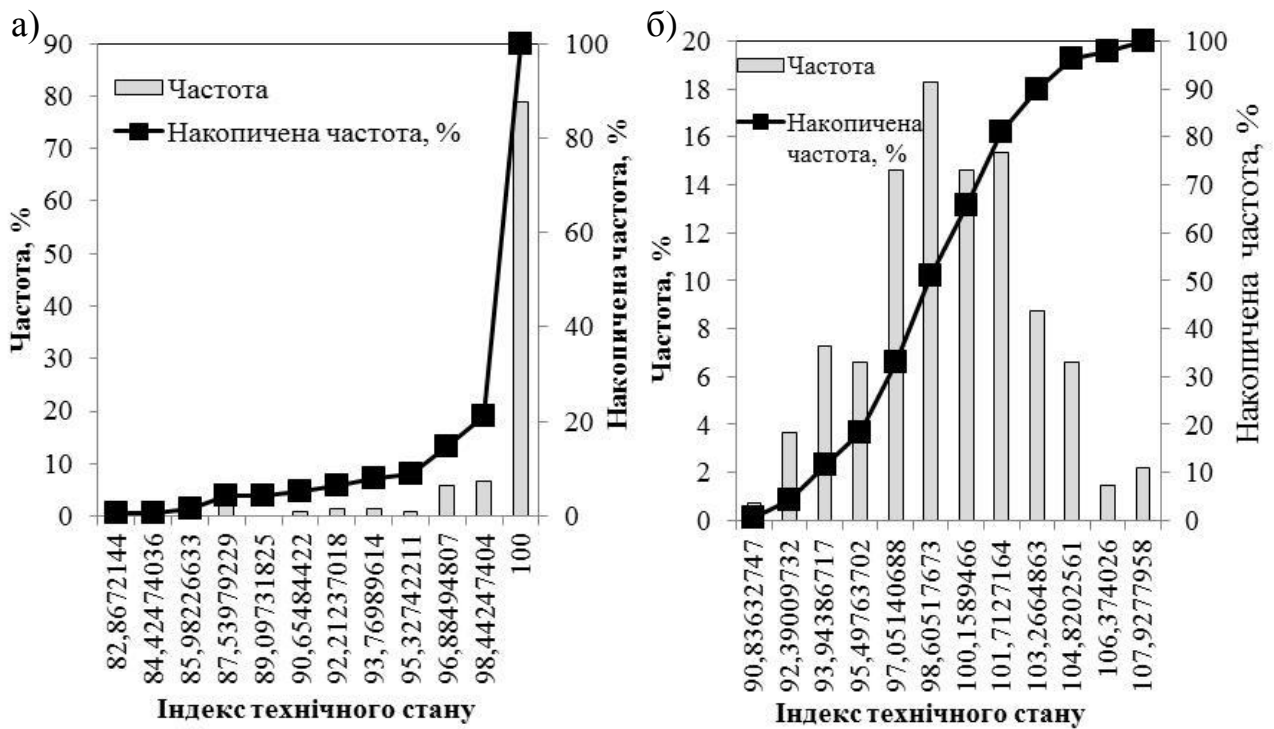


Рисунок 3.36 – Розподіл індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-18: а) фактичний; б) розрахунковий

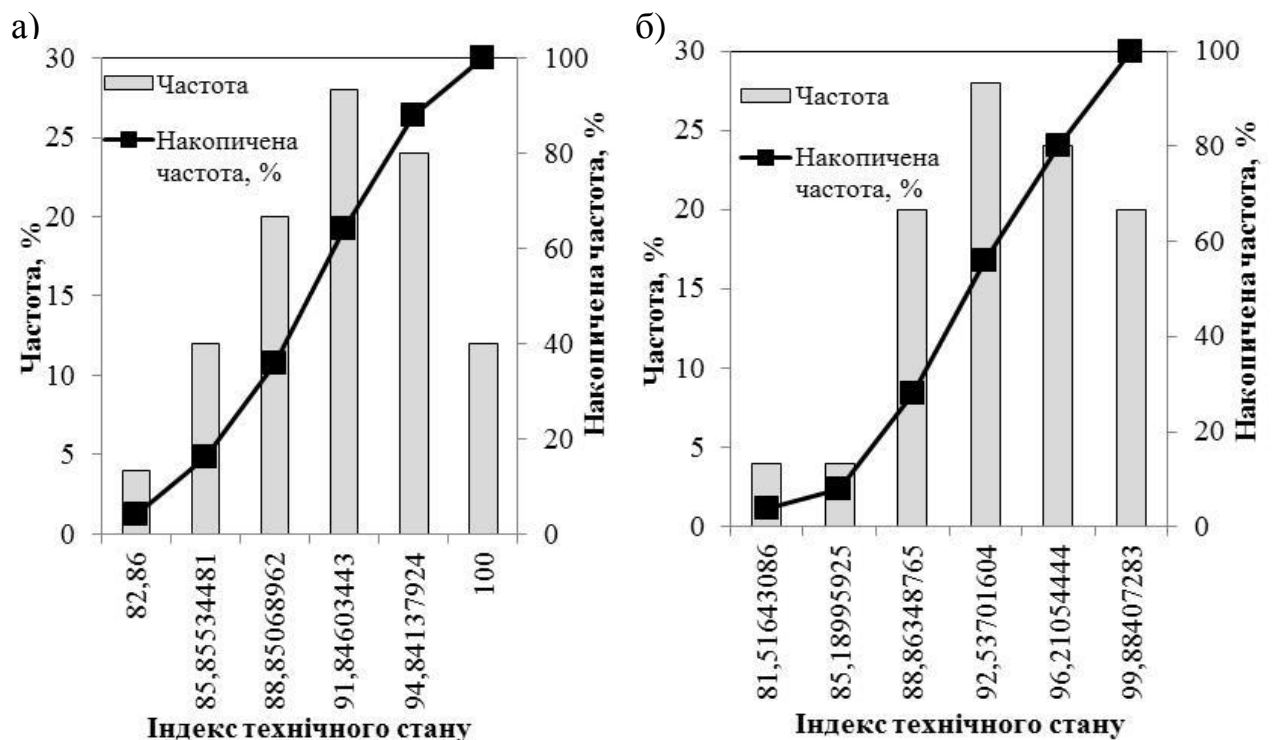


Рисунок 3.37 – Розподіл індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-18 за однорідною вибіркою: а) фактичний; б) розрахунковий

Рішення за критерієм Вилкоксона приймається за умови [372]:

а) гіпотеза однорідності функцій розподілу приймається на рівні значимості α , якщо $|T| \leq \Phi^{-1}(1 - 0,5 \cdot \alpha)$;

б) гіпотеза однорідності функцій розподілу відхиляється на рівні значимості α , якщо $|T| > \Phi^{-1}(1 - 0,5 \cdot \alpha)$.

Тут $|T|$ - модуль статистики Вилкоксона; α – рівень значимості, $\alpha = 0,05$; $\Phi^{-1}(1 - 0,5 \cdot \alpha) - 2$ квантиль порядку $(1 - 0,5 \cdot \alpha)$ нормального розподілу.

Розрахунок проводився для рівня значимості $\alpha = 0,05$. Значення модуля статистики Вилкоксона порівнювалося з $\Phi^{-1}(1 - 0,5 \cdot \alpha) = 1,96$.

За результатами розрахунку встановлено:

а) вибірка індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-03 Київ – Харків – Довжанський (рис. 3.34) є однорідною з рівнем значимості $\alpha = 0,05$, оскільки $|T| = 0,792 < 1,96$;

б) вибірка оцінок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка (рис. 3.35) є неоднорідною з рівнем значимості $\alpha = 0,05$, оскільки $|T| = 2,018 > 1,96$;

в) вибірка оцінок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-18 Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта (рис. 3.36) є неоднорідною з рівнем значимості $\alpha = 0,05$, оскільки $|T| = 1,991 > 1,96$;

г) неоднорідні вибірки не можуть застосовуватися для інтегральної оцінки стану ділянки автомобільної дороги. Ділянки, на яких не виконується умова однорідності вибірки, були розділені на секції, у межах яких виконуються умови:

1) кількість елементів вибірки забезпечує задану достовірність за фактичного стандартного відхилення (σ_{TCI}) індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу;

2) довірчий інтервал (P) індексу технічного стану дорожнього одягу відповідає $P=0,95$ за критерієм Стьюдента (t_{cm}).

На рисунку 3.37 наведено розподіл індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-18 за скорегованою вибіркою, що містить 25 елементів. Вибірка є однорідною з рівнем значимості $\alpha=0,05$ за критерієм Вилкоксона, оскільки виконується умова $|T|=0,591 < 1,96$.

Коригування вибірки, що отримана за результатами вимірювань на автомобільній дорозі Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка призвело до формування двох вибірок. Перша вибірка містить сто тридцять два елементи з оцінкою за індексом технічного стану $TCI=100$, тому середнє значення та математичне очікування індексу технічного стану на ділянці однакові. Друга вибірка містить чотири окремих елементи з оцінкою за індексом технічного стану в діапазоні від $TCI_{\min}=80,047$ до $TCI_{\max}=84,742$.

До другої вибірки недоцільно застосовувати методи математичної статистики, тому кожен елемент може розглядатися як окрема локальна оцінка у точці вимірювань. Результати обстеження підтверджують даний висновок, оскільки зміна індексу технічного стану на окремих пікетах автомобільної дороги Н-31 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка пов'язана із наявністю прихованих тріщин у шарах конструкції дорожнього одягу.

Отримані результати удосконалюють методи оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу на етапі інженерних передпроектних вишукувань, що дозволяє вирішувати задачі розроблення проєктів капітального ремонту дорожнього одягу, призначення ремонтних робіт, раціонального планування та розподілу фінансових і матеріальних ресурсів.

3.5 Висновки по розділу

У розділі вирішені задачі дисертаційного дослідження:

а) експериментально досліджено закономірності змінювання НДС

конструкції дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів від параметрів розрахункового навантаження, геометричних параметрів прихованих тріщин, деформаційних параметрів матеріалів конструктивних шарів дорожнього одягу;

б) встановлено зв'язок між показниками неоднорідності конструкції дорожнього одягу, що визначаються за результатами георадарної діагностики і чисельного моделювання, та індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу та його граничними значеннями;

в) підтверджено адекватність теоретичних моделей та методик георадарної діагностики дорожнього одягу з метою пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи за допомогою лабораторних експериментів та польових випробувань на автомобільних дорогах загального користування.

1. За результатами експериментальних досліджень розроблено схему зондування дорожнього одягу та обробки сигналів георадару під час вирішення завдання дефектоскопії, обґрунтовано параметри георадарної зйомки та встановлено основні вимоги до георадарного зондування:

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° становить $\Delta = 0,01$ м під час вирішення завдання пошуку і позиціонування тріщин, та $\Delta = 0,05$ м у завданнях визначення геометричних параметрів тріщин.

2. Підтверджено адекватність моделей пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи з монолітних матеріалів. 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.

3. За результатами чисельного моделювання НДС конструкції дорожнього одягу обґрунтовано параметри моделі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу та доведено:

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;

б) на відміну від наскрізних тріщин тип прихованих тріщин (одиначна або Т-подібна) не виявляє суттєвого впливу на НДС конструкції дорожнього одягу, тому розрахунок НДС доцільно проводити для одиначної тріщини за умови несиметричного прикладання навантаження відносно тріщини, вплив якого зростає зі збільшенням модулю пружності матеріалу шару 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 штамп, рівновеликого відбитку колеса для відповідної групи розрахункового навантаження.

4. Удосконалено підходи до розрахунку дорожнього одягу з наскрізними тріщинами у покритті за критеріями міцності:

а) зменшенням фактичної товщини шару з тріщиною від 5,5 % до 8 % залежно від відносної вологості ґрунту;

б) зменшенням граничного напруження зсуву у шарах з незв'язаних

матеріалів у 2,4 – 2,6 рази залежно від вологості ґрунту та джерел зволоження;

в) зменшенням граничного напруження зсуву у ґрунті земляного полотна в 1,1 - 1,6 рази залежно від відносної вологості ґрунту та джерел зволоження.

5. Визначено граничні значення коефіцієнту варіації (CV_{sp}) та індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (TCI_{sp}) для автомобільних доріг різних категорій, що спираються на положення теорії надійності, теорії ризику та вимоги нормативних документів та дозволяють оцінити стан нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики і визначити надійність за заданим або встановленим за результатами діагностики коефіцієнтом варіації та індексом технічного стану.

6. Підтверджено адекватність моделі оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами георадарної діагностики шляхом:

а) формування великої вибірки фактичних значень індексу технічного стану дорожнього одягу з коефіцієнтом варіації вихідних даних від 7 % до 25 % і коефіцієнтом варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу від 2 % до 8 % та встановлення однорідності вибірки за непараметричним критерієм Вилкоксона (Манна-Уїтні) за рівня значимості $\alpha=0,05$;

б) зіставленням розподілу фактичних значень індексу технічного стану, що визначений за результатами діагностики, з теоретичним розподілом функції індексу технічного стану, що отриманий методом генерації випадкових чисел для нормального закону розподілу.

7. Експериментальні дослідження дозволили підтвердити теоретичні положення другого розділу дисертації 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 дорожнього одягу з тріщинами у шарах з монолітних матеріалів.

Основні результати досліджень третього розділу висвітлено у роботах автора: [65, 66, 307, 308, 373].

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Методика пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу

За результатами аналізу та узагальнення математичних моделей розповсюдження сигналу, відбитого від неоднорідностей та границь порушень суцільності шарів з монолітних матеріалів у конструкції нежорсткого дорожнього одягу, розроблено алгоритми пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах покриття та основи, адекватність та відтворюваність яких підтверджено експериментальними дослідженнями.

Науково обґрунтовано порядок обробки результатів георадарного зондування дорожнього одягу з метою позиціонування прихованих тріщин, визначення діелектричної проникності шару покриття над тріщиною, визначення глибини розташування та оцінки геометричних параметрів тріщин.

Відпрацьовано методику георадарного обстеження автомобільних доріг під час вирішення завдання дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу.

Узагальнення результатів попередніх етапів дослідження, дозволило розробити методику пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, яка складається з [268]:

а) етапу збору вихідних даних: вибір антенного блоку та налаштувань георадару; вибір еталонної ділянки та отримання еталонних сигналів георадару, що застосовуються для подальшої обробки радарограм;

б) етапу зондування дорожнього одягу з метою формування часового розподілу сигналів за глибиною;

в) етапу первинної обробки радарограм з метою пошуку прихованих тріщин у програмі GPR Proview;

г) етапу оброблення імпульсних сигналів георадару в програмі GeoVizy-2

з метою ідентифікації прихованих тріщин – визначення положення тріщини за глибиною, її геометричних параметрів.

На першому етапі на підставі інформації про ділянку дослідження, необхідної детальності та точності вимірювань визначаються [258, 374, 375]:

а) тип антенного блоку та його положення відносно поверхні покриття (п. 3.2.2.1);

б) швидкість переміщення антенних блоків (табл. 3.2);

в) апаратні налаштування георадару: кількість накопичень сигналу, посилення, тощо (табл. 3.2).

г) визначення еталонної ділянки із застосуванням бістатичної щілинної антени (рис. 3.1 г). Під еталонною ділянкою розуміється ділянка дороги завширшки понад 0,7 м та завдовжки не менше ніж 0,7 м, яка не містить прихованих тріщин;

д) запис еталонних сигналів, що використовуються під час обробки радарограм:

1) від бістатичної щілинної антени для позиціонування прихованих тріщин – визначення їх лінійних розмірів у плані;

2) від дипольної антени для пошуку та ідентифікації прихованих тріщин.

Визначення еталонної ділянки дороги виконується в такому порядку:

а) обирається ділянка покриття, яка за візуальною оцінкою не містить деформацій та руйнувань [369], завширшки понад 2,0 м та завдовжки не менше ніж 3,0 м;

б) виконується запис георадарного профілю за різних положень антенного блоку – поворот навколо вертикальної осі (рис. 3.10) для реєстрації крос-поляризаційного сигналу у разі наявності прихованих деполіризуючих об'єктів.

Ознакою еталонної ділянки є незмінність радарограми під час переміщення та повороту навколо вертикальної осі бістатичної щілинної антени (рис. 3.1 г). Якщо еталонну ділянку не виявлено, обирається інша ділянка та операція повторюється до встановлення ділянки без прихованих тріщин.

Виконують запис еталонних сигналів згідно з [243, 351]: сигналу прямого проходження; сигналу від листа металу; сигналу від поверхні покриття.

Еталонні сигнали використовуються під час первинної обробки та інтерпретації радарограм згідно з [268].

На другому етапі зондування дорожнього одягу з метою пошуку прихованих тріщин у шарах покриття та шарах основи проводиться з дотриманням основних вимог:

а) відстань між трасами зондування георадіолокаційного профілю повинна бути однаковою, тобто георадіолокаційне зондування повинне координуватися за допомогою датчика переміщень антенних блоків георадара;

б) крок між трасами зондування не повинен перевищувати 0,05 м, або розраховується згідно з [258];

в) прив'язка точок початку та кінця георадарної зйомки на місцевості здійснюється до кілометрових знаків або пікетів згідно технічного паспорта дороги, а за їх відсутності – до місцевих орієнтирів.

Зондування дорожнього одягу проводиться у повздовжньому та у поперечному напрямках.

Третій етап передбачає візуалізацію та первинну обробку георадіолокаційного профілю у програмі GPR Proview:

а) визначення інтервалів запису для подальшої обробки згідно з [376].

б) пошук гіперболічних відбиттів на радарограмі, що отримана зондуванням дипольної антени, у вигляді яскравісного Z-профілю та їх аналіз (п. 2.2.2) згідно з [268];

в) визначення відліку сигналу, який відповідає відбиттю від ділянки з прихованою тріщиною;

г) аналіз радарограми, що отримана зондуванням бістатичною антеною, яка реєструє крос-поляризаційну компоненту сигналу, що утворюється під час відбиття від деполаризуючого об'єкту – тріщини [377].

Порядок операцій під час реалізації третього етапу визначений у нормативних документах [258, 268, 376] та Патентах України [377], що

розроблені за результатами дисертаційного дослідження.

На четвертому етапі здійснюється інтерпретація радарограм, що отримані за допомогою блоку дипольних антен та бістатичної щілинної антени. Інтерпретація спрямована на позиціонування, визначення глибини розташування та лінійних розмірів прихованих тріщин.

Інтерпретація радарограм здійснюється із застосуванням програми GeoVisy-2, що реалізує алгоритм пошарового визначення діелектричної проникності матеріалів шарів дорожнього одягу [243] та запропонований алгоритм обробки імпульсних сигналів під час вирішення задач пошуку, позиціонування та ідентифікації тріщин (п. 2.2.3):

а) за результатами аналізу амплітуди крос-поляризаційних сигналів, що отримані за допомогою бістатичної щілинної антени за різних кутів між вектором напруженості електричного поля антени та тріщини (рис. 3.10), визначають напрямок тріщини, якій ортогональний положенню антени (вектору напруженості електричного поля антени), за якого реєструється сигнал з максимальною амплітудою;

б) розраховується діелектрична проникність шару покриття над тріщиною та товщина шару (2.4 – 2.7), що відповідає верхній гранці тріщини (рис. 2.4 а);

в) визначається діелектрична проникність та товщина шару з тріщиною (2.4 – 2.7), що відповідає нижній гранці тріщини (рис. 2.4 б);

г) визначається ширина тріщини шляхом порівняльного аналізу сигналу від ділянки з набором модельних сигналів від різних тріщин. Алгоритм аналізу сигналів базується на мінімізації відмінностей між амплітудою модельного сигналу та сигналу, що ідентифікується [268]. Ширину розкриття тріщини приймають рівною ширині тріщини модельної радарограми.

Слід зазначити, що тріщини є слабо контрастними об'єктами, тому їх позиціонування та ідентифікація потребують від оператора високої кваліфікації та певного досвіду роботи з георадарним обладнанням.

4.2 Методика оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики

Методика оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики складається з декількох етапів:

а) отримання вихідної інформації;

б) оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу (п. 2.3, п. 3.3) з метою визначення параметрів, що визначають міцність конструкції за трьома граничними станами відповідно до [73];

в) оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за індексом технічного стану та коефіцієнтом надійності (п. 2.4, п. 3.4).

Перший етап передбачає отримання вихідної інформації:

а) про ділянку автомобільної дороги, що досліджується:

1) категорія автомобільної дороги визначається за проектними або паспортними даними. За категорією автомобільної дороги призначається тип та параметри розрахункового навантаження [94];

2) інтенсивність та склад транспортного потоку визначається за даними натурних спостережень згідно з [378], що дозволяє визначити потрібний модуль пружності конструкції дорожнього одягу відповідно до [73];

3) строк служби дорожнього одягу після капітального ремонту, що визначається за даними експлуатаційної служби;

б) про конструкцію дорожнього одягу:

1) вид матеріалів шарів дорожнього одягу визначається за паспортними даними автомобільної дороги, або за результатами відбору кернів з конструкції дорожнього одягу згідно з [94, 364];

2) товщина конструктивних шарів дорожнього одягу визначається за результатами георадарного зондування згідно з [258];

3) деформаційні та міцнісні характеристики матеріалів, що визначаються за результатами лабораторних випробувань [204] або довідковими даними [379];

4) наявність прихованих та наскрізних тріщин та геометричні параметри тріщин у шарах дорожнього одягу, що визначаються за результатами георадарного зондування згідно з (п. 2.2, п. 3.2);

5) вид ґрунту земляного полотна згідно з [204] та його вологість, що визначається за результатами георадарного зондування [351], даними лабораторних вимірювань або згідно з [73];

б) деформаційні та міцнісні характеристики ґрунту земляного полотна визначаються за результатами георадарного зондування [351] або згідно з [379].

Вихідні дані, що отримані на першому етапі, застосовуються на другому етапі оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу (п. 2.3, п. 3.3) з метою визначення параметрів, що визначають міцність конструкції за трьома граничними станами. Другий етап з оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу передбачає:

а) розроблення скінченно-елементних моделей для розрахунку НДС конструкції дорожнього одягу відповідно до (п. 2.3.3, п. 2.34);

б) оцінювання НДС конструкції дорожнього одягу (п. 2.3, п. 3.3) з метою визначення:

1) прогину на поверхні покриття під розрахунковим навантаженням, що дозволяє визначити загальний еквівалентний модуль пружності конструкції дорожнього одягу (2.31), коефіцієнт впливу тріщин на циліндричну жорсткість плити (2.43), коефіцієнт запасу міцності за допустимим пружним прогином (2.30);

2) головних напружень, які дозволяють визначити активне напруження зсуву у ґрунтах та шарах з незв'язаних матеріалів (2.37), коефіцієнт інтенсивності напружень (2.46). Допустиме напруження зсуву у ґрунтах земляного полотна та шарах з незв'язаних матеріалів та коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву у ґрунтах земляного полотна та шарах з незв'язаних матеріалів (2.36) визначається згідно з [73];

3) напружень розтягу у монолітних шарах покриття, що визначають коефіцієнт запасу міцності за опором розтягу при згині (2.39), під час

розрахунку якого залишкову міцність матеріалу монолітного шару після кількості прикладань розрахункового навантаження визначають за (2.40);

в) за умови оцінювання міцності конструкції дорожнього одягу з прихованими тріщинами згідно з [73], враховують вплив тріщин через:

1) приведення фактичної товщини шару з тріщинами до еквівалентної товщини шару без тріщин за формулою (2.42);

2) зменшення граничного напруження зсуву у ґрунтах земляного полотна та шарах з незв'язаних матеріалів згідно з формулою (2.46, 2.48).

Третій етап з оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за індексом технічного стану та коефіцієнтом надійності містить у собі:

а) розрахунок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу у точках вимірювань за (2.41) та отримання фактичної вибірки значень індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на ділянці, що досліджується;

б) розрахунок статистичних характеристик фактичного розподілу індексу технічного стану: стандартного відхилення індексу технічного стану конструкції (σ_ϕ), середньоарифметичного значення індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (\overline{TCI});

в) розрахунок теоретичного розподілу індексу технічного стану конструкції методом генерації випадкових чисел для нормального закону розподілу зі статистичними характеристиками, що отримані за результатами діагностики ($\sigma_\phi, \overline{TCI}$);

г) оцінювання однорідності вибірки за критерієм Вилкоксона, що виконується у такому порядку:

1) розраховується статистика Вилкоксона, яка дорівнює сумі рангів елементів вибірки фактичних значень індексу технічного стану дорожнього одягу (T);

2) здійснюється перевірка умови [372]:

– якщо $|T| \leq \Phi^{-1}(1 - 0,5 \cdot \alpha) = 1,96$, гіпотеза однорідності функцій розподілу приймається на рівні значимості $\alpha = 0,05$;

– якщо $|T| > \Phi^{-1}(1 - 0,5 \cdot \alpha) = 1,96$, гіпотеза однорідності функцій розподілу відхиляється на рівні значимості $\alpha = 0,05$;

д) оцінювання ділянки за індексом технічного стану конструкції дорожнього одягу:

1) якщо виконується умова однорідності вибірки:

– середньоарифметичне значення індексу технічного стану дорожнього одягу (2.64) \overline{TCl} є достовірною оцінкою стану дорожнього одягу на ділянці та застосовується як інтегральна оцінка усієї ділянки;

– розраховується коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу на ділянці (2.65);

2) якщо не виконується умова однорідності вибірки, ділянку, що досліджується, поділяють на секції (k), у межах яких виконуються умови:

– кількість елементів вибірки (оцінок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу) забезпечує задану достовірність за фактичного стандартного відхилення (σ_{TClk}) оцінок індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу;

– довірчий інтервал (P) оцінок індексу технічного стану дорожнього одягу відповідає $P = 0,95$ за критерієм Стюдента (t_{cm}).

Для перевірки умов визначають довірчий інтервал за критерієм Стюдента (t_{cm}) для малої вибірки з n елементів за умови, що погрішність розрахунку середнього значення індексу технічного стану у k -й секції знаходиться у межах $\pm \mu_k^{cm}$ ($\mu_k^{cm} = 0,1 \overline{TCl}_{ik}$):

$$t_{cm} = \frac{\mu_k^{cm} \cdot \sqrt{n}}{\sigma_{TClk}}. \quad (4.1)$$

За величиною (t_{cm}) і (n) визначають довірчий інтервал [368]. Допустимим є довірчий інтервал $P = 0,95$.

Якщо $P < 0,95$, розраховують мінімальну кількість елементів вибірки, що

гарантує достовірність за заданій погрішності вимірювань

$$n_{\min} = \frac{\sigma_{TCIk}^2 \cdot 1,65^2}{\mu_k^{cm^2}}, \quad (4.2)$$

визначають середньоквадратичне відхилення σ_{TCIk} для n_{\min} кількості елементів вибірки та розраховують довірчий інтервал:

$$\mu_k^{cm} = \frac{\sigma_{TCIk}}{\sqrt{n_{\min}}} \cdot t_{cm}; \quad (4.3)$$

$$TCI_{ik} = \overline{TCI}_k \pm \mu_k^{cm}, \quad (4.4)$$

де t_{cm} – критерій Стюдента для кількості елементів n_{\min} за довірчої імовірністю $P=0,95$;

TCI_{ik} – дійсні значення i -го елемента в k -й секції;

– оцінюється однорідність вибірки за критерієм Вилкоксона згідно з п. г);

– визначається середньоарифметичне значення індексу технічного стану дорожнього одягу (2.60) \overline{TCI} , що є достовірною інтегральною оцінкою секції ділянки, що досліджується;

– розраховується коефіцієнт варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу (2.59) у секції ділянки, що досліджується;

е) визначення надійності конструкції дорожнього одягу на ділянці (секції) дороги, що досліджується, за номограмою (рис. 3.31 – 3.32) залежно від категорії автомобільної дороги та коефіцієнта варіації індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу;

ж) оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики (табл. 3.15).

Схему методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики наведено на рисунку 4.1.

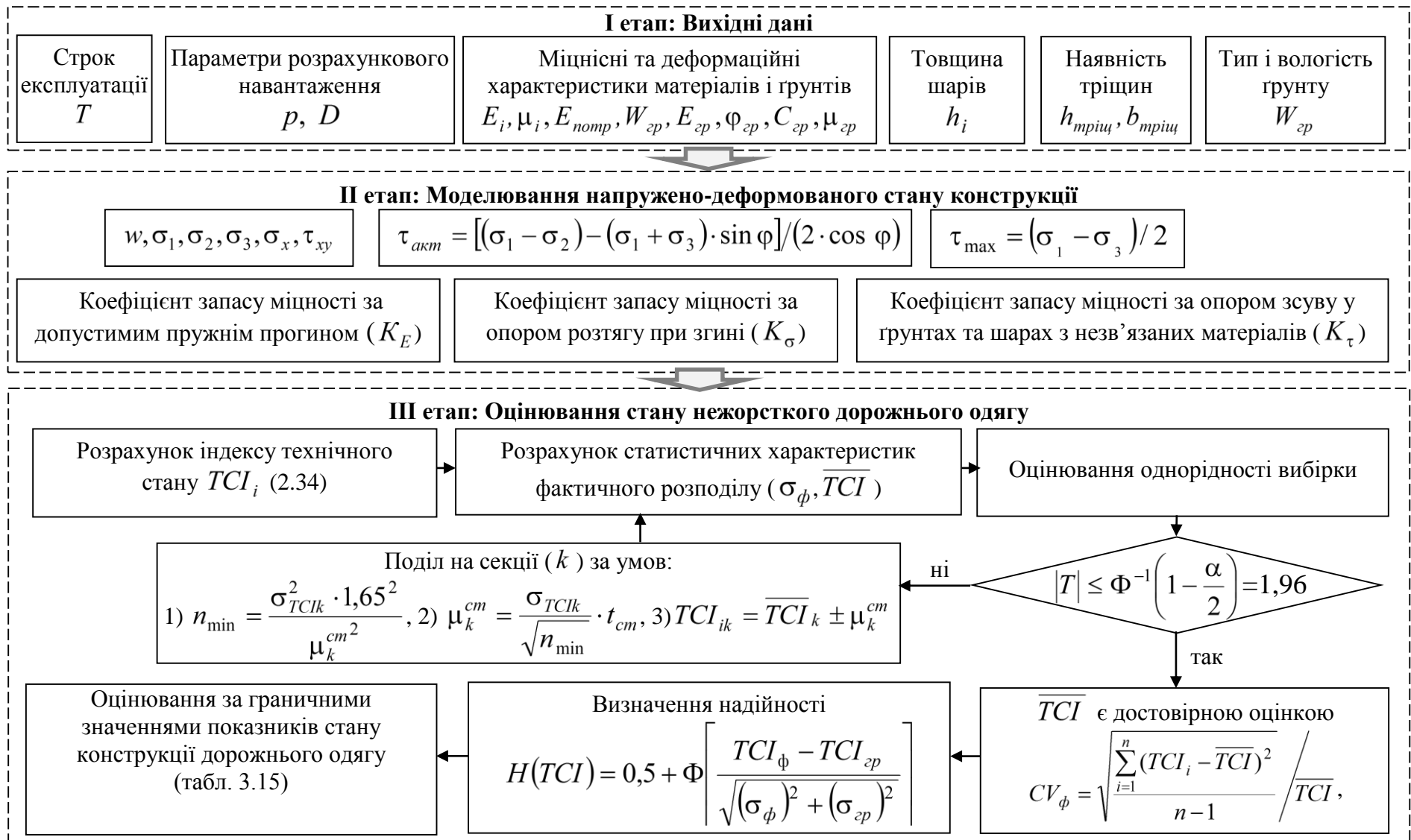


Рисунок 4.1 – Схема методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики

4.3 Економічна ефективність впровадження результатів дисертаційного дослідження

4.3.1 Економічна ефективність застосування методу георадарного зондування дорожнього одягу під час вирішення завдань дефектоскопії

Розрахунок економічної ефективності методу георадарного зондування нежорсткого дорожнього одягу під час вирішення завдань пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах дорожнього одягу проводився за методикою, що розроблена в [243], основу якої становить визначення різниці між вартістю вишукувальних робіт із застосуванням неруйнівного георадіолокаційного методу та вартістю робіт з відбору кернів з конструкції дорожнього одягу з метою визначення товщини шарів дорожнього одягу та наявності прихованих руйнувань (тріщин) у шарах з монолітних матеріалів.

Норми витрат на проведення неруйнівної діагностики за допомогою георадару приймалися за розрахунком, основу якого склали дані хронометражу на обстеження 1 км ділянки автомобільної дороги та вартість людино-часу оператора, що виконує георадарне обстеження. Норми витрат часу на відбір кернів з конструкції дорожнього одягу та амортизацію обладнання прийняті відповідно до СОУ 42.1-37641918-081:2017 [380], СОУ 42.1-37641918-071:2018 [381], СОУ 42.1-37641918-035:2018 [382]. Збільшення вартості обладнання за роками враховувалося через індекс інфляції, що визначений Національним банком України станом на 01.01.2020 року у розмірі 112 % та додатком до листа Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 18.07.2018 р. № 7/15-7265 «Щодо індексів зміни вартості будівельних робіт».

Розрахунок витрат на діагностику дорожнього одягу методом відбору кернів із конструкції наведений у таблиці 4.1. Розрахунок витрат на георадарну діагностику дорожнього одягу наведений у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Витрати на одиничне вимірювання руйнівним методом відбору кернів з конструкції дорожнього одягу

Найменування операції	Склад робіт	Джерело даних	Найменування елементів витрат	Од. вимірювання	Кількість	Вартість од. вимір., грн.	Загальна вартість, грн.
Відбір зразків з асфальтобетонного покриття згідно з ДСТУ Б В.2.7-319	1 Підготовка приладу до відбору зразка. 2 Проведення відбору проби зразка. 3 Оформлення протоколу відбору.	СОУ 42.1-37641918-081 норма. 14.15	Витрати праці (розряд робіт)	люд.-год.	1,67 (7,1)	87,84	146,69
			Лабораторне начіпне устаткування з відбору кернів	маш.-год.	0,65	96,36	62,64
Вимірювання параметрів тріщин та товщини шарів	Вимірювання параметрів за зразком керну.	Хронометраж	Витрати праці (розряд робіт)	люд.-год.	0,05 (7,1)	87,84	4,39
Відновлення конструкції у місці відбору зразку	Закладання місць вирубування асфальтобетонною сумішшю вручну	СОУ 42.1-37641918-035 норма. 2-41	Витрати праці (розряд робіт)	люд.-год.	0,87 (3,8)	42,72	37,17
			Матеріали асфальтобетон	т	0,0105	1965	17,80
Переміщення працівників на автомобілі	Переміщення працівників на автомобілі	СОУ 42.1-37641918-071 норма 810-14-1	Витрати праці (розряд робіт)	люд.-год.	0,02 (7,1)	87,84	1,76
			Витрати праці машиністів (розряд робіт)	люд.-год.	0,02 (5,1)	65,35	1,31
		Середні показники вартості експлуатації	Автомобілі бортові вантажопідійомністю до 3 т	маш.-год.	0,02	428,97	8,58

Всього: 280,34 грн.

Таблиця 4.2 – Витрати на георадарне зондування конструкції дорожнього одягу

Найменування операції	Склад робіт	Джерело даних	Найменування елементів витрат	Од. вимірювання	Кількість	Вартість од. вимір., грн.	Загальна вартість, грн.
Пошук, позиціонування та ідентифікація прихованих тріщин	Підготовка до роботи апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ». Георадарне зондування конструкції. Обробка результатів, складання протоколу.	Хронометраж розрахунок	Витрати праці (розряд робіт)	люд.-год.	1,4 (0,71)	87,84	122,98
			Георадарний комплекс	маш.-год.	0,7	40,00	28,00

Всього 150,98 грн./км

Згідно ДБН А.2.1-1-2008 [383] мінімальна кількість зразків, які отримують методом відбору кернів з конструкції дорожнього одягу під час інженерних вишукувань становить три зразки на один кілометр. Тоді вартість робіт з відбору кернів з конструкції дорожнього одягу руйнівним методом на 1 км автомобільної дороги становить $280,34 \cdot 3 = 841,02$ грн./км.

Економічний ефект від застосування методу георадарної діагностики нежорсткого дорожнього одягу визначається за формулою:

$$E = S_2 - S_1, \quad (4.5)$$

де S_2, S_1 – відповідно вартість відбору зразків руйнівним методом та вартість георадарного обстеження, грн./км.

$$E = 841,02 - 150,98 = 690,04 \text{ грн./км}$$

Економічний ефект від застосування методу георадарної діагностики залежить від обсягів обстеження та вартості георадарного обладнання. Капіталовкладення у розроблення, виготовлення, метрологічну атестацію

апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ» становлять 200000 грн. на один прилад. Економічний ефект від застосування методу георадарної діагностики визначається за формулою:

$$E = (S_2 - S_1) - K \times E_n, \quad (4.6)$$

де S_2, S_1 – відповідно вартість відбору зразків руйнівним методом та вартість георадарного обстеження, грн./км.;

K – капіталовкладення у апаратний вимірювальний комплекс «ОДЯГ», грн.;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень у будівництві ($E_n = 0,12$).

Якщо обсяг обстежень, що проводяться, становить 100 км автомобільних доріг на рік, економічний ефект, що очікується від впровадження методу георадарної діагностики автомобільних доріг, становить:

$$E = (84102 - 15098) - 200000 \cdot 0,12 = 45004 \text{ грн./рік.}$$

Розроблення, налагодження та тестування георадару окупається за один рік та є економічно ефективним за умови обстеження 35 км автомобільних доріг за рік: $E = 151,40$ грн./рік.

Продуктивність георадару визначається характером завдань, детальністю обстеження та технічними можливостями апаратного вимірювального комплексу. Розрахунок доводить, що застосування георадарного зондування для вирішення задач діагностики, в тому числі задач дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу економічно ефективно.

Ефективність застосування неруйнівного методу георадарної діагностики також забезпечується можливістю отримання безперервної (за довжиною автомобільної дороги) інформації про будову дорожнього одягу та наявність прихованих руйнувань, що сприяє розробленню обґрунтованих проектних рішень з ремонту автомобільних доріг та дозволяє оптимізувати розподіл матеріальних і фінансових ресурсів.

4.3.2 Економічна ефективність застосування методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики

Економічна ефективність застосування методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики обумовлена:

а) отриманням даних про будову та фактичний стан дорожнього одягу, неоднорідність геометричних параметрів та структурну неоднорідність – наявність прихованих тріщин у шарах з монолітних матеріалів;

б) оцінюванням стану, ризику руйнування та надійності конструкції нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням показників неоднорідності.

Індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу функціонально пов'язаний з показниками міцності та надійності дорожнього одягу, які визначають стан нежорсткого дорожнього одягу та швидкість руху на ділянці автомобільної дороги. Тому можна вважати, що зміна індексу технічного стану конструкції дорожнього одягу призводить до зміни його транспортно-експлуатаційного стану на величину

$$\Delta TCI = TCI - TCI_0, \quad (4.7)$$

де TCI, TCI_0 – відповідно індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу, що визначений із залученням результатів георадарного зондування, та без урахування інформації про неоднорідність конструкції дорожнього одягу.

Тоді величина ΔTCI може розглядатися як результат від впровадження запропонованої методики оцінювання стану конструкції дорожнього одягу із залученням результатів георадарного зондування та є кількісною оцінкою ефекту від впровадження методики.

Економічний ефект від впровадження методики (ΔTCI) досягається через призначення ремонтних заходів, що відповідають фактичному стану

дорожнього одягу, та забезпечення нормативного транспортно-експлуатаційного стану протягом строку служби до капітального ремонту. Тоді економічний ефект визначається:

$$E = \left(\sum_1^t \frac{C_0(t)}{(1+E_{nn})^t} + \frac{\Delta C_{0j}(t)}{(1+E_{nn})^t} \right) - \left(\sum_1^t \frac{C_{TCI}(t)}{(1+E_{nn})^t} + \frac{\Delta C_{TCIj}(t)}{(1+E_{nn})^t} \right), \quad (4.8)$$

де E – економічний ефект від зниження транспортно-експлуатаційних витрат через призначення ремонтних заходів за результатами оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу, грн.;

$C_0(t)$, $C_{TCI}(t)$ – річні транспортно-експлуатаційні витрати на ділянці дороги відповідно без призначення ремонтних заходів та за умови призначення ремонтних заходів за результатами оцінювання стану дорожнього одягу, грн.;

$\Delta C_{0j}(t)$, $\Delta C_{TCIj}(t)$ – збільшення транспортно-експлуатаційних витрат через погіршення умов руху під час проведення ремонтних робіт на ділянці, грн.

t – період часу від року здійснення капіталовкладень до року приведення;

E_{nn} – нормативний коефіцієнт приведення різночасових витрат до вихідного року ($E_{nn} = 0,1$).

Припустимо, що збільшення транспортно-експлуатаційних витрат через погіршення умов руху під час проведення ремонтних робіт однакові для ділянок без призначення ремонтних заходів та ділянок, де ремонтні заходи призначалися. Тоді (4.8) можна записати у вигляді:

$$E = \sum_1^t \frac{C_0(t)}{(1+E_{nn})^t} - \sum_1^t \frac{C_{TCI}(t)}{(1+E_{nn})^t}. \quad (4.9)$$

Транспортно-експлуатаційні витрати визначаються згідно з [447]:

$$C(t) = C_a + B + Z + K_{oa}, \quad (4.10)$$

де C_a – витрати на перевезення вантажів та пасажирів, грн.;

B – витрати, що пов'язані з перебуванням вантажу і пасажирів у шляху, грн.;

Z – збитки від дорожньо-транспортних пригод, грн.;

K_{oa} – капіталовкладення в автомобільний транспорт, грн.

Перетворивши вираз (4.9) з урахуванням (4.10) та складових транспортно-експлуатаційних витрат, що визначаються за [384], отримуємо:

$$C(t) = 3,65 \cdot N_0 \cdot q^t \cdot L \cdot \left(\begin{array}{l} S_{зм} \cdot K_g + \frac{S_{nocm} + d}{V} + C \cdot \left(\frac{\eta_l \cdot P_l + \eta_a \cdot P_a}{V} \right) + \\ + 10^{-4} \cdot \Pi + \frac{A}{3,65 \cdot T_a \cdot V} \end{array} \right), \quad (4.11)$$

де N_0 – середньодобова інтенсивність руху на ділянці дороги, авт./добу;

q – коефіцієнт зростання інтенсивності руху;

t – строк експлуатації, років;

L_j – довжина ділянки, км;

$S_{зм}$ – середні значення змінних витрат, коп./авт.·км;

K_g – коефіцієнт впливу дорожніх умов;

S_{nocm} – середні значення постійних витрат, коп./авт. ·год;

d – середні значення часової заробітної плати водіїв, коп./год.;

V – середня швидкість руху на ділянці, км/год.;

C – збитки від перебування у шляху, грн.;

η_l, η_a – частка легкових автомобілів і автобусів у складі транспортного потоку відповідно, авт./добу.;

P_l, P_a – кількість пасажирів легкових автомобілів і автобусів відповідно;

Π – збитки від ДТП на один автомобіле-кілометр, грн.;

A – питомі капіталовкладення у рухомий склад, грн.;

T_a – середня тривалість роботи одного автомобіля на маршруті, год.

Для встановлення зв'язку між рівністю покриття та ризиком руйнування

скористаємося рішенням проф. І.А. Золотаря [41]:

$$S = \frac{1}{\eta} \cdot \left(m - \frac{1}{a + b \cdot r} \right), \quad (4.12)$$

де S – показник рівності покриття за поштовхоміром, см/км;

m, a – емпіричні параметри, що враховують вплив початкової рівності покриття на швидкість руху транспортного потоку ($m = 86,14$; $a = 0,0125$);

η, b – емпіричні коефіцієнти, що впливають відповідно на швидкість руху і динаміку зміни рівності покриття залежно від імовірності руйнування покриття ($\eta = 0,123$; $b = 0,045$);

r – ймовірність руйнування покриття.

У свою чергу, згідно з [385] виконується умова $5 \text{ см/км} < S < 800 \text{ см/км}$ згідно з [385], зв'язок між рівністю покриття та швидкістю транспортного потоку може бути представлений у вигляді [385]:

а) для легкових автомобілів:

$$V = 70 - 0,016 \cdot S; \quad (4.13)$$

б) для вантажних автомобілів:

$$V = 55 - 0,023 \cdot S, \quad (4.14)$$

де V – швидкість руху транспортного потоку, км/год.;

S – рівність за поштовхоміром, см/км.

Зв'язок кількості дорожньо-транспортних пригод з рівністю приймемо згідно з дослідженнями [385]:

$$Z = 0,0915 \cdot S^{0,5}, \quad (4.15)$$

де Z – кількість дорожньо-транспортних пригод на 1 мільйон автомобіле-кілометрів.

Будемо порівнювати два варіанта стратегії оцінювання стану ділянки автомобільної дороги:

а) обстеження ділянки проведено методом візуальної оцінки та вимірюванням модуля пружності конструкції дорожнього одягу. За результатами обстеження визначено індекс технічного стану (TCI_0), надійність (H_0), ризик руйнування (R_0) конструкції дорожнього одягу, коефіцієнт варіації індексу технічного стану ($CV_0 = 0$). За результатами обстеження визначено стан ділянки як відмінний. Ремонтні заходи не призначено;

б) проведено георадарне обстеження ділянки. За результатами обстеження визначений індекс технічного стану (TCI), надійність (H), ризик руйнування (R) конструкції дорожнього одягу, коефіцієнт варіації індексу технічного стану (CV_{TCI}). Ділянка знаходиться у незадовільному стані. За результатами обстеження призначено ремонтні заходи. Після реалізації ремонтних заходів стан ділянки оцінюється як відмінний.

Враховуючі (4.8 – 4.15), запишемо загальний порядок розрахунку економічного ефекту від застосування методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики:

- за формулою (4.12) визначають рівність (S), що відповідає ризику руйнувань (R, R_0) на ділянці;
- розраховують швидкість руху (4.13, 4.14) і кількість дорожньо-транспортних пригод (4.15);
- розраховують транспортно-експлуатаційні витрати (4.11);
- розраховують економічний ефект (4.19).

Розрахунок очікуемого економічного ефекту від впровадження методики оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням результатів георадарної діагностики наведено у таблиці 4.3.

Річний економічний ефект на останній рік служби дорожнього одягу перед капітальним ремонтом становить 207,763 тис. грн./км·рік.

Таблиця 4.3 – Розрахунок економічного ефекту

Показники	Стратегія обстеження	
	візуальне	георадарне
Інтенсивність руху, авт./добу	5742	5742
Склад транспортного потоку:		
- легкові автомобілі, частки одиниць	0,50	0,50
- вантажні автомобілі, частки одиниць	0,44	0,44
- автобуси, частки одиниць	0,06	0,06
Довжина ділянки автомобільної дороги, км	1,0	1,0
Стан дорожнього одягу за результатами обстеження:		
- індекс технічного стану (TCI)	95	80
- коефіцієнт варіації (CV), %	11	20
- надійність (H)	0,95	0,65
- ризик руйнування (R)	0,05	0,35
Фактичний стан дорожнього одягу:		
- індекс технічного стану (TCI)	80	80
- коефіцієнт варіації	15	15
- надійність	0,75	0,75
- ризик руйнування	0,25	0,25
Стан дорожнього одягу після проведення ремонтних робіт:	ремонтні роботи не призначено	ремонтні роботи призначено
- індекс технічного стану (TCI)	80	95
- коефіцієнт варіації (CV), %	15	11
- надійність (H)	0,75	0,95
- ризик руйнування (R)	0,25	0,05
Показники транспортно-експлуатаційного стану:		
- рівність покриття за поштовхоміром (S), см/км	358,01	149,13
- швидкість руху транспортного потоку (V), км/год	55,89	64,52
Розрахунок поточних витрат		
- змінні витрати ($S_{зм}$), коп./авт.·км;	138,52	138,52
- коефіцієнт впливу дорожніх умов на змінні витрати (K_g)	1,0	1,0
- постійні витрати ($S_{ном}$), коп./авт.год.	990,61	990,61
- годинна зароботна платня водіїв (d), коп./год.	3116,94	3116,94
- збитки з розрахунку на одну людину-годину перебування у шляху (C), коп./авт.·км	15,0	15,0
- збитки від дорожньо-транспортних пригод ($П_j$), коп./авт.·км	24,26	9,87
- питомі капіталовкладення у рухомій склад (A), грн.	278,41	278,41
- середня тривалість роботи одного автомобіля на маршруті за рік (T_a), год.	10,65	10,65
Сумарні транспортно-експлуатаційні витрати $C(t)$, тис. грн.	4456,258	4248,495
Економічний ефект (E), тис. грн./км·рік		207,763

4.4 Висновки по розділу

1. Розроблено методику пошуку, позиціонування та ідентифікації прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу, що містить у собі порядок проведення георадарного обстеження та обробки імпульсних сигналів георадару під час вирішення завдань дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу. Основу запропонованої методики становлять:

а) порядок отримання та аналізу поляризаційного стану сигналу з метою позиціонування прихованих тріщин у шарах нежорсткого дорожнього одягу;

б) алгоритми визначення діелектричної проникності шару покриття над тріщиною, визначення глибини розташування та геометричних параметрів тріщин, що реалізовані у програмному забезпеченні GeoVizu-2.

Методика пройшла апробацію на автомобільних дорогах загального користування та впроваджена у нормативних документах [258, 268].

2. Розроблено методику оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики, що спирається на результати георадарного зондування та чисельного моделювання НДС конструкції 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 дорожнього одягу; ризиком руйнувань; надійністю конструкції дорожнього одягу. Основні положення методики, що стосуються застосування результатів георадарного зондування та системи показників оцінювання поточного стану нежорсткого дорожнього одягу, впроваджено у нормативному документі [365].

3. Розроблено порядок обґрунтування обсягу вибірки оцінок стану нежорсткого дорожнього одягу, основу якого складають процедури оцінювання однорідності вибірки за непараметричним критерієм Вилкоксона та визначення мінімальної кількості елементів вибірки, що забезпечує достовірність оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу за заданій погрішності

вимірювань і відповідає 0,95 довірчій імовірності за критерієм Стьюдента.

4. Визначено економічну ефективність від впровадження георадарного зондування для вирішення завдань дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу та оцінювання його стану:

а) 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;

б) економічний ефект від впровадження методу оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики забезпечується скороченням транспортно-експлуатаційних витрат (207,763 тис. грн./км·рік.), збільшенням строку служби дорожнього одягу через повноту даних георадарної діагностики, можливістю оцінювання надійності конструкції дорожнього одягу, що забезпечує достовірність оцінки фактичного стану нежорсткого дорожнього одягу та сприяє розробленню обґрунтованих проектних рішень з його ремонту.

5. Результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію під час георадарного обстеження автомобільних доріг Харківської, Дніпропетровської областей, АР Крим, захищені двома патентами України [310, 377] та впроваджені у нормативні документи Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор»: Р В. 2.3-218-02071168-781 [258]; М 02071168-706 [268]; М 02071168-725 [365].

Основні результати досліджень четвертого розділу висвітлено у роботах автора: [310, 362, 377, 386].

ЗАГАЛЬНІ 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 імовірнісні 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 штампу 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 проектних рішень – 207,763 тис. грн./км·рік через зменшення транспортно-експлуатаційних витрат.

СПИСОК ВИКОРОСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Carlson A. Life cycle assessment of roads and pavements. Studies made in Europe. Annelie Carlson - VTI rapport 736A. The Swedish Transport Administration. 2011. 28 p.
2. Fabio Galatioto, Yue Huang, Tony Parry, Roger Bird, Margaret Bell. Traffic modelling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment. Transportation Research Part D 36. 2015. PP. 65–75.
3. Апестин В.К., Дудаков А.И. Оценка воздействия автомобильного движения на нежесткие дорожные одежды с учетом типа покрытия. Тезисы докладов VII Всесоюзного совещания дорожников Ускорение научно-технического прогресса, повышение производительности труда и качества дорожных работ. М.: ГипродорНИИ, 1981. С.23–24.
4. Столярова Н.А., Столяров К.А., Ушаков С.А., Лихошерст Р.В. Учет динамического воздействия транспортных средств при оценке срока службы дорожных конструкций. Вісник Донецької академії автомобільного транспорту, 2010. № 2. С. 82–87.
5. Апестин В.К. Требования к предельному состоянию нежестких дорожных одежд. Наука и техника в дорожной отрасли, 2007. № 2 (41). С. 16–18.
6. Бахрах Г.С. Проектирование нежестких дорожных одежд по критерию усталостного растрескивания. Наука и техника в дорожной отрасли, 2008. № 2 (45). С. 32–35.
7. Бахрах Г.С. Сопоставительная модель оценки срока службы дорожных одежд нежесткого типа по критерию усталостного растрескивания при их конструировании. Тр. ГП Росдорнии. М., 1998. Вып. 9. С. 51–59.
8. Апестин В.К., Работяга М.Т., Стрижевский А.М. Прогноз ежегодный повреждений нежестких дорожных одежд, вызванных движением транспортных средств. Строительные материалы, технология строительства, эксплуатация и ремонт, экономика и планирование. Труды РосдорНИИ, 1992. Вып. 5. С.88–92.

9. Садигов И.С., Артиков А.А. Развитие отраженных трещин в зависимости от внешних факторов. Наука и техника в дорожной отрасли, 2008. № 2 (45). С. 32–35.
10. Бируля А.К. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1964. 167 с.
11. Иванов Н.Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1973. 328 с.
12. Бируля А.К., Михович С.И. Работоспособность дорожных одежд. М.: Транспорт, 1968. 172 с.
13. Леонович И.И., Богданович С.В., Нестерович И.В. Диагностика автомобильных дорог. Учебное пособие. Минск. Новое знание, 2011. 181 с.
14. Сиденко В.М., Михович С.И. Эксплуатация автомобильных дорог: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобильные дороги». М.: Транспорт, 1976. 288 с.
15. Апестин В.К., Шак А.М., Яковлев Ю.М. Расчет снижения модулей упругости нежестких дорожных одежд в процессе эксплуатации автомобильных дорог. Труды ГипродорНИИ. М., 1974. Вып. 8. С. 120–135.
16. Ахметов К.Н., Красиков О.А. Прогнозирование потери несущей способности дорожных одежд в условиях превышения допустимой интенсивности транспорта. Город и транспорт: Материалы научно-практической конференции. Ч.1. Омск, 1996. С. 98–100.
17. Васильев А.П., Яковлев Ю.М., Коганзон М.С. Принципы прогнозирования транспортно - эксплуатационного состояния дорог. Автомобильные дороги, 1993. № 1. С. 8–10.
18. Васильев А.П. Метод комплексной оценки качества и состояния автомобильных дорог. Автомобильные дороги, 1989. № 8. С. 7–10.
19. Апестин В.К., Шак А.М., Яковлев Ю.М. Испытание и оценка прочности нежестких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1977. 102 с.
20. Некрасов В.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Высшая школа, 1970. 239 с.

21. Иллиополов С.К., Селезнев М.Г. Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния системы «дорожная одежда – грунт». Ростов-на-Дону: РГСУ, 1997. 125 с.

22. Смирнов А.В., Иллиополов С.К., Александров А.С. Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций. Учебное пособие. Омск. Издательство СибАДИ, 2003. 54 с.

23. Радовский Б.С. Поведение дорожной конструкции как слоистой вязкоупругой среды под действием подвижной нагрузки. Известия вузов. Строительство и архитектура, 1975. С.42–48.

24. Золотарь И.А. К определению остаточных деформаций в дорожных конструкциях при многократных динамических воздействиях на них подвижных транспортных средств. СПб.: Изд-во ВАТТ, 1999. 32 с.

25. Иванов Н.Н. Расчет и испытание нежестких дорожных одежд. М.: Высшая школа, 1971. 100 с.

26. ОДН 218.1.052-2002. Оценка прочности нежестких дорожных одежд. [Действующий от 2002-11-19]. М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2003. 45 с.

27. Буртыль Ю.В., Леонович И.И. Совершенствование методов оценки транспортно - эксплуатационного состояния автомобильных дорог. Автомобильные дороги и мосты, 2010. № 8. С. 95–105.

28. ДМД 02191.5.008-2009. Рекомендации по оценке прочности нежестких дорожных одежд по чаше прогиба. [Действующий от 2009-09-10]. Минск: Минтранс, 2009. 15 с.

29. Коган Б.И. Осесимметрическая задача теории упругости для многослойного полупространства. Известия АН СССР. Механика и машиностроение, 1958. № 6. С. 111–113.

30. Коган Б.И. Напряжения и деформации многослойных покрытий. Труды ХАДИ. Х.: ХГУ, 1953. Вып. 14. С. 33–46.

31. Flexible Pavement Design Manual: Document № 625-010-002-g. Tallahassee, Florida: Florida Department of Transportation. 2008. 189 p.

32. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association

of State Highway and Transportation Officials. 1993. 624 p.

33. Diefenderer B.K. Analysis of Full-Depth Reclamation Trial Sections in Virginia: Final Report. B.K. Diefenderer, A.K. Apeageyi – Virginia Department of Transportation : VCTIR. 2011. 54 p.

34. Кривисский А.М. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд по местному предельному равновесию. М.: Автотрансиздат, 1963. 75 с.

35. Теляев П.И., Щербакова Е.Я. О напряженно-деформированном состоянии дорожной одежды под действием нормальной и касательной нагрузок. Исследования по механике дорожных одежд: труды СоюздорНИИ. М., 1985. С. 60–70.

36. Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 324 с.

37. Батраков О.Т., Михович А.С. Выбор метода контроля прочности дорожных одежд. Автодорожник Украины, 1979. № 2. С. 32–33.

38. Бируля А.К., Говорущенко Н.Я., Ермакович Д.Б. Эксплуатационные качества автомобильных дорог. М.: Автотрансиздат, 1961. 185 с.

39. СОУ 45.2-00018112-080:2011. Автомобильные дороги. Оценка и регистрация состояния дорожных покрытий и технических средств автомобильных дорог автоматизированными системами видеодиагностики. [Действующий от 2012-03-01]. К.: Государственная служба автомобильных дорог Украины (Укравтодор), 2012. 45 с.

40. ТКП 140-2008. Автомобильные дороги. Порядок выполнения диагностики. [Действующий от 2008-07-15]. Минск: Министерство транспорта Республики Беларусь, 2008. 48 с.

41. Золотарь И.А., Некрасов В.К., Коновалов С.В., Яковлев Ю.М., Коганзон М.С. Повышение надежности автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1977. 183 с.

42. ВБН Г.1-218-050-2001. Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування. [Чинний від 2009-07.01]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2001. 12 с.

43. ГБН Г.1-218-182:2011. Організаційно-методичні, економічні і технічні нормативи. Ремонт автомобільних доріг загального користування. Види ремонтів та перелік робіт. [Чинний від 2011-12-01]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2011. 13 с.

44. СОУ 42.1-37641918-105:2013. Організаційно-методичні, економічні і технічні нормативи. Класифікація робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. [Чинний від 2013-05-20]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2013. 10 с.

45. Корсунский М.Б. Межремонтные сроки службы дорожных одежд и покрытий. Автомобильные дороги, 1984. № 1. С. 4–6.

46. Яковлев Ю.М. Оценка прочности нежестких дорожных одежд с учетом их фактического состояния. Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в начале 21 века: сб. науч. трудов МАДИ. М.: МАДИ, 2000. С. 97–103.

47. Стрижевский А.М. К вопросу об оценке прочности нежестких дорожных одежд на основе данных о состоянии дорожного покрытия. Труды ГП РосдорНИИ: сб. научных статей. М.: ГП РосдорНИИ, 2003. Вып. 11. С. 42–54.

48. Ермаков М.Л. Совершенствование отраслевой системы диагностики автомобильных дорог для повышения эффективности диагностических и ремонтных работ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Саратов, 2008. 20с.

49. ТКП 45-3.03-112-2008. Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. [Действующий от 2008-11-19]. Минск.: Министерство строительства и архитектуры, 2009. 88 с.

50. Борисюк Н.В., Яковлев Ю.М. Видеодиагностика автомобильных дорог и система регистрации проезжей части. Наука и техника в дорожной отрасли, 2002. №1. С. 23–25.

51. Гасанов Ш.Г. Решение задачи механики разрушения дорожного покрытия с учетом дефектов типа трещин. Механика машин, механизмов и материалов. Минск, 2013. № 2 (23). С.35–40.

52. Радовский Б.С., Мозговой В.В. Температурные напряжения в асфальтобетоне, лежащем на основании с трещинами либо швами. Повышение

долговечности дорожных конструкций: Тр.Союздорнии М., 1985. С. 29–45.

53. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков: Высшая школа, 1977. 116 с.

54. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук:05.22.11. Киев, 1996. 406 с.

55. Леонович И.И. Диагностика и управление качеством автомобильных дорог: учебное пособие. Минск: БГТУ, 2002. 357 с.

56. Веренько В.А. Деформации и разрушения дорожных покрытий: причины и пути устранения. Минск. Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2008. 304 с.

57. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11. Київ, 2005. 438 с.

58. Гезенцвей Л.Б., Казарновская Э.А. Релаксация напряжений в асфальтобетоне Текст. Труды Союздорнии. М., 1985. С. 132–138.

59. Горельшев Н.В. Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы. М.: Можайск. Терра, 1995. 176 с.

60. Казарновский В.Д., Кретоа В.А., Красноперов А.Р. Метод количественной оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий, устраиваемых на основаниях со швами и трещинами. Труды ГП «РосдорНИИ». М.: Росдорнии, 2000. №10. С. 153–163.

61. Мерзликин, А.Е. Об особенностях напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с трещиновато-блочным основанием. Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд: сб.научн.тр. Союздорнии. М., 1990. С. 43–51.

62. Тукашев, Ж.Б., Адилханова Л.А. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия. Геология, география и глобальная энергия, 2010. № 2(37). С. 163–165.

63. Гасанов Ш.Г. Расчетный метод исследования усталостного разрушения дорожного покрытия. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2010. № 2. С. 14–20.

64. Гасанов Ш.Г. Трещина в сечении дорожного покрытия. Строительная

механика инженерных конструкций и сооружений. Российский университет дружбы народов, 2019. № 6 (15). С. 39–44.

65. Батракова А.Г., Урдзик С.М., Батраков Д.О. Моделирование и оценка состояния дорожных одежд со сквозными трещинами в покрытии. Вісник ХНАДУ, 2019. Вип. 85. С.49–58.

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

67. Леонович И.И., Мельникова И.С. Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях и критерии их трещиностойкости. Строительная наука и техника, 2011. № 4. С. 37–41.

68. Радовский Б.С. Сердюк А.В. Прогнозирование закономерностей изменения состояния дорожной одежды. Автомобильные дороги, 1994. № 7. С. 19–22.

69. The AASHO Road Test. Report 7: Final Summary. Washington: HRB, National Research Council. 1962. 56 p.

70. Rahil Ashraf, Dr.Rakesh Gupta. Review paper on application of the dissipated energy concept to fatigue cracking in flexible pavement. Ambala-Mohra section of Chandigarh New Delhi national highway. International Journal of Latest Research In Engineering and Computing (IJLREC) Volume 5, Issue 4. July-August 2017. PP.31–36.

71. ВСН 46-60. Инструкция по назначению конструкций дорожных одежд нежесткого типа. Министерство транспортного строительства СССР. М.: Автотрансиздат, 1961. 77 с.

72. ВСН 46-72. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. Министерство транспортного строительства СССР. М.: Транспорт, 1973. 83 с.

73. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. [Чинний від 2019-06-01]. К.: Міністерство інфраструктури України, 2019. 63 с.

74. ГБН В.2.3-218-551:2011. Автомобільні дороги загального користування. Капітальний ремонт. Вимоги проектування. [Чинний від 2012-01-01]. Київ. Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2011. 24 с.

75. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. [Введен в действие 2000-12-20]. Москва. Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта российской федерации, 2001. 148 с.

76. ПНСТ 265-2018. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд. [Введен в действие 2018-04-11] Москва. Стандартинформ, 2018. 77 с.

77. ГБН В.2.3-37641918-544:2014. Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. [Чинний від 2015-01-01]. Київ. Міністерство інфраструктури України, 2014. 147 с.

78. Кулик Н.С., Кучер А.Г., Мильцов В.Е. Сравнительный анализ поврежденности и остаточной долговечности элементов конструкции с различными дефектами типа трещин при действии спектра нагрузок. Авиационно-космическая техника и технология, 2009. №10 (67). С.156–166.

79. Курбатов Ю. Е., Кашеварова Г. Г. Поврежденность как основная мера усталостного разрушения. Международный научно-исследовательский журнал, 2016. № 5 (47) Часть 3. С.126–133.

80. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. [Чинний від 2017-04-01]. Київ. Міністерство інфраструктури України, 2016. 75 с.

81. Flexible Pavement Design Manual Topic. Office of design, pavement management section. January 2018. № 625-010-002. Tallahassee, Florida. 95 p.

82. Углова Е.В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11. Волгоград, 2009. 372 с.

83. Мерзликин А.Е., Капустников Н.В. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства применительно к задачам по расчету дорожных одежд методом конечных элементов. Дороги и мосты. Омск.

СибАДИ, 2011. № 1 (25). С. 63–72.

84. Мерзликин А.Е. Об особенностях напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с трещиновато-блочным основанием. Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд: Труды Союздорнии. М.: СоюздорНИИ, 1990. С. 43–51.

85. Paulo Pereira, Jorge Pais. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)* 2017. № 4 (4). PP. 316–346.

86. Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. Monograph. Shell Center. London. England. 1978. 354 p.

87. Горшков Н.И. Разработка и внедрение геомеханического обеспечения проектирования транспортных сооружений на основе метода конечных элементов: автореф. дис. ... д-ра технических наук: 05.23.11. Хабаровск, 2016. 40 с.

88. Retherford, J.Q. Management of Uncertainty for Flexible Pavement Design Utilizing Analytical and Probabilistic Methods (PhD thesis). Vanderbilt University, Nashville. 2012. 289 p.

89. Sharma H., Swamy A.K. Development of probabilistic fatigue curve for asphalt concrete based on viscoelastic continuum damage mechanics. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016. № 9 (4). PP. 270–279.

90. Sun L., Hudson W.R. Probabilistic approaches for pavement fatigue cracking prediction based on cumulative damage using miner's law. *Journal of Engineering Mechanics*. 2005. 131 (5). PP 546–549.

91. Vyrozhemskiy V., Voloshyna I., Aliyev K., Shumchyk V. Research of Cracks Formation at Transport Facilities of Azerbaijan. RILEM Bookseries, 2016. Vol. 13. PP. 145–151.

92. Kim H.B., Buch N. Reliability-based pavement design model accounting for inherent variability of design parameters. Transportation research board, 82nd annual meeting. Washington D.C. January 12-16, 2003. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/80c3/b893041d370d0f3717d9861c14acfb1fdd52.pdf>

93. Dinegdae Y.H., Birgisson B. Reliability-based design procedure for fatigue cracking asphalt pavements. Transportation research record: Journal of the Transportation research board. 2016. PP. 127–133.

94. ДБН.В.2.3-4:2015. Державні будівельні норми України. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Київ: Мінрегіон України, 2015. 112 с.

95. Золотарев В.А. Оценка структурного типа дорожных битумов. Автомобильные дороги, 1992. № 4. С. 4–7.

96. Леонович И. И. Дорожная климатология. Электронное учебное издание. Мн.: БНТУ, 2007. 340 с.

97. Веренько В.А. Надежность дорожных одежд. Учебное пособие. Минск. Белорусская государственная политехническая академия, 2002. 121 с.

98. Гезенцвей Л.В., Алиев А.М. Восстановление асфальтобетонных покрытий. Автомобильные дороги, 1980. № 1. С. 22–23.

99. Гезенцвей Л.Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.

100. Горельшев Н.В. Асфальтобетон и другие битумо - минеральные материалы. М.: Можайск. Терра, 1995. 176 с.

101. Горельшев Н.В., Лобзово К.Я., Калашникова Т.Н. Пути повышения деформативности асфальтобетона при отрицательных температурах. М.: Тр.Союздорнии, 1967. Вып. 2. С. 92–106.

102. Казарновский В. Д. Оценка сдвигоустойчивости связных грунтов в дорожном строительстве (Теоретические основы и практические методы), 1985. 168 с.

103. Казарновский В.Д., Гречишев С.Е., Пшеничникова Е.С. Методические рекомендации по применению объемной георешетки типа "Геовеб" при сооружении автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты Западной Сибири (для опытного строительства). Методический материал. М.: Союздорнии, 2003. 48 с.

104. Илиополов С.К. Разработка основ комплексного учета динамических воздействий для расчета и конструирования дорожных одежд: дис. ... д-ра техн.

наук: 05.23.11. Ростов-на-Дону, 1999. 366 с.

105. Илиополов С.К., Максименко В.А., Углова Е.В. Регенерированный асфальтобетон для ремонта городских дорог. Сб. Реконструкция. Архангельск, 1999. С. 35–41.

106. Безбабічева О.І., Бережна К.В., Жданюк К.В. Сучасні конструктивні і технологічні рішення мостового полотна автодорожніх мостів із ефективними варіантами гідроізоляційного захисту. Вісник ХНАДУ. Харків, 2002. С.142–144.

107. Жданюк В.К., Воловик О.О., Біжан О.П., Циркунова К.В., Гнатенко Р.Г. Щодо конструктивно - технологічних особливостей герметизації тріщин в асфальтобетонних покриттях. Х.: Вісник ХНАДУ, 2019. Вип. 84. С.82–87.

108. Гнатенко Р.Г., Макарчев О.О., Циркунова К.В., Жданюк В.К. Особливості технології ремонту тріщин в асфальтобетонних покриттях дорожніх одягів. Х.: Вісник ХНАДУ, 2017. Вип. 76. С.156–158.

109. Богомоллов В.А., Жданюк В.К., Богомоллов С.В. Нагрузочные режимы дорожной одежды нежесткого типа. К.: Дороги і мости, 2011. Вип. 13. С.29–38.

110. Гамеляк І.П. Надійність конструкції дорожнього одягу. Частина 1. Проектна та технологічна надійність. К.: Автошляховик України, 2006. № 2. С.39–44.

111. Гамеляк І.П. Системна модель забезпечення надійності конструкцій дорожніх одягів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2017. Вип. 100. С. 216–227.

112. Гамеляк І.П., Даценко В.М. Забезпечення надійності конструкції дорожнього одягу за несною здатністю при капітальному ремонті та реконструкції. Науково-виробничий журнал, 2015. № 5 (247). С.40–43.

113. Дмитриченко М.Ф., Дмитрієв М.М., Гамеляк І.П., Райковський В.Ф. Надійність конструкцій дорожнього одягу. Навч. посібник.К.: НТУ, 2012. 206 с.

114. Славінська О.С., Авраменко Ю.В. Методи оцінки транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, № 92. НТУ. С. 87–92.

115. Славінська О.С., Савенко В.Я. Стьожка В.В. Удосконалення процесу обстеження експлуатаційного стану доріг з використанням інформаційно-аналітичної системи на базі планшета. Автошляховик України, 2012. № 5. С. 37–41.

116. Klimenko I, Kuzhel N, Beljatynskij A, Prentkovskis O, Bakulich O. The criteria describing the need for highway reconstruction based on the theory of traffic flows and repay time. Vilnius (Lietuva): Technika. Transport. №24(4). PP.308–317.

117. Malikov V., Wojarchuk B., Bieliatynskyi A, Klymenko I, Orzheshkovska L, Orzheshkovskyi V. Application of the method of factor analysis in the assessment of the technical condition of the hard cover airport. Transbaltica. Proceedings of the 8th International Scientific Conference. 2013. PP. 122–125.

118. 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, 2011. №13. С. 76–88.

119. Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Ю.О. Заєць Ю.О., Л.В. Шевчук Л.В. Моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу під дією транспортних навантажень. Опір матеріалів і теорія споруд, 2017. № 99. С.45–57.

120. Мозговой В.В., Бесараб А.Н., Жуков А.А., Онищенко А.Н. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных слоев городских дорожных одежд. Современное промышленное и гражданское строительство, 2006. № 2. С. 81–89.

121. Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф., Різніченко О.С., Аксьонов С.Ю., Панченко О.О. Методика прогнозування деформаційної стійкості асфальтобетонного покриття на мостах. Містобудування та територіальне планування, 2012. № 45 (3). С.83–87.

122. Онищенко А.М., Мозговий В.В., Жуков О.О., Невінгловський В.Ф., Куцман О.М., Білан О.О., Жданюк В.К., Юнак А.Л. Методика оцінки зчеплення між асфальтобетонними шарами при зсуві. Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, 2010. №1 (81). С.53–60.

123. Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф., Різніченко О.С., Аксьонов С.Ю. Методика та результати визначення коефіцієнта температурної тріщиностійкості асфальтобетону. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2012. № 91. С. 84–88.

124. 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, 217. № 1(37). С. 308–320.

125. Онищенко А.М., Різніченко О.С., Ряпухін В.М. Моделювання напружено-деформованого стану асфальтобетонного покриття на мостах. Дороги і мости, 2015. №15. С. 94-102.

126. Павлюк Д.О., Павлюк В.В., Лебедев О.С., Гаврищук В.В., Іващенко А.П., Шур'яков М.В., Шуляк І.С. Результати приймальних випробувань станції для штампових випробувань дорожніх конструкцій і їх шарів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К., 2013. № 90. С.97–105.

127. Павлюк Д.А., Павлюк В.В., Лебедев А.С., Гаврищук В.В., Шурьяков М.В., Шуляк И.С. Станция для штамповых испытаний дорожных конструкций и их слоев. Автошляховик України, 2013. № 2. С.30–35.

128. Начіпне обладнання НТУ для оцінки міцності і деформативності дорожніх конструкцій та ґрунтових основ / Д. Павлюк [та ін.]. Автошляховик України, 2008. № 3. С. 33–36.

129. Pais J.C., Pereira P.A.A., Sausa J.B., Capita S. Evaluation of the Load Associated Cracking in Flexible Pavement. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Correia & Branco (eds). 2002. PP. 585–594.

130. Oscarsson Erik. Mechanistic-Empirical Modeling of Permanent Deformation in Asphalt Concrete Layers. Doctoral Thesis. Traffic and Roads Department of Technology and Society Faculty of Engineering, LTH, Lund University. Sweden. 2011. 53 p.

131. Lytton R.L. Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete. Geotextiles and Geomembranes. 1989. Vol. 8, No. 3. PP. 217–237.

132. Glover Charles J., Guanlan Liu, Avery A. Rose, Yunwei Tong, Fan Gu,

Meng Ling, Edith Arambula, Cindy Estakhri, and Robert Lytton. Evaluation of binder aging and its influence in aging of hot mix asphalt concrete: technical report. Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation. 2013. 216 p.

133. Fyfe, R. Paving fabric seal design and performance on Australian roads. 2nd international and sealing conference-sustaining sprayed sealing practice. Melbourn, Australia. 2010. PP.1–31.

134. Coni M., Portas S., Isola R., Oliveira J.M. FE evaluation of 4-point bending test for fatigue cracking assessment. Sixth RILEM International Conference on racking in Pavements. Chicago, Illinois. 9 – 11 June 2008. PP. 1–10.

135. Al-Qadi I. L., Elseifi M.A., Freeman T.E. Steel reinforcing netting mechanism to abate reflective cracking in asphalt concrete overlays. Paper No. 02-2615 presented at the Transportation Research Board 81st Annual Meeting, Washington, D.C. 2002. PP. 116–128.

136. Rigo J. M. General introduction, main conclusions of 1989 conference on reflective cracking in pavements, and future prospects. 2nd International RILEM Conference – Reflective Cracking in Pavements, E & FN Spon, Liege, Belgium. 1993. PP.3–20.

137. Westergaard H.M. Bearing Pressure and Cracks. Journal of Applied Mechanics. Vol. 6. 1937. PP. 49–53.

138. Westergaard H. M. Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads. Vol. 7, No. 2. 1926. PP.25 – 35.

139. Westergaard H. M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements in Airfields. American Society of Civil Engineers. Transactions. Volume 113. 1948. PP. 425–439.

140. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов: Учебное пособие. М.: Наука, 1965. 121 с.

141. Westergaard H.M., Stress concentration in plates loaded over small areas. Transactions. A.S.C.E. Vol.108. 1965. PP. 831–887.

142. Казарновский В.Д. Пути повышения надежности и долговечности дорог в сложных природных условиях. Наука и техника в дорожной отрасли,

2002. № 2. С. 8–9.

143. Радовский Б.С. Прочность и расчет бетонных покрытий в США. Бетон и железобетон, 2011. №2. С. 118-131.

144. Зиновеев И.В., Приварников А.К. Способ определения напряженно-деформированного состояния многослойных оснований с дефектами. Теоретическая и прикладная механика, 2008. Вып. 44. С. 16–28.

145. Радовский Б.С. Опыт использования старого цементобетона как основания под асфальтобетонное покрытие в США. Дорожная техника. Инновации в дорожном строительстве. Санкт-Петербург, 2010. №1. С.20–32.

146. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. М.: Транспорт, 1985. 43 с.

147. Гамеляк І.П. Вплив руйнувань на зміну міцності конструкцій дорожнього одягу. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2001. № 62. С. 157–165.

148. Казарновский В.Д., Лейтланд И.В., Попов М.Л. К вопросу о методике расчета усиления дорожных одежд. Наука и техника в дорожной отрасли. М.: Дороги, 2004. №1 (28). С.33–34.

149. Батракова А.Г., Урдзик С.Н., 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. Харьков, 2013. ХНАДУ. С. 8–12.

150. Александров А.С., Сячкин О.В. Проектирование армированных асфальтобетонных слоев усиления трещиновато-блочных покрытий дорожных одежд. Совершенствование конструкций, технологий строительства и ремонта дорог в условиях Сибири. Сб. науч. тр. Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. С. 59–67.

151. Бусел А.В. Ремонт автомобильных дорог: учебное пособие. Минск: Арт-Дизайн, 2004. 208 с.

152. ОДМ 218.2.024-2012. Методические рекомендации по оценке прочности нежестких дорожных одежд. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). М., 2013. 28 с.

153. Yue Huang, Fabio Galatioto, Tony Parry. Road pavement maintenance life cycle assessment –auk case study. International Symposium on Pavement LCA 2014. Davis, California, USA. October 14-16 2014. PP.179–190.

154. Yared H Dinegdae, Björn Birgisson. Reliability-based design procedure for fatigue cracking in asphalt pavements. Transportation Research Record. SAGE Publications. 2016. PP. 127–133.

155. Корсунский М.Б. Практические методы определения напряжённо-деформированного состояния конструкций дорожных одежд. Труды СоюздорНИИ. М.: СоюздорНИИ, 1966. Вып. 6. С. 5–78.

156. Красиков О.А. Обоснование стратегий ремонта нежестких дорожных одежд: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11. Алматы, 1999. 597 с.

157. Нежесткие дороги. Отчет комитета С8 (XX Всемирный дорожный конгресс). Монреаль: PARC-AIPCR, 1995. 98 с.

158. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Акулов В.В., Валенцев Д.А., Шаталов В.Ю. Учет вероятностной составляющей при назначении проектных модулей упругости слоев асфальтобетона. Инженерный вестник Дона, 2016. № 2. С. 3–10.

159. Коганзон М.С., Яковлев Ю.М. Качество и надежность дорожного строительства: учебное пособие. М.: МАДИ, 1981. 90 с.

160. Каганович В.Е. К вопросу оптимизации сроков реконструкции и стадийности строительства автомобильных дорог. Оптимизация сроков реконструкции и стадийности строительства автомобильных дорог. Омск.: СибАДИ, 1973. С. 3–52.

161. Могилевич В.М., Слободчиков Ю.В., Сиппле Е.В., Ситников Ю.М. Некоторые результаты применения теории надежности к оценке эксплуатационного состояния дорог в северных областях Казахской ССР. Повышение транспортно - эксплуатационных показателей автомобильных дорог Казахской ССР: сб.науч.трудов. Алма-Ата.: Минавтодор КазССР, 1971. С. 11–23.

162. Ситников Ю.М., Дивочкин О.А. Стадийное улучшение транспортно-эксплуатационных качеств дорог. М.: Транспорт, 1973. 128 с.

163. Коновалов С.В., Радовский Б.С., Билан О.О. Применение метода статистических испытаний к оценке надежности и качества дорожных одежд. Автомобильные дороги в дорожном строительстве, 1977. Вып. 21. С. 63–67.

164. Слободчиков Ю.В. Обоснование оценочных показателей выбора ремонтной стратегии автомобильных дорог с нежесткими дорожными одеждами в изменяющихся условиях эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.23.11. Москва, 1995. 333 с.

165. Ababutain A.Y., Bullen A. Multicriteria. Decision-Making Model for Selection of Build-Operate-Transfer Toll Road Proposals in the Public Sector. Transportation Research Record. 2003. № 1848. P. 1–9.

166. Durango-Cohen P., Madanat S. Optimal maintenance and repair policies in infrastructure management under Uncertain Facility Deterioration Rates: an Adaptive Control Approach. Transportation Research Record. 2002. № 36 (9). PP. 763–778.

167. Maji A., Singh D., Chawla H. Developing probabilistic approach for asphaltic overlay design by considering variability of input parameters. Innov. Infrastruct. Solut. 1. (43). 2016. URL:<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s41062-016-0046-3.pdf>

168. Maji A, Das A. Reliability considerations of bituminous pavement design by mechanistic-empirical approach. Int J Pavement Eng. 2008. № 9 (1). PP.9–31.

169. Hyung Bae Kim, Seung Ho Lee. Reliability-based design model applied to mechanistic empirical pavement design. KSCE Journal of Civil Engineering. 2002. № 6 (3). PP. 263–272.

170. Noureldin S.A., Sharaf E., Arafah A., Al-Sugair F. Estimation of standard deviation of predicted performance of flexible pavements using AASHTO model. Transp Res Rec. 1994. PP. 46–56.

171. Timm D.H., Briggison B., Newcomb D.E. Variability of mechanistic–empirical flexible pavement design parameters. Proceedings of the 5th international conference on the bearing capacity of roads and airfields. Trondheim, Norway. 6-8 July, 1998. URL: <https://www.worldcat.org/title/proceedings-of-the-fifth-international-conference-on-the-bearing-capacity-of-roads-and-airfields-norwegian->

university - of - science - and - technology - trondheim - norway -6-8-july-1998/oclc/180096445.

172. Timm D.H., Newcomb D.E., Briggison B, Galambos T.V. Incorporation of reliability into the Minnesota mechanistic-empirical pavement design method. Final report prepared to Minnesota Department of Transportation, Minnesota University, Department of Civil Engineering, Minneapolis. 1999. 134 p.

173. Darter M.I., Hudson W.R., Brown J.L. Statistical variation of flexible pavement properties and their consideration in design. Proc Assoc Asph Paving Technol. 1973. № 42. PP.589–615.

174. Huang Y.H. Pavement analysis and design. Second edition. Pearson Prentice Hall Inc, Upper Saddle River. 2004. 785 p.

175. Brown SF, Pell PS. A fundamental structural design procedure for flexible pavements. In: Proceedings of the 3rd international conference of structural design of asphalt pavements. London. 1972. Vol. 1. PP. 369–381.

176. Pell PS. Pavement materials. Proceedings of The 6th international conference of structural design of asphalt pavements. 1987. Vol. 2. PP. 36–70.

177. Vyrozhemskiy V., Krayushkina K., Bidnenko N., Durable high strength cement concrete topping for asphalt roads. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. Vol. 236. 5 p.

178. Яромко В.Н., Жайлович И.Л. Совершенствование методов оценки механических свойств асфальтобетона. Наука и техника в дорожной отрасли. Москва, 2008. №04 (47). С. 23–29.

179. Яромко В.Н. Строительство автомобильных дорог. Минск. «Вышэйшая школа», 2016. 473 с.

180. Яромко В.Н. О совершенствовании проектирования дорожных одежд нежесткого типа. Наука и техника в дорожной отрасли. МАДИ (ГТУ), 2008. № 2 (45). С.28–32.

181. Веренько В.А., Занкович В.В., Макаревич А.А. Влияние параметров транспортной нагрузки на развитие деформаций дорожных покрытий. Вестник ХНАДУ, 2006. № 34-35. С.34–42.

182. Веренько В.А., Артюх С.В. Методика оценки надежности и ресурса

дорожных одежд. БНТУ, 2015. С.73–85.

183. Мозговий В.В., Ольховий Б.Ю., Куцман О.М., Прудкий О.В. Проектування асфальтобетонних шарів підсилення при капітальному ремонті автомобільних доріг з врахуванням існуючого стану дорожнього одягу. Вісник ДонНАБА, 2010. № 1. С.81–89.

184. Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Густелєв О.О., Шлюнь Н.В., Куцман О.М., Баран С.А. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами. Вісник Національного транспортного університету, 2019. №1 (43). С.26–38.

185. Мозговий В.В., Бесараб О.М., Каськів В.І., Мозговий О.В. Проектування капітального ремонту дорожніх одягів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 2010. №79. С.50–63.

186. Семенов В.А., Мекуришвили Д.Г. Опыт применения статистических методов контроля качества в строительстве и ремонте автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1988. 47 с.

187. Семенов В.А. Качество и однородность автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1989. 125 с.

188. Руденский А.В., Иванов В.Н. Применение метода конечных элементов при анализе напряжённо-деформированного состояния асфальтовых материалов в дорожных конструкциях. Труды ГипродорНИИ. Москва, 1976. Вып. 16. С. 58 –66.

189. Радовский Б.С., Заворицкий В.И., Артеменко А.В., Монский В.М. Расчет напряженно-деформированного состояния нежестких дорожных одежд МКЭ. Автомобильные дороги и дорожное строительство. Сб. Науч. Тр. Киев, 1982. С. 38–43.

190. Смирнов А.В., Малышев А.А., Агалков Ю.А. Механика устойчивости и разрушения дорожных одежд; под ред. А.В. Смирнова. Омск: СибАДИ, 1997. 91 с.

191. Городецкий А.С., Заворицкий В.И., Лантух-Ляшенко А.И., Рассказов А.О. Автоматизация расчетов транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1989. 232 с.

192. Илиополов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В. Динамика дорожных конструкций. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2002. 258 с.

193. Матуа В.П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения: дисс. ... д-ра техн. наук: спец.05.23.11. Ростов-на-Дону, 2002. 484 с.

194. Мельникова И.С. Моделирование воздействия температуры и транспортных нагрузок на возникновение и развитие трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях. Наука и техника, 2012. № 4. С. 44–52.

195. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.

196. Дегтев А.В., Гладков В.Ю. Метод расчета напряжений в верхнем слое дорожной конструкции при наличии шва в основании. Труды Союздорнии, 1990. С. 100–109.

197. Кульчицкий В.А. Изгиб трехслойной пластины на упругом основании. Деп. В ВИМИ. Рег. № Д 06988, 1985. 12 с.

198. Целых Д. С., Привалов О. О. Устройства для анализа и оценки состояния дорожного покрытия. Технические науки: теория и практика: материалы междунар. науч. конф., г. Чита, апрель 2012. Чита, 2012. С. 74–78.

199. ВСН 6-90. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Москва. Минавтодор РСФСР, 1990. 168 с.

200. Справочная энциклопедия дорожника. Т. II. Ремонт и содержание автомобильных дорог / под ред. А.П. Васильева. М., 2004. 805 с.

201. Zakeri H., Nejad F.M., Fahimifar A., Torshizi A.D., Zarandi M.H.F. A multi-stage expert system for classification of pavement cracking. In: IFSA world congress and NAFIPS annual meeting (IFSA/NAFIPS). 2013. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6608558>.

202. Jahanshahi M.R., Kelly J.S., Masri S.F., Sukhatme G.S. A survey and evaluation of promising approaches for automatic image-based defect detection of bridge structures. Struct Infrastruct Eng. 2009. № 5(6). PP. 455–486.

203. Schnebele E., Tanyu B.F., Cervone G., Waters N. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. Eur. Transp. Res.

Rev. 2015. № 7(2). PP.1–19.

204. ВБН В. 2. 3 - 218 - 186 - 2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. [Чинний від 01. 01. 2005 р.] Київ. Укравтодор, 2004. 151 с.

205. Zakeri H., Nejad F.M., Fahimifar A. Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: A review. Springer. Barcelona, Spain 2016. 43 p. URL: <http://piarc.rmtto.ir/DocLib4/springerbf6c2a5-7b60-20160924012052.pdf>

206. ОДН 218.0.006-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. [Действующий от 2002–10-03]. М.: Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства России (Росавтодор), 2002. 196 с.

207. Pavement condition executive summary: Report MnDOT/OMRR-PM-2011-01. Minnesota: Department of Transportation Minnesota, 2011. 26 p.

208. Дмитриев Н.Н. Основы контроля и диагностики аэродромных покрытий. К.: УТУ, 1998. 240 с.

209. Кіяшко І.В., Новаковський Д.М. Метод визначення властивостей асфальтобетону під дією динамічного навантаження за аналізом параметрів поверхневих хвиль. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К.: НТУ, 2009. Вип. 77. С. 8–10.

210. Кіяшко І.В., Новаковський Д.М., Пархоменко О.Ю. Контроль якості влаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу неруйнівним методом. Автошляховик України, 2009. №5. С. 32–34.

211. Белятинський А.О., Кривенко Ю.М. Спосіб безперервного дистанційного контролю стану поверхні злітно-посадкових смуг аеродромів та автодоріг. «АВІА – 2011»: X Міжнародна науково-технічна конференція: зб. наук. праць. К.: НАУ, 2011. Т. 3. С.24.9–24.10.

212. Васильев А.П. Апестин В.К., Баловнев В.И. Справочная энциклопедия дорожника: в 5 т. М.: Информавтодор, 2004. Т. 2: Ремонт и содержание автомобильных дорог. 507 с.

213. Павлюк Д.О, Лебедев О.С., Павлюк В.В., Павлюк В.В., Рибіцький Л.Л. та ін. Універсальне дорожнє вимірювальне обладнання «УДВО-НТУ».

Автошляховик України, 2011. № 1. С. 40–48.

214. Staniek M. Detection of cracks in asphalt pavement during road inspection processes. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2017. № 96. PP. 175–184.

215. Kim Young S., Hyun S. Yoo, Jeong H. Lee, Seung W. Han. Chronological development history of X-Y table based pavement crack sealers and research findings for practical use in the field. *Automation in Construction*. 2009. № 18 (5). PP. 513–524.

216. Nejad Moghadas, Fereidoon, Hamzeh Zakeri. A comparison of multi-resolution methods for detection and isolation of pavement distress. *Expert Systems with Applications*. 2011. № 38(3). PP. 2857–2872.

217. Starck Jean-Luc, Fionn Murtagh, Emmanuel J. Candès, David L. Donoho. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2003. № 12(6). PP. 706–717.

218. Moussa Ghada, Hussain Khaled. A new technique for automatic detection and parameters estimation of pavement crack. *Fourth International Multi-conference on Engineering Technology Innovation, IMETI*. 2011. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0cdc/86650ec3dbed96e01a2bc5ecac05e6ab6002.pdf>.

219. Вирожемський В. К., Бабяк І. П., Бідненко Н. М. Сучасний європейський метод неруйнівної діагностики мостових конструкцій. *Дороги і мости*, 2019. Вип. 19-20. С. 38–53.

220. Byrne Matthew, Tony Parry, Ricardo Isola, Andrew Dawson. 2013. Identifying road defect information from smartphones. *Road and Transport Research*. 2013. № 22(1). PP. 39–50.

221. Kodippily Sachi, Irina Holleran, Erik Glynn. 2016. Characterising bitumen binders for pavements in the Auckland region. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*. 2016. № 25(4). PP. 27–38.

222. Oliveira H., Correia P.L. Automatic road crack detection and characterization. *IEEE Trans Intell Transp Syst*. 2013. № 14(1). PP. 155–168.

223. Adu-Gyamfi Y., Okine N.A., Garateguy G., Carrillo R., Arce G.R.

Multiresolution information mining for pavement crack image analysis. *J Comput Civ Eng.* 2011. № 26 (6). PP. 741–749.

224. Chua K.M., Xu L. Simple procedure for identifying pavement distresses from video images. *J Transp Eng.* 194. № 120 (3). PP. 412–431.

225. Tsai Y., Kaul V., Yezzi A. Automating the crack map detection process for machine operated crack sealer. *Autom Constr.* 2013. № 31. PP. 10–18.

226. Ying L., Salari E. Beamlet transform-based technique for pavement crack detection and classification. *Comput Aided Civ Infrastruct Eng.* 2010. № 25 (8) PP. 572–580.

227. Cord A., Chambon S. Automatic road defect detection by textural pattern recognition based on AdaBoost. *Comput Aided Civ Infrastruct Eng.* 2012. № 27 (4). PP. 244–259.

228. Nishikawa T, Yoshida J, Sugiyama T, Fujino Y. Concrete crack detection by multiple sequential image filtering. *Comput Aided Civ Infrastruct Eng.* 2012. № 27(1) PP. 29–47.

229. Tsai Y-C, Kaul V, Mersereau R.M. Critical assessment of pavement distress segmentation methods. *J Transp Eng.* 2009. № 136 (1). PP. 11–19.

230. Image Based Techniques for Crack Detection, Classification and Quantification in Asphalt Pavement: A Review H. Zakeril. Fereidoon Moghadas Nejadl. Ahmad Fahimifar1 CIMNE. Barcelona, Spain. Springer. 2016. 47 p.

231. Xu G., Chen F., Wu G., Li X. Active solution of homography for pavement crack recovery with four laser lines. *Scientific Reports.* № 8. 2018. PP.1–10. URL: https://www.researchgate.net/publication/325020673_Active_solution_of_homography_for_pavement_crack_recovery_with_four_laser_lines#fullTextFileContent.

232. Bitelli G., Simone A., Girardi F., Lantieri C. Laser Scanning on Road Pavements. A New Approach for Characterizing Surface Texture. *Sensors* № 12. 2012. PP. 9110–9128. URL: <https://www.researchgate.net/publication/231212253>.

233. Новаковський Д. М. Удосконалення методів контролю якості влаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11. Харків, 2012. 183 с.

234. Xin Qiu, Qing Yang, Feng Wang. Diagnostic analysis of dynamic deflection for cracked asphalt pavements under FWD impulsive loading. *Journal of Vibroengineering*. 2014. Vol. 16, Issue 5. PP. 2426–2437.

235. Grenier S., Konrad J.M. Evaluation of the influence of asphalt concrete pavement discontinuities on falling weight deflectometer measurements. *Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Rotterdam. 2002. PP. 617–627.

236. Mehta Y., Roque R. Evaluation of FWD data for determination of layer moduli of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003. Vol. 15. Issue 1. PP. 186–195.

237. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Transportation research board. National research council. Washington, D.C. 2004. 219 p.

238. Yingjie Deng, Qun Yang. Rapid evaluation of a transverse crack on a semi-rigid pavement utilising deflection basin data. *Road Materials and Pavement Design*. 2019. Volume 20. Issue 4. PP. 929–942.

239. Weiguang Zhang, Muhammad Arfan Akber, Shuguang Hou, Jiang Bian, Dong Zhang, Qiqi Le. Detection of dynamic modulus and crack properties of asphalt pavement using a non-destructive ultrasonic wave method *appl. Sci.* 2019. № 9(15). 2946 p.

240. Мельникова И.С., Дайнеко К.Н. Выявление дефектов дорожных асфальтобетонных и цементобетонных покрытий тепловизионным методом и автоматизированная обработка результатов контроля. *Вестник Белорусско-Российского университета*, 2016. № 3 (52) С. 136–145.

241. Weil G.J., Haefner L.E. Toward an integrated nondestructive pavement testing management information system using infrared thermography. *Transportation research record 1215*. Transportation Research Board, National Research Council. 1989. Washington: D.C. P. 124–131.

242. Дмитрієв М.М., Деркачов О.Б., Папченко О.М., Дорошенко Ю.В. Застосування тепловізорів для не руйнуючого контролю аеродромних покриттів. *Вісник НТУ: Науково-технічний збірник*, 2004. № 9. С. 67–70.

243. Батракова А.Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11. Харків, 2014. 390 с.

244. Josef Stryk. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*. 2008. Vol 5, No 1. 9 p.

245. Jol Harry M. Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V. 2009. 508 p.

246. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43. PP. 119–138.

247. Hubbard S.S., Peterson J.E., Majer E.L. Estimation of permeable pathways and water content using tomographic radar data. *The Leading Edge*. 1997. № 16. PP. 1623–1628.

248. Forest R., Pynn J., Alani A., Ferne B. The Use of Ground Penetrating Radar for the Monitoring of Road Properties. In: *TRL annual research review 2003*. Crowthorne: TRL. 2004. PP. 25–37.

249. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие для студ. высш. уч. завед.: М.: МГУ, 2004. 153 с.

250. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.

251. Utsi V., Utsi E. Measurement of reinforcement bar depths and diameters in concrete. In: *10th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 21-24 June. 2004. PP. 659–662.

252. Lahouar S., Al-Qadi L. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. *NDT and E International Journal*. 2008. Vol. 41. № 2 PP.69–81.

253. Al-Qadi L., Lahouar S. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar. *Materials Evaluation*. 2005. Vol. 63. № 9. PP. 921–925.

254. Wong K.T., Urbaez E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. *Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference*. Perth, Australia: Proceedings. 2012. PP. 1–13.

255. Maser K.R., Holland T.J., Roberts R., Popovics J. NDE methods for

quality assurance of new pavement thickness. *International Journal of Pavement Engineering*. 2006. Vol.7. № 1. PP.1–10.

256. Huston D.R., Pelczarski N.V., Esser B., Maser K.R.. Damage detection in roadways with ground penetrating radar. *Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Gold Coast, Australia: Proceedings. 2000. PP. 91–94.

257. Батракова А.Г. Определение толщины конструктивных слоев дорожных одежд с помощью георадара. *Строительство и реконструкция*. Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012. № 6 (44). С. 75–81.

258. Р.В. 2.3-218-02071168-781:2011. Рекомендації щодо визначення товщини конструктивних шарів існуючого дорожнього одягу. [Чинний від 2001-12-12]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2011. 58 с.

259. Rmeili E., Scullion T. Detecting Stripping in Asphalt Concrete Layers Using Ground Penetrating Radar. *Transportation Research: Record 1568*, Jan. 1997. Washington: TRB. 1997. PP. 165–167.

260. Scullion T., Lau C.L., Chen Y. Pavement evaluations using ground penetrating radar in Texas. *5th Int'l Conference on GPR*, 12–16 June, 1994. Kitchener, Ontario: Proceedings. 1994. Vol. 1. PP. 449–463.

261. Abdullah R., Zulhaidi H. Shafri, Mardeni R, Khatun Sabira. Evaluation of Road Pavement Density Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2009. Vol. 2. PP. 100–111.

262. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме. *Геофизика*, 2010. № 4. С. 76–80.

263. Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic detection of soil water content. *Canadian Journal Remote Sense*. 1977. Vol. 1 (3). PP. 76–86.

264. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resource*. 1980. Vol. 16 (3). PP. 574–582.

265. Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys: Prospect*. 1989. Vol. 37. PP. 531–551.

266. Батракова А.Г., Урдзик С.Н., Процюк В.А. Применение георадаров

для оценки влажности и инфильтрации в слоях конструкций дорожных одежд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: зб. наукових праць, 2012. Вип. 83. С. 13–18.

267. Grote K., Hubbard S., Harvey J., Rubin Y. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 2005. №57. PP. 129–153.

268. Методика дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування: М 02071168-706:2012. [Чинний від 2013-02-12]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2013. 61 с.

269. Forest R., Utsi V. Non destructive crack depth measurements with Ground Penetrating Radar in Slob, E, Yarovoy, A and Rhebergen, J (eds). *The Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*. 2004. Vol 2. PP. 799–802.

270. Li Shengli, Wang Chaoqun, Sun Panxu, Wu Guangming, Wang Dongwei. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016. № 8(12). PP.1–10.

271. Nectaria Diamanti, David Redman. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracksю *Journal of Applied Geophysics*, 2012. Volume 81. PP. 106–116.

272. Ahmad N., Wistuba M., Lorenzl H. GPR as a crack detection tool for asphalt pavements: Possibilities and limitations. 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Shanghai. 2012. PP. 551–555.

273. Erica Carrick Utsi. *Ground Penetrating Radar: Theory and Practice*. Butterworth - Heinemann. 2017. 224 p.

274. M Miskiewicz, J Lachowicz, P Tysiac, P Jaskula, K Wilde. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 356. 2018. 8 p.

275. J.Q. Shang, J.A. Umana, F.M. Bartlett, J.R. Rossiter. Measurement of complex permittivity of asphalt pavement materials. *Journal of Transportation Engineering*. 1999. Vol. 125. № 4. PP. 347–356.

276. R. Mardeni, R. Raja Abdullah, H.Z.M. Shafri. Road pavement density

analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system. Progress In Electromagnetics Research B. 2010. Vol. 21. P. 399–417.

277. I.L. Al-Qadi, S. Lahouar. Measuring layer thicknesses with GPR: Theory to practice. Construction and Building Materials. 2005. № 19. PP. 763–772.

278. L. Al-Qadi, S. Lahouar. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar. Materials Evaluation. 2005. Vol. 63. № 9. PP. 921–925.

279. Saarenketo T. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys. PhD thesis, Faculty of Science. Department of Geosciences. University of Oulu. 2006. 127 p.

280. Noor Ahmad. Crack detection in asphalt pavements by means of Ground Penetrating Radar (GPR), Institut für Straßenwesen Braunschweig. 2016. 153 p.

281. Imad L. Al-Qadi, Tom Scarpas, Andreas Loizos. Pavement cracking: mechanisms, modeling, detection, testing and case histories. CRC Press, 2008. 930 p.

282. Lech Krysiński, Jacek Sudyka. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. Journal of Applied Geophysics. 2013. Volume 97. PP. 27–36.

283. Капустин В.В., Денисов Р.Р., Мойшнен Л.О. Применение георадарного метода в квазиоднородных средах. «ЭМЗ-2011»: 5-я Всероссийская школа-семинар им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли: сб. материалов, 2011. Т. 2. С. 343–346.

284. Andrea Benedetto, Lara Pajewski. Civil engineering applications of ground penetrating radar. Springer. 2015. 371 p.

285. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.

286. Daniels D. J. Surface penetrating radar. Electronics & Communication Engineering journal. August 1996. PP. 165–182.

287. Annan A. P. GPR-Principles, Procedures & Applications. Sensors and Software. Mississauga, Canada. 2004. 286 p.

288. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.

289. Levatti H., Prat P., Ledesma A., Cuadrado A., Cordero J. Experimental analysis of 3D cracking in drying soils using ground-penetrating radar. *Geotechnical Testing Journal* 40. 2017. No. 2. PP. 221–243.

290. Беркут А.И., Васильев А.Г., Козляков А.Н., Копейкин В.В., Морозов П.А. Опыт применения георадиолокации в геофизике. URL: <http://geo-radar.ru/publish/pub4.php#1>

291. Копейкин В.В. Первичная обработка георадарных сигналов. URL: <http://www.geo-radar.ru/articles/article3.php>

292. Annan A. P. Electromagnetic principles of GPR. In: *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. 1st edition, Elsevier Science. Amsterdam. 2009. PP. 1–37.

293. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В.А. Кутев; под ред. М.И. Финкельштейна. М.: Советское Радио, 1977. 176 с.

294. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). М.: Наука, 1982. 337 с.

295. Батракова А.Г., Урдзік С.М., Процюк В.О. Алгоритм позиціонування та ідентифікації підповерхневих дефектів в конструктивних шарах дорожніх одягів з використанням георадарного обладнання. Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов: международная научно-практическая конференция с участием студентов и молодых ученых. 1 - 4 ноября, 2012. Харьков, ХНАДУ: материалы конференции. Х.: ХНАДУ, 2012. С. 35–40.

296. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Имомназаров Х.Х., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли. Новосибирск: СО РАН, 2010. 405 с.

297. Uus A., Liatsis P., Slabaugh G.G., Anagnostis A., Roberts S., Twist S. Trend deviation analysis for automated detection of defects in GPR data for road condition surveys. *Proceedings of the 23rd International Conference on Systems,*

Signals and Image Processing. 23-25 may 2016. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7502765>.

298. Sandmeier K.J. Geophysical research. ReflexW Manual. 2019. 362 p. URL: www.sandmeier-geo.de/Download/reflexw_manual_a4_booklet.pdf.

299. Solla M., Nunez-Nieto X., Varela-Gonzalez M., Martinez-Sanchez J., Arias P. GPR for Road inspection: georeferencing and efficient approach to data processing and visualization, in 15th International Conference on Ground Penetrating Radar - GPR. June 30 - July 4, 2014. Brussels, Belgium. 2014. PP. 913–918.

300. Батракова А.Г. Оценка состояния дорожных одежд с привлечением георадарных технологий: монографія. Харків: ХНАДУ, 2013. 152 с.

301. Miskiewicz M., Lachowicz J., Tysiac P., Jaskula P., Wilde K. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 356. 2018. 8 p.

302. Liu D., Deng Y., Yang F. et al. Nondestructive testing for crack of tunnel lining using GPR. J Cent. South Univ. Technol. 2005. № 12. PP. 120–124.

303. Dera Abdallah Alhadi. Assessment of highway condition using combined geophysical surveys. Doctoral Dissertations. Faculty of the Graduate School of the Missouri university of science and technology. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree doctor of philosophy in geological engineering. 2016. 169 p.

304. Francisco F., Jorge P., Mercedes S., Mattia F., Andrea B., Luca C. GPR dipoles orientation in road pavement cracking identification. 20th EGU General Assembly. Proceedings from the conference held 4-13 April. 2018. Vienna, Austria. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-16166-3.pdf>.

305. Guo Shi-li, Yan Fei, Zhu Pei-min, Li Xiu-zhong. Numerical study on response of ground penetrating radar wave field to crack width. Progress in Geophysics. 2016. Vol 31. Issue 04. PP.1803–1808.

306. Francisco M.Fernandes, Jorge C.Pais. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR Construction and Building Materials. 2017. Volume 154. PP. 1130–1138.

307. Батракова А.Г., Урдзик С.Н. Исследование напряженно -

деформированного состояния дорожных одежд с сеткой подповерхностных трещин. Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг: міжнародна науково-технічна конференція. 4 – 5 листопада, 2016. Харків, ХНАДУ. матеріали конференції. Х.: ХНАДУ, 2016. С. 43–48.

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

309. Батракова А.Г., Урдзик С.Н., Пархоменко А.А. Модель оценки текущего состояния дорожных одежд по результатам георадарной диагностики. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Пермь: ПНИПУ, 2014. № 2, С. 14–29.

310. Патент на винахід. 113916 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці / Батраков Д.О., Урдзік С.М., Почанін Г.П., Батракова А.Г.; – а201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6/2017.

311. Pochanin Gennadiy P., Masalov Sergey A., Ruban Vadym P., Kholod Pavlo V., Batrakov Dmitriy O., Batrakova Angelika G., Varianytsia-Roshchupkina Liudmyla A., Urdzik Sergey N., Pochanin Oleksandr G. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying. in: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. CRC Press - Taylor & Francis Group. London. 2016. PP. 20–65.

312. Batrakov D.O., Beloshenko K.S., Antyufeyeva M.S., Batrakova A.G., Urdzik S.N. 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.

313. Батраков Д.О., Головин Д.В., Батракова А.Г., Урдзик С.Н. Метод Т-матриц и расчет поляризационных характеристик полей, рассеянных двумерным включением в плоскостростой среде. Вестник ХНУ - радиофизика и электроника. Х., 2013. № 1094. Вып. 23. С. 60–65.

314. Pochanin G.P., Ruban V.P., Batrakov D.O., Batrakova A.G., Urdzik S.N. Measuring of thickness of the asphalt pavement with use of GPR. Proceedings International Radar Symposium. 16-18 June 2014. Gdansk. PP. 452–455.

315. Батракова А.Г., Галащук И.Б., Урдзик С.Н. Обследование дорожных одежд методами подповерхностной радиолокации. Науковий вісник будівництва. Х.: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. Вип. 59. С. 283–288.

316. Батракова А.Г., Урдзик С.Н., Процюк В.А. Исследование возможностей применения георадара «Одяг» для поиска и идентификации подповерхностных дефектов в конструкциях дорожных одежд. Science – Future of Lithuania. Transport engineering and management: 15th Conference for Lithuania Junior Researches. 4 May 2012. Vilnius, Lithuania: Proceedings. Vilnius: Technique. 2012. С. 138–143.

317. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

318. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие. Изд. 3-е, переработанное и дополненное. М.: Радиотехника, 2007. 744 с.

319. Ground penetrating radar, theory and applications. Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B.V. 2009. 508 p.

320. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 190 с.

321. Судакова М.С. Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. Москва, 2009. 125 с.

322. Батракова А.Г., Ряпухин В.М., Галащук И.Б. Георадарні дослідження дорожніх одягів: монографія. Харків: ХНАДУ, 2011. 156 с.

323. Батракова А.Г., Процюк В.О., Урдзік С.М. Дослідження електрофізичних характеристик дорожньо-будівельних матеріалів. Містобудування та територіальне планування: науково-технічний збірник. К.: КНУБА, 2011. Вип. 40. Ч. I. С. 93–97.

324. Капустин В.В., Сеницын А.В. Применение способов автоматизированного определения диэлектрической проницаемости среды при

решении прикладных задач георадиолокации. Геофизика, 2014. № 6. С. 39 - 45.

325. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.

326. Патент на корисну модель. 81296 Україна, (51) МПК E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01). Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П.; заявник та патентоутримувач Батракова А.Г., Батраков Д.О., Почанін Г.П., Орленко О.А. – u201300256; заявл. 08.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013.

327. Diamanti N., Redman D., Giannopoulos A. Study of GPR vertical crack responses in pavement using field data and numerical modeling. Proceedings of 13-th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 2010. PP. 21–25.

328. Гончарский А.В., Овчинников С.Л., Романов С.Ю. Обратные задачи волновой диагностики дорожного полотна. Вычислительные методы и программирование, 2009. Т.10. С. 275–280.

329. Соколов М.А. Разработка математического обеспечения для решения задачи классификации подповерхностных объектов по сигналам геолокатора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11. Санкт-Петербург, 2002. 16 с.

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

331. Батраков Д.О. Обработка импульсных сигналов при толщинометрии биологических тканей и неразрушающем контроле. Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Серія: «Радіофізика та електроніка». Х.: ХНУ, 2016. Вип. 25. С. 48–52.

332. Batrakov D.O., Golovin D.V., Simachev A.A., Batrakova A.G. Hilbert transform application to the impulse signal processing. Proceedings of UWBUSIS'2010. Sevastopol, Ukraine. September 6-10, 2010. PP. 113–115.

333. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и

пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.

334. Peng Cao, Changjun Zhou, Decheng Feng, Youxuan Zhao, Baoshan Huang. 3D direct vehicle-pavement coupling dynamic model and its application on analysis of asphalt pavement dynamic response. *Mathematical problems in engineering*. 2013. Article ID 394704. Research Article. PP. 1–9.

335. R. F. Soares. Finite element analysis of the mechanics of viscoelastic asphaltic pavements subjected to varying tire configurations. A Thesis presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska In Partial Fulfillment of Requirements For the Degree of Master of Science. Lincoln, Nebraska. November, 2005. 119 p.

336. Фиалко С.Ю. О методах решения большеразмерных задач строительной механики на многоядерных компьютерах. *Инженерно-строительный журнал*, 2013. № 5 (40). С. 116–124.

337. Приварников А.К. Пространственная деформация многослойного основания. В кн.: Устойчивость и прочность элементов конструкций. Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. ун-та, 1973, С. 27–45.

338. Радовский Б.С., Мозговой В.В. Определение напряжений в покрытии как вязкоупругом слое при колебаниях температуры. *Труды Союздорнии. Исследования по механике дорожной одежды*. Москва, 1985. С. 121–132.

339. Корочкин А.В. Элементы теории и практика повышения технико-эксплуатационных показателей жесткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11. Москва, 2014. 49 с.

340. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Под ред. Н.А. Пузакова, И.А. Золотаря, В.М. Сиденка. М.: Транспорт, 1971. 416 с.

341. Пахомов А.А., Радовский Б.С. О влиянии вариации модулей упругости и толщины слоев на напряженно-деформированное состояние многослойной дорожной одежды. Совершенствование методов проектирования дорожных одежд нежесткого типа. Москва, 1983. С. 129–133.

342. Коновалов С.В., Радовский Б.С. К оценке надежности дорожных покрытий с учетом повторности воздействия нагрузок. М.: Труды МАДИ, 1974. Вып.84. С.11–18.

343. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска. Саратов. СГТУ, 1994. Ч 1, 2. 232 с.

344. Столяров В.В. Введение в теорию риска. Повышение эффективности эксплуатации транспорта: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С. 118–139.

345. AASHO. The AASHO road test. Special Report 61A – 61G. Highway Research Board. Washington, D.C., USA. 1961. 12 p.

346. Батракова А.Г., Урдзик С.Н. Критерии оценки состояния дорожных одежд по результатам диагностики. Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр., 2015. Вип. 68. С. 92–98.

347. П-Г.1-218-113:2009. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України. [Чинний від 2009-07.01]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2009. 258 с.

348. Телтаев Б.Б., Мерзликин А.Е. Сравнение результатов расчета напряженно-деформированного состояния конструкции нежесткой дорожной одежды методами полуаналитическим и конечных элементов. Дороги и мосты, 2006. № 1. С. 59–66.

349. Гамеяк І.П., Шевчук В.Р. Модель оцінки руйнівного впливу великовантажних транспортних засобів на монолітні шари нежорсткого дорожнього одягу. Вісник ЦНЦ ТАУ, 1999. № 2. С. 82–85.

350. Радовский Б.С., Супрун А.С., Казаков И.И. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. К.: Будівельник, 1989. 168 с.

351. Процюк В.О. Экспрес-метод оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11. Харків, 2019. 234 с.

352. Батракова А.Г., Галащук І.Б. Визначення геометричних параметрів дорожніх одягів за допомогою наносекундних імпульсів. Проблеми розвитку міського середовища: науково-технічний збірник. К.: НАУ, 2012. № 7. С. 17–21.

353. Гольдштейн Ю.Б. Основы механики твердого деформируемого тела. Учеб. пособие. Петрозаводск: изд-во ПетрГУ, 2005. 872 с.

354. Кокодеева Н.Е. Методологические основы комплексной оценки

надежности автомобильных дорог в системе технического регулирования дорожного хозяйства: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.11. Санкт-Петербург, 2012. 322 с.

355. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

356. Сеницын А.П. Расчет конструкций на основе теории риска. М.: Стройиздат, 1985. 304 с.

357. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1995. 352 с.

358. ГОСТ 34100.3 - 2017 / ISO / IEC Guide 98 - 3:2008, IDT. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. [Дата введения 2018 - 09 - 01]. Москва. Стандартиформ, 2018. («Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement», IDT). 192 с.

359. Столяров В.В., Бажанов А.П. Совершенствование методов применения принципов технического регулирования в дорожной деятельности: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 212 с.

360. Кокодеева Н.Е., Столяров В.В. Технический анализ состояния дорожных конструкций в жизненном цикле автомобильной дороги на основе теоретико - вероятностного подхода. Автомобильные дороги, 2011. № 6. С. 66–67.

361. Батракова А.Г., Урдзик С.Н., Галащук И.Б. Совершенствование георадарных технологий при обследовании дорожных одежд. Автошляховик України: науково - виробничий журнал. Київ, 2010, №5. С. 36–42.

362. Батракова А.Г., Дорожко Є.В., Урдзік С.М. Геоінформаційне забезпечення систем управління станом покриття. Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник. Серія: Технічні науки. Харків: ХНУМГ, 2019. № 147. С. 27–34.

363. Pochanin G. P., Ruban V. P., Kholod P. V., Shuba O. A., Pochanina I. Ye. Batrakova A. G., Batrakov D. O., Golovin D. V., Urdzik S.N. 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.

364. Посібник № 1 Контроль якості будівництва автомобільних доріг загального користування до ДБН В.2.3 - 4:2015 Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. Київ, 2017. 125 с.

365. М 02071168-725:2013. Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2013. 52 с.

366. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф. Підвищення довговічності асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг і аеродромів за рахунок застосування нових полімерних матеріалів. Дороги і мости, 2010. Вип. 12. С. 140–144.

367. Jill M. Holewinski, See-Chew Soon, Andrew Drescher, Henryk Stolarski. Investigation of Factors Related to Surface-Initiated Cracks in Flexible Pavements: Final Report MN/RC - 2003-07. Department of Civil Engineering: University of Minnesota. 2003. 191 p.

368. Грушко И.М., Сиденко В.М. Основы научных исследований. Х.: ХНУ, 1983. 224 с.

369. ІН В.3.1-218-336:2010 Инструкция по определению уровней эксплуатационного состояния автомобильных дорог государственного значения и их элементов. [Чинний від 2010-01-01]. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2019. 25 с.

370. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys: ASTM D 6433 – 11. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2011. 49 p.

371. Демишкан В. Ф. Совершенствование управления состоянием автомобильных дорог в условиях ограниченных ресурсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11. Харьков, 2000. 171 с.

372. Орлов А.И. Двухвыборочный критерий Вилкоксона – анализ двух мифов. Научный журнал КубГАУ, 2014. №104 (10). С.91–111.

373. Батракова А.Г., Урдзик С.Н. Влияние положения нагрузки на напряженно - деформированное состояние конструкции дорожной одежды. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: збірник наукових праць, 2017. Вип. 6. С. 16–25.

374. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций. М.: РОСАВТОДОР, 2003. 38 с.

375. Настанова з експлуатування апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ-1». Харків: ХНАДУ, 2012. 72 с.

376. Настанова користувача програмного забезпечення до апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ-1» GPR Profile Viewer (GPR Proview). Харків: ХНАДУ, 2012. 72 с.

377. Патент на корисну модель. 108136 Україна, (51) МПК E01C23/00, G01R 29/08 (2006.01). Спосіб виявлення підповерхневих тріщин у асфальтобетонному покритті дороги під час руху діагностичної лабораторії в транспортному потоці / Батраков Д.О., Урдзик С.М., Почанін Г.П., Батракова А.Г.; – а201511191; заявл. 13.11.2015; опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13/2016.

378. ДСТУ 8824:2019 Автомобільні дороги. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку. [Чинний від 2019-10-01]. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2019. 36 с.

379. Довідник № 1 розрахункових характеристик ґрунтів, матеріалів покриття і основи дорожнього одягу та навантажень від транспортних засобів. Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор). Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ). Київ, 2017. 87 с.

380. СОУ 42.1-37641918-081:2017 Автомобільні дороги. Норми часу на контроль якості матеріалів та робіт. [Чинний від 2017-06-01]. Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор). Київ, 2017. 89 с.

381. СОУ 42.1-37641918-071:2018 Автомобільні дороги. Ресурсні елементні кошторисні норми на роботи з експлуатаційного утримання. [Чинний від 2018-04-01]. Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор). Київ, 2018. 313 с.

382. СОУ 42.1-37641918-035:2018 Автомобільні дороги. Ресурсні

елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. [Чинний від 2018-04-01]. Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор). Київ, 2018. 361 с.

383. ДБН А.2.1-1-2008 Інженерні вишукування для будівництва. [Чинний від 2008-07-01]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. Київ, 2008. 128 с.

384. ВСН 21-83 Указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог. Минавтодор РСФСР. М.: Транспорт, 1985. 126 с.

385. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно - эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 352 с.

386. Батракова А.Г., С.Н. Урдзик, Д.О. Батраков. Динамические и эконометрические модели прогнозирования состояния автомобильных дорог. Вестник ХНАДУ: Сб. научн. тр., 2019. Вип. 85. С. 59–65.

ДОДАТОК А

Оцінювання відтворюваності результатів вимірювань

А.1 Оцінювання відтворюваності результатів вимірювань за метрологічними характеристиками георадару

Основним параметром, що характеризує відтворюваність результатів вимірювань за допомогою радіоелектронної апаратури є максимальна похибка вимірювань та дисперсія відтворюваності.

Вихідними даними для оцінювання максимальної похибки вимірювань є кількість відліків сигналу у розгортці та розгортка, що встановлюється у вимірюваннях. Кількість відліків сигналу (k) та розгортка (T) приймаються відповідно до паспортних даних георадару, що був застосований під час експериментальних досліджень.

Максимальна похибка вимірювань визначається:

$$\Delta \max = \left(\frac{T}{k} \right) \times m, \quad (\text{A.1})$$

де $\Delta \max$ – максимальна похибка вимірювань, нс;

T – розгортка, що встановлюється під час проведення експериментальних досліджень, нс;

k – кількість відліків у сигналі;

m – точність визначення максимуму сигналу у відліках.

Оскільки похибка вимірювань є випадковою величиною, вона підкорюється нормальному закону розподілу. Для рівня надійності 0,95 можна прийняти, що $\Delta \max = 2\sigma$. Тут σ - середньоквадратичне відхилення. Тоді, враховуючі (A.1), середньоквадратичне відхилення визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{T \times m}{2 \times k}. \quad (\text{A.2})$$

Дисперсія відтворюваності дорівнює:

$$D = \sigma^2 = \left(\frac{T \times m}{2 \times k} \right)^2, \quad (\text{A.3})$$

де D - дисперсія, що обумовлена технічними характеристиками георадару.

Вимірювання відтворювані, якщо виконується умова:

$$D < S^2, \quad (\text{A.4})$$

де S^2 - дисперсія експериментальних вимірювань, що обумовлена неоднорідністю параметрів експериментальних моделей та умов проведення експерименту.

Відповідно до паспортних даних георадару «ОДЯГ» та умов проведення експериментальних досліджень з визначення глибини розташування прихованих тріщин приймаємо:

а) розгортку $T=5$ нс, $T=10$ нс, $T=20$ нс;

б) кількість відліків у сигналі $k=1024$;

в) точність визначення максимуму сигналу $m=5$ нс.

Тоді, згідно з (А.3) дисперсія вимірювань, що обумовлена технічними характеристиками георадару, дорівнює:

а) розгортка $T=5$ нс:

$$D = \left(\frac{5 \times 5}{2 \times 1024} \right)^2 = 0,000149;$$

б) розгортка $T=10$ нс:

$$D = \left(\frac{10 \times 5}{2 \times 1024} \right)^2 = 0,000596;$$

в) розгортка $T=20$ нс:

$$D = \left(\frac{20 \times 5}{2 \times 1024} \right)^2 = 0,00238.$$

Для перевірки умови (А.4) необхідно визначити дисперсію експериментальних вимірювань, що обумовлена неоднорідністю параметрів експериментальних моделей та умов проведення експерименту

А.2 Оцінювання відтворюваності результатів експериментальних вимірювань

Оцінювання відтворюваності результатів експериментальних вимірювань проводиться за критерієм Кохрена для рівня значимості $q=0,95$. Результати експериментальних вимірювань вважаються відтворюваними, якщо виконується умова [368.]:

$$G_p \leq G_{кр} = G(q, f, N), \quad (\text{А.5})$$

де G_p - розрахунковий критерій Кохрена за результатами експериментальних вимірювань;

$G_{кр}$ - граничне значення критерію Кохрена;

q - рівень значимості, $q=0,95$;

f - кількість степенів свободи, що дорівнює кількості вимірювань у серії експериментів;

N - кількість серій експериментів.

Розрахунковий критерій Кохрена за результатами експериментальних вимірювань визначають за формулою [368]:

$$G_p = \frac{\max S_i^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (\text{А.5})$$

де G_p – розрахунковий критерій Кохрена;

$\max S_i^2$ – максимальне значення дисперсії із кількості паралельних серій експериментів (N).

Максимальну дисперсію визначають за формулою [368]:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \times \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2, \quad (\text{A.6})$$

де S_i^2 – дисперсія результатів експериментальних вимірювань в i -ї серії.

\bar{Y}_i – математичне очікування результатів експериментальних вимірювань в i -ї серії;

m – кількість паралельних експериментальних вимірювань;

Y_{ij} – параметр, що визначається за j експериментальними вимірюваннями в i -ї серії.

Математичне очікування результатів експериментальних вимірювань визначається за формулою [368]:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{m} \times \sum_{j=1}^m Y_{ij}. \quad (\text{A.7})$$

Однім із завдань георадарної діагностики нежорсткого дорожнього одягу є визначення глибини розташування прихованих тріщин у монолітних шарах покриття і зміцнених шарах основи. Результати експериментальних вимірювань викладено у третьому розділі дисертації.

Основним параметром, що визначається за результатами георадарного зондування є часова затримка сигналу георадару – час проходження сигналу через конструкцію, що досліджується. За величиною затримки сигналу визначають глибину розташування тріщини у конструкції дорожнього одягу:

$$h = \frac{c \times t}{2 \times \sqrt{\varepsilon}}, \quad (\text{A.8})$$

де h – глибина розташування прихованої тріщини, см;

c – швидкість світла у вакуумі, $c = 30$ см/нс;

t – затримка сигналу, нс;

ε – діелектрична проникність шару над тріщиною.

Для оцінювання відтворюваності вимірювань використовуватиме результати лабораторних експериментальних досліджень (табл. 3.3, табл. 3.4).

Проведено лабораторні експерименти з сьомі серій ($n=7$) за різної фактичної глибини розташування прихованої тріщини у шарах лабораторної моделі за різної товщини асфальтобетонного покриття. У кожній серії експериментів виконувалося п'ять паралельних експериментів ($m=5$) з визначення глибини розташування прихованої тріщини. Під паралельними експериментами будемо розуміти експерименти, що проводяться за одних параметрах конструкції (вхідних змінних). Результати лабораторних вимірювань на розгортці $T=10$ нс наведено у таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Оцінка глибини розташування прихованої тріщини

Серія вимірювань	Глибина розташування прихованої тріщини у паралельних експериментах, см					
	фактична	визначена експериментально				
		1	2	3	4	5
1	5,0	4,987	4,976	4,994	5,001	4,982
2	6,0	5,985	5,986	5,980	5,993	5,989
3	6,2	6,168	6,204	6,189	6,120	6,172
4	7,0	6,993	6,989	6,993	7,001	6,988
5	11,2	10,699	11,021	10,897	11,128	10,899
6	12,0	12,132	11,876	12,135	12,099	12,146
7	13,2	12,988	12,650	12,993	13,189	13,097

Розрахунок статистичних параметрів (\bar{Y}_i, S_i^2) лабораторних експериментів наведений у таблиці А.2.

Таблиця А.2 – Розрахунок статистичних параметрів лабораторних експериментів

Серія вимірювань	Паралельні експерименти					\bar{Y}_i	S_i^2
	1	2	3	4	5		
1	4,987	4,976	4,994	5,001	4,982	4,988	0,0000965
2	5,985	5,986	5,980	5,993	5,989	5,9866	0,0000233
3	6,168	6,204	6,189	6,120	6,172	6,1706	0,001006
4	6,993	6,989	6,993	7,001	6,988	6,9928	0,0000262
5	10,699	11,021	10,897	11,128	10,899	10,9288	0,025722
6	12,132	11,876	12,135	12,099	12,146	12,0776	0,013008
7	12,988	12,650	12,993	13,189	13,097	12,9834	0,041611

Критерій Кохрена дорівнює $G_p = 0,5108$.

Граничне значення критерію Кохрена для рівня значимості $q = 0,95$ для кількості степенів свободи $f = 4$ та кількості серій вимірювань $N = 4$ згідно з [368] дорівнює $G_{кр} = 0,43$.

Оскільки $G_p = 0,5108 < G_{кр} = 0,43$, умова (А.5) виконується, тобто вимірювання є відтворюваними.

Для перевірки умови (А.4) розраховуємо середню дисперсію відтворюваності вимірювань за формулою:

$$S^2 = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (\text{А.9})$$

Дисперсія відтворюваності вимірювань становить $S^2 = 0,01164$.

Оскільки виконується умова $D = 0,000596 < S^2 = 0,01164$, то вимірювання відтворювані.

ДОДАТОК Б

Результати георадарного зондування на автомобільних дорогах
загального користування

Б.1 Георадарна діагностика на етапі реконструкції автомобільної дороги М-18 Харків-Сімферополь-Алушта-Ялта км 681 – км 686

Діагностика проводилася із застосуванням апаратного вимірювального комплексу для георадарного дослідження дорожнього одягу «ОДЯГ-1» (свідоцтво про метрологічну атестацію № 03/0349) відповідно до М 02071168-706 «Методика дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування», Р В. 2.3-218-02071168-781 «Рекомендації щодо визначення товщини конструктивних шарів існуючого дорожнього одягу».

Під час діагностики застосовувалися антенні блоки із центральною частотою зондувального імпульсу 1,2 ГГц. Глибина зондування – до 1,2 м. Паспортна роздільна здатність за глибиною $\pm 0,005$ м.

У процесі обстеження ділянки дороги проводилося сканування дорожнього одягу у поздовжньому напрямку на відстані 0,5 м від осі правої смуги руху на ділянці км 680+200 – км 685+200. Зйомка в поздовжньому напрямку проводилася ділянками завдовжки 200 м. Антенні блоки переміщалися вручну. У процесі зондування проводився відбір кернів з конструкції (табл. Б.1, рис. Б.1) з метою калібрування антенних блоків та визначення стартового значення діелектричної проникності конструктивних шарів дорожнього одягу.

Конструкція покриття дорожнього одягу складається з: шару щебенево-мастикового асфальтобетону ЩМА-20 згідно з ДСТУ Б В.2.7-127:2015; шару з дрібнозернистого щільного асфальтобетону АСГ.Др.Щ.А.НП.І.БНД 60/90 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011; шару з крупнозернистого щільного асфальтобетону АСГ.Кр.Щ.А.НП.І.БНД 60/90 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011; шару з крупнозернистого пористого асфальтобетону АСГ.Кр.ВП.Б.НП.І.БНД 90/130 згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011. За результатами діагностики визначено товщину конструктивних шарів дорожнього одягу та встановлено ділянки із прихованими тріщинами у шарах покриття.

Таблиця Б.1 – Відомість відбору контрольних зразків (кернів) з конструкції дорожнього одягу автомобільної дороги Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта км 681+000 – км 686+000

Місце відбору зразків	Товщина шарів з матеріалів, см				
	покриття	ЩМА-20	АСГ.Др.Щ.А.НП.І. БНД 60/90	АСГ.Кр.Щ.А.НП.І. БНД 60/90	АСГ.Кр.ВП.Б.НП.І. БНД 90/130
681+360 ліворуч 1,2 м від осі	39,3	5	12,0	10,2	12,1
682+200 праворуч 1,4 м від кромки	34,1	5	3,6	5,4	20,1
684+480 праворуч 1,2 м від осі	39,5	4,9	-	-	34,6
684+940 праворуч 1,1 м від кромки	15,0	5	-	10,0 см	-
682+690 праворуч 0,4 м від кромки	15,0	5	-	10,0 см	-



Рисунок Б.1 – Свердловини, що використовувалися для калібрування антенних блоків

Для підвищення достовірності результатів діагностики георадарне зондування у поздовжньому напрямку виконувалося за допомогою двох георадарів «ОДЯГ-1» та «ОДЯГ-4» з наступною верифікацією результатів обробки радарограм. Результати обробки радарограм у поздовжньому напрямку наведено у таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 – Результати обробки даних георадарного зондування у поздовжньому напрямку

Кілометр	Відстань, м	Товщина шарів, м		
		другий та третій шари покриття	верхній шар покриття	разом три шари покриття
1	2	3	4	5
680+200	0	0,064	0,048	0,112
680+210	10	0,080	0,050	0,130
680+220	10	0,093	0,055	0,148
680+230	10	0,125	0,053	0,178
680+240	10	0,127	0,050	0,177
680+250	10	0,159	0,050	0,209
680+260	10	0,191	0,051	0,242
680+270	10	0,228	0,052	0,280
680+280	10	0,212	0,052	0,264
680+290	10	0,168	0,049	0,217
680+300	10	0,127	0,046	0,173
680+310	10	0,067	0,051	0,118
680+350	40	0,313	0,052	0,365
680+400	50	0,188	0,050	0,238
680+410	10	0,227	0,052	0,279
680+450	40	0,084	0,052	0,136
680+500	50	0,058	0,051	0,109
680+550	50	0,267	0,049	0,316
680+600	50	0,086	0,049	0,135
680+610	10	0,045	0,057	0,102
680+650	40	0,075	0,055	0,130
680+700	50	0,178	0,054	0,232
680+710	10	0,180	0,051	0,231
680+750	40	0,177	0,050	0,227
680+800	50	0,253	0,050	0,303
680+810	10	0,193	0,050	0,243
680+850	40	0,110	0,051	0,161
680+900	50	0,203	0,053	0,256

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5
680+950	50	0,071	0,053	0,124
681+000	50	0,228	0,054	0,282
681+010	10	0,242	0,053	0,295
681+050	40	0,206	0,053	0,259
681+100	50	0,276	0,054	0,330
681+150	50	0,140	0,051	0,191
681+200	50	0,113	0,053	0,166
681+250	50	0,058	0,055	0,113
681+300	50	0,075	0,050	0,125
681+350	50	0,238	0,051	0,289
681+400	50	0,239	0,049	0,288
681+450	40	0,125	0,049	0,174
681+500	50	0,217	0,049	0,266
681+550	50	0,167	0,050	0,217
681+600	50	0,152	0,050	0,202
681+610	10	0,185	0,049	0,234
681+650	40	0,067	0,049	0,116
681+700	50	0,164	0,051	0,215
681+750	50	0,138	0,052	0,190
681+800	50	0,280	0,052	0,332
681+810	50	0,317	0,050	0,367
681+850	50	0,230	0,050	0,280
681+900	50	0,130	0,050	0,180
681+950	50	0,143	0,050	0,193
682+000	50	0,062	0,050	0,112
682+010	10	0,051	0,050	0,101
682+050	40	0,151	0,051	0,202
682+100	50	0,067	0,053	0,120
682+150	50	0,098	0,053	0,151
682+200	50	0,155	0,050	0,205
682+210	10	0,268	0,054	0,322
682+250	40	0,070	0,053	0,123
682+300	50	0,271	0,052	0,323
682+350	50	0,071	0,052	0,123
682+400	50	0,119	0,050	0,169
682+450	50	0,140	0,050	0,190
682+500	50	0,053	0,050	0,103
682+550	50	0,199	0,050	0,249
682+600	50	0,124	0,050	0,174
682+620	20	6,615	5,231	11,845

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5
682+640	20	3,403	5,126	8,529
682+660	20	4,297	5,267	9,564
682+680	20	13,051	4,591	17,642
682+700	20	21,988	4,929	26,917
682+720	20	36,569	4,924	41,493
682+740	20	29,480	5,028	34,508
682+760	20	27,160	4,720	31,880
682+780	20	14,513	4,839	19,352
682+800	20	13,786	5,295	19,081
682+805	5	10,234	5,034	15,268
682+850	45	10,656	5,188	15,844
682+900	50	18,981	5,027	24,008
682+950	50	19,214	4,937	24,151
683+000	50	25,601	5,062	30,663
683+005	5	25,318	5,144	30,461
683+050	45	19,224	5,370	24,593
683+100	50	18,299	5,146	23,445
683+150	50	20,454	5,039	25,493
683+200	50	12,409	5,267	17,676
683+205	5	15,109	5,379	20,487
683+250	45	12,166	5,379	17,544
683+300	50	21,085	5,267	26,351
683+350	50	16,890	5,042	21,932
683+400	50	14,749	5,155	19,904
683+405	5	11,988	4,930	16,919
683+450	45	8,243	4,930	13,173
683+500	50	17,280	5,155	22,435
683+550	50	11,714	4,818	16,533
683+600	50	7,082	5,155	12,236
683+605	5	4,428	4,592	9,021
683+650	45	5,127	4,928	10,056
683+710	10	20,934	4,592	25,526
683+750	50	5,218	4,928	10,146
683+800	50	6,842	5,152	11,993
683+805	5	10,437	4,816	15,253
683+850	45	7,074	5,152	12,226
683+900	50	6,146	4,453	10,599
683+950	50	19,060	4,928	23,988
684+000	50	22,409	5,040	27,449
684+005	5	26,332	5,264	31,596
684+050	45	17,395	5,264	22,659
684+100	50	25,384	4,816	30,200
684+150	50	19,735	4,592	24,327
684+200	50	20,777	4,8163	25,593
684+205	5	21,138	5,046	26,184

Кінець таблиці Б.2

1	2	3	4	5
684+250	45	18,848	5,158	24,006
684+300	50	22,310	4,934	27,244
684+350	50	16,177	4,822	20,999
684+400	50	11,946	4,934	16,881
684+405	5	18,455	4,828	23,283
684+450	45	26,331	5,165	31,496
684+500	50	28,900	5,165	34,065
684+550	50	18,852	4,941	23,793
684+600	50	24,003	5,277	29,280
684+605	5	19,811	4,931	24,742
684+650	45	19,836	5,155	24,991
684+700	50	27,671	5,379	33,050
684+750	50	22,479	5,043	27,522
684+800	50	18,338	5,043	23,381
684+805	5	18,885	5,043	23,928
684+850	45	24,992	5,267	30,259
684+900	50	19,191	5,043	24,234
684+950	50	22,869	5,155	28,024
685+000	50	12,791	5,155	17,946
685+005	5	12,328	4,931	17,258
685+050	45	21,761	5,043	26,804
685+100	50	17,518	5,155	22,673
685+150	50	17,764	5,267	23,031
685+200	50	14,397	4,819	19,216

Під час верифікації даних сканування у поздовжньому напрямку проводилася обробка й порівняння даних, які отримано на ділянці від 680+200 до км 685+200 різними антенними блоками георадарів ОДЯГ-1 та ОДЯГ-4.

Результати оцінки у контрольних точках на ділянці від км 680+200 до км 680+300 наведено у таблиці Б.3.

Таблиця Б.3 – Порівняльний аналіз даних за результатами діагностики

Кілометр	Антенний блок	Товщина шарів, м				
		к/з	м/з	к /з+м/з	ЩМА	Разом
680+200	Одяг-4	0,000	0,064	0,064	0,048	0,112
	Одяг-1	0,000	0,065	0,065	0,048	0,113
680+300	Одяг-4	0,093	0,034	0,127	0,046	0,173
	Одяг-1	0,094	0,038	0,127	0,048	0,178

Приклади обробки радарограм (вигляд вікна інтерфейсу програми GeoVizy) різних профілів наведено на рисунках Б.2 – Б.5.

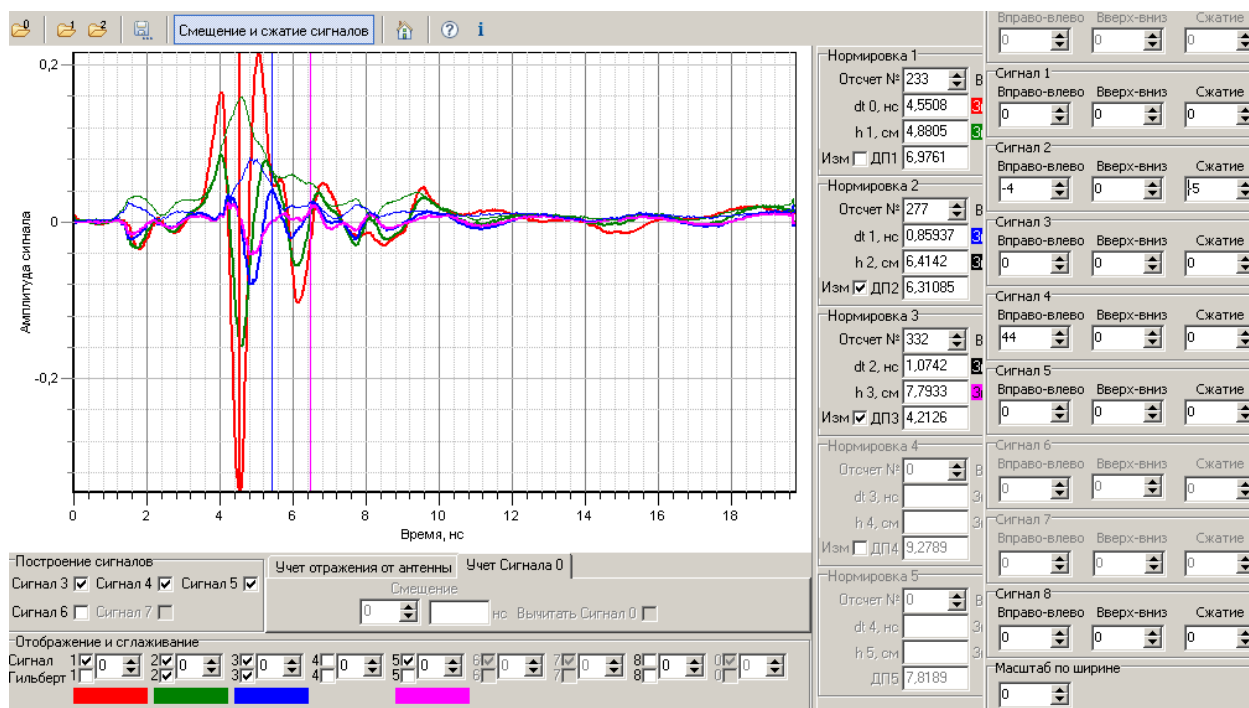


Рисунок Б.2 – Обробка імпульсних сигналів георадару, розгортка 20 нс

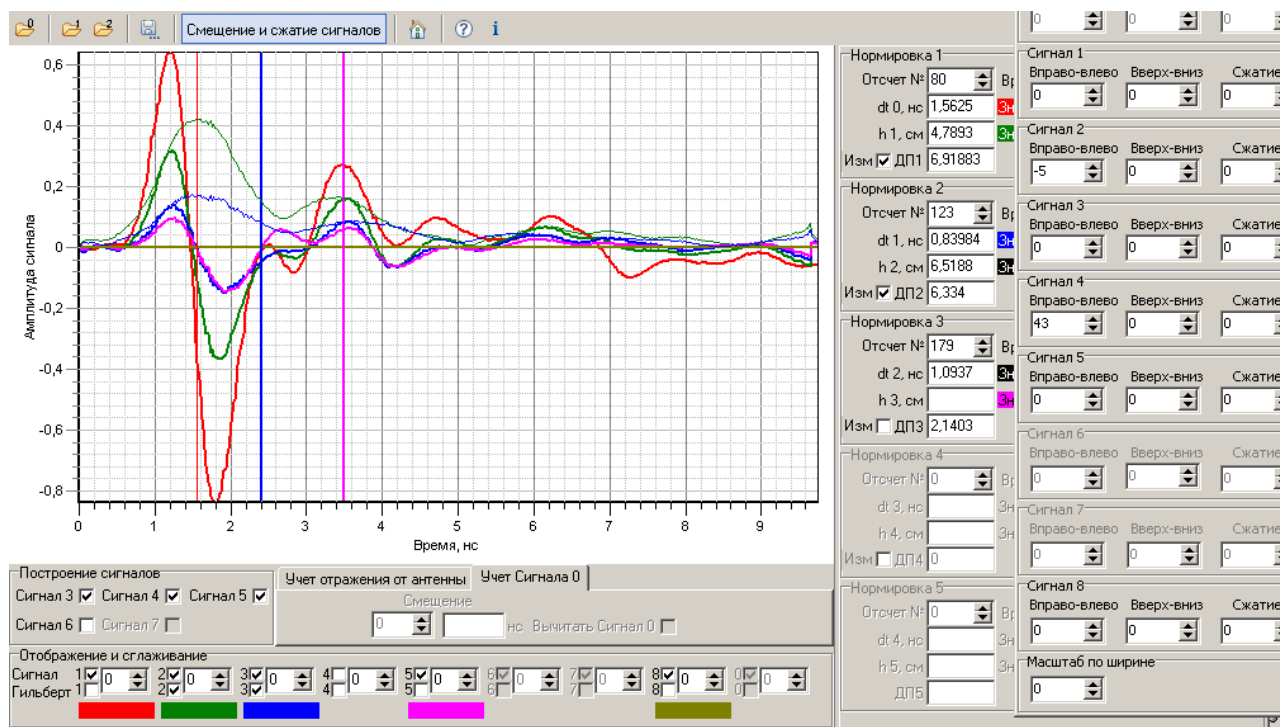


Рисунок Б.3 – Обробка імпульсних сигналів георадару, розгортка 10 нс

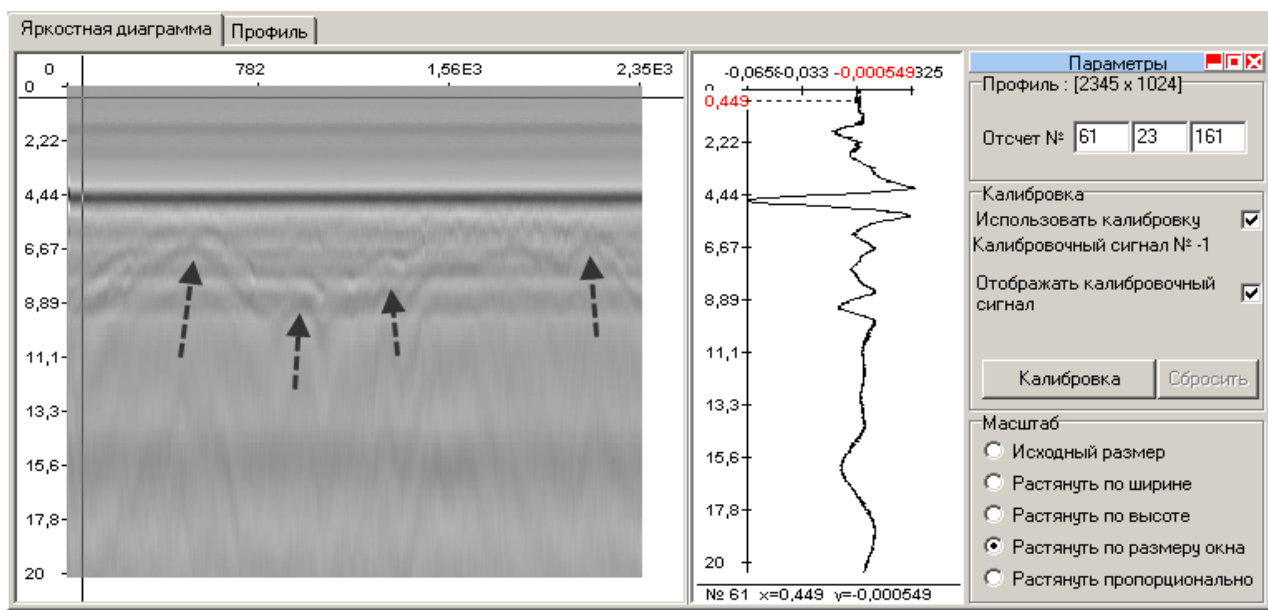


Рисунок Б.4 – Радарограма за результатами сканування у поздовжньому напрямку на ділянці км 680+800 – км 681+000. Стрілками позначені місця поперечних прихованих тріщин на глибині від 15 см до 30 см

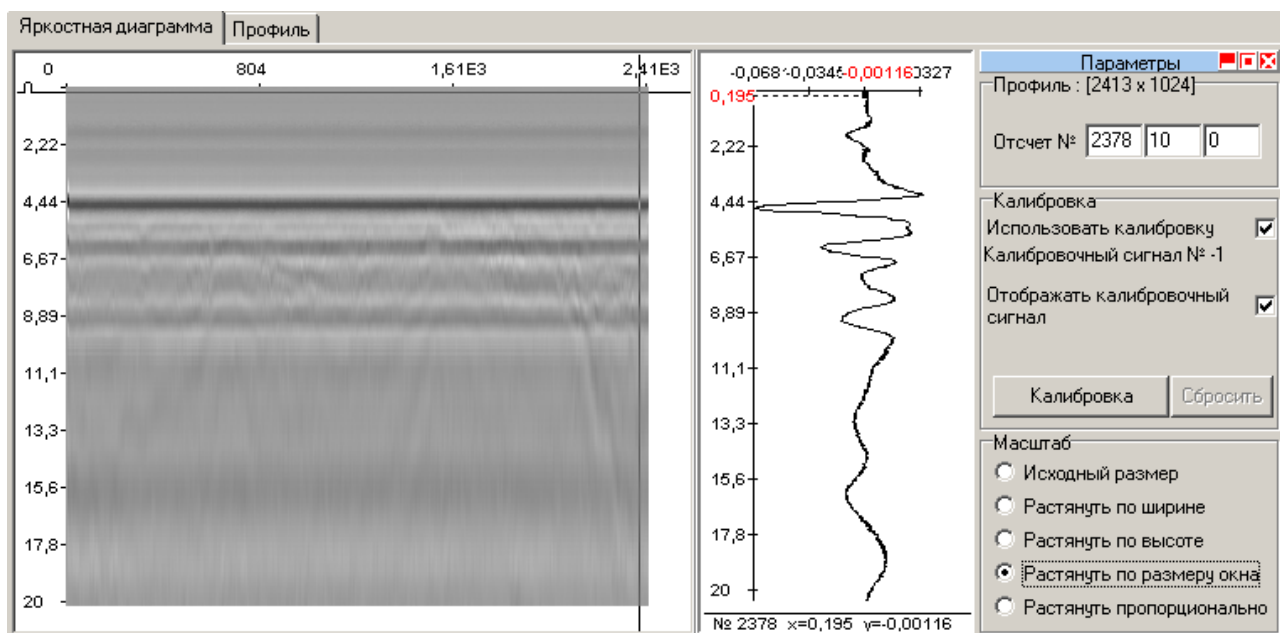


Рисунок Б.5 – Радарограма за результатами сканування у поздовжньому напрямку на ділянці км 682+200 – км 682+400 без прихованих тріщин

Б.2 Георадарна діагностика на етапі будівництва автомобільної дороги Н-31 Дніпро – Царичанка - Кобеляки – Решетилівка

Проведено георадарне обстеження дорожнього одягу у двох напрямках руху на автомобільній дорозі Н-31 Дніпро – Царичанка - Кобеляки – Решетилівка на ділянці від с. Лобойківка до с. Петриківка (7,48 км) у Дніпропетровській області. Виконано камеральну обробку результатів георадарного зондування – обробку імпульсних сигналів георадару та візуальну оцінку радарограм.

Результати камеральної обробки складені у вигляді таблиць, які містять інформацію про пікетажне положення точки зондування; інформацію про наявність або відсутність підповерхневих неоднорідностей (тріщин) у монолітних шарах покриття та зміцнених шарах основи.

Проектом передбачено посилення існуючого дорожнього одягу з різним шаром вирівнювання:

а) товщина вирівнювання до 15 см – один шар з дрібнозернистого асфальтобетону;

б) товщина вирівнювання до 25 см – два шари: перший шар з дрібнозернистого асфальтобетону; другий шар з крупнозернистого щільного асфальтобетону.

Додатковою інформацією, що є корисною під час прийняття рішень щодо забезпечення нормативного техніко-експлуатаційного стану нежорсткого дорожнього одягу є висота насипу та стан земляного полотна, умови водовідведення від земляного полотна (рис. Б.6, рис. Б.7).

Визначення типу прихованої неоднорідності проводилося методом детального аналізу радарограм (рис. Б.8) та методом обробки імпульсних сигналів георадару. Зображення прихованих тріщин на радарограмі після первинної обробки наведено на рисунку Б.9.

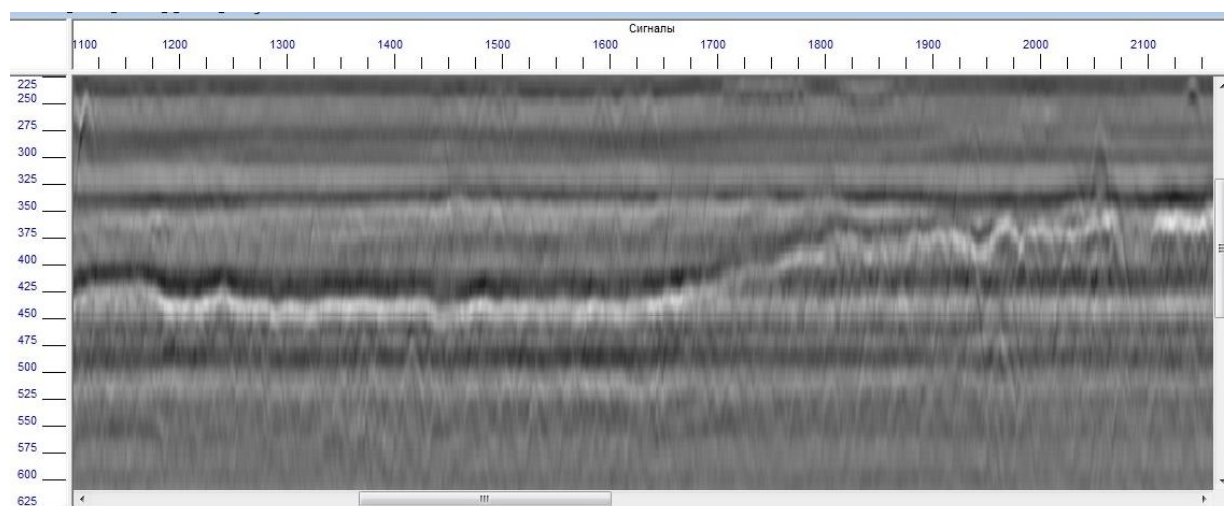


Рисунок Б.6 – Правий проїзд на ділянці від ПК 13+50 до ПК 14+00

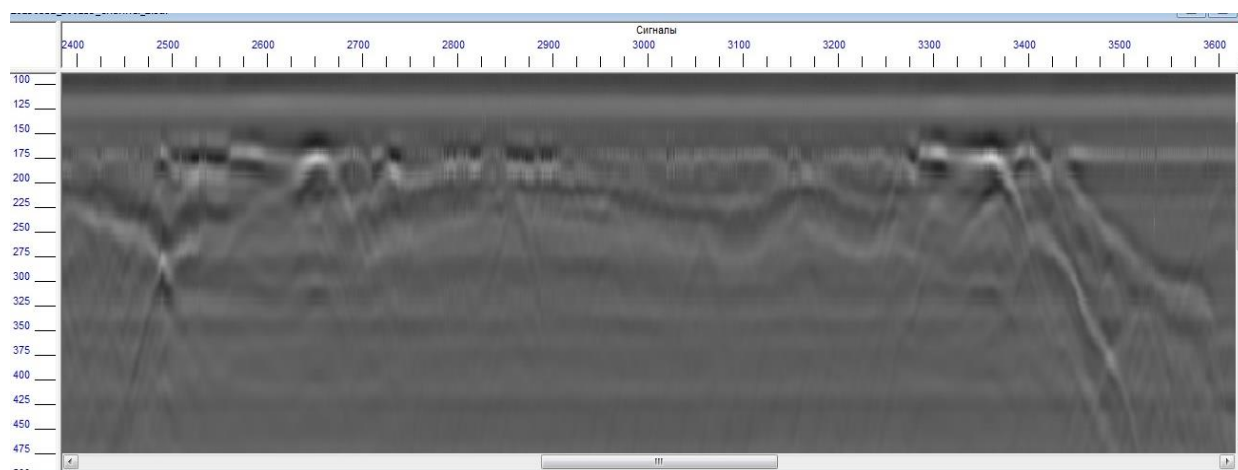


Рисунок Б.7 – Лівий проїзд на ділянці від ПК 2+00 до ПК 4+00

а)



б)



в)

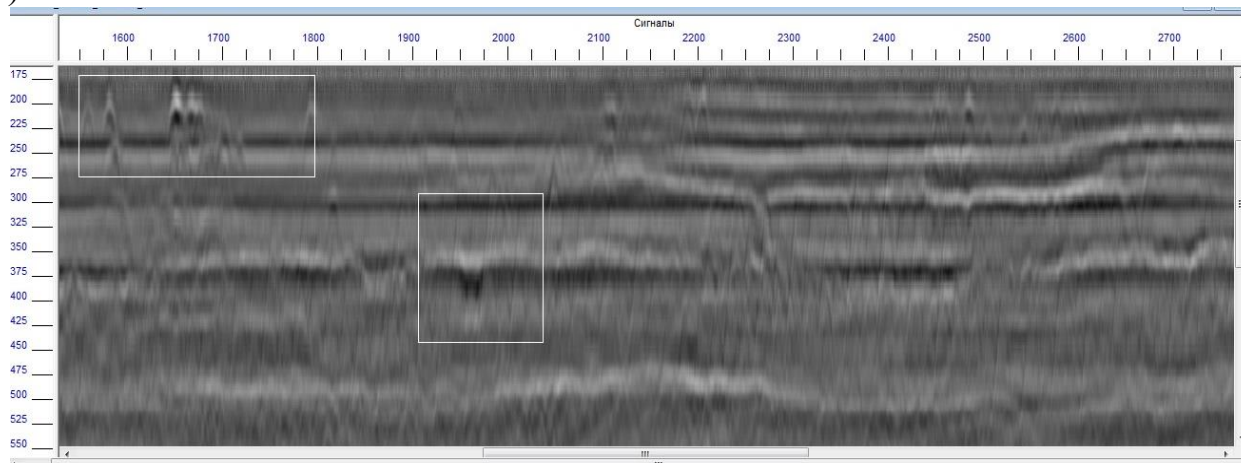


Рисунок Б.8 – Приклад радарограм, що отримані за результатами георадарного сканування: а) з незначними неоднорідностями; б) малий міст; в) з прихованими та наскрізними тріщинами

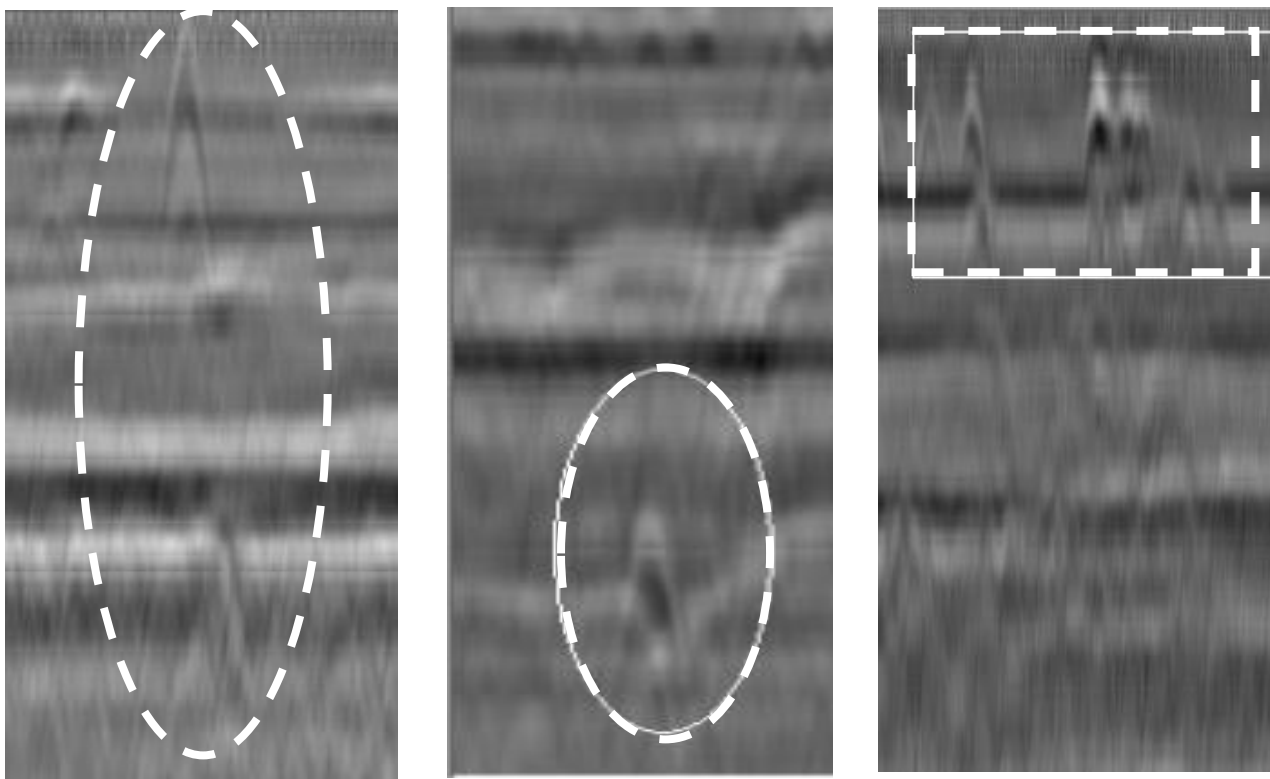


Рисунок Б.9 – Зображення прихованих тріщин на радарограмі після первинної обробки

ДОДАТОК В

Індекс технічного стану конструкції дорожнього одягу
автомобільних доріг загального користування

В.1 Оцінювання індексу технічного стану нежорсткого дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-03 Київ – Харків – Довжанський

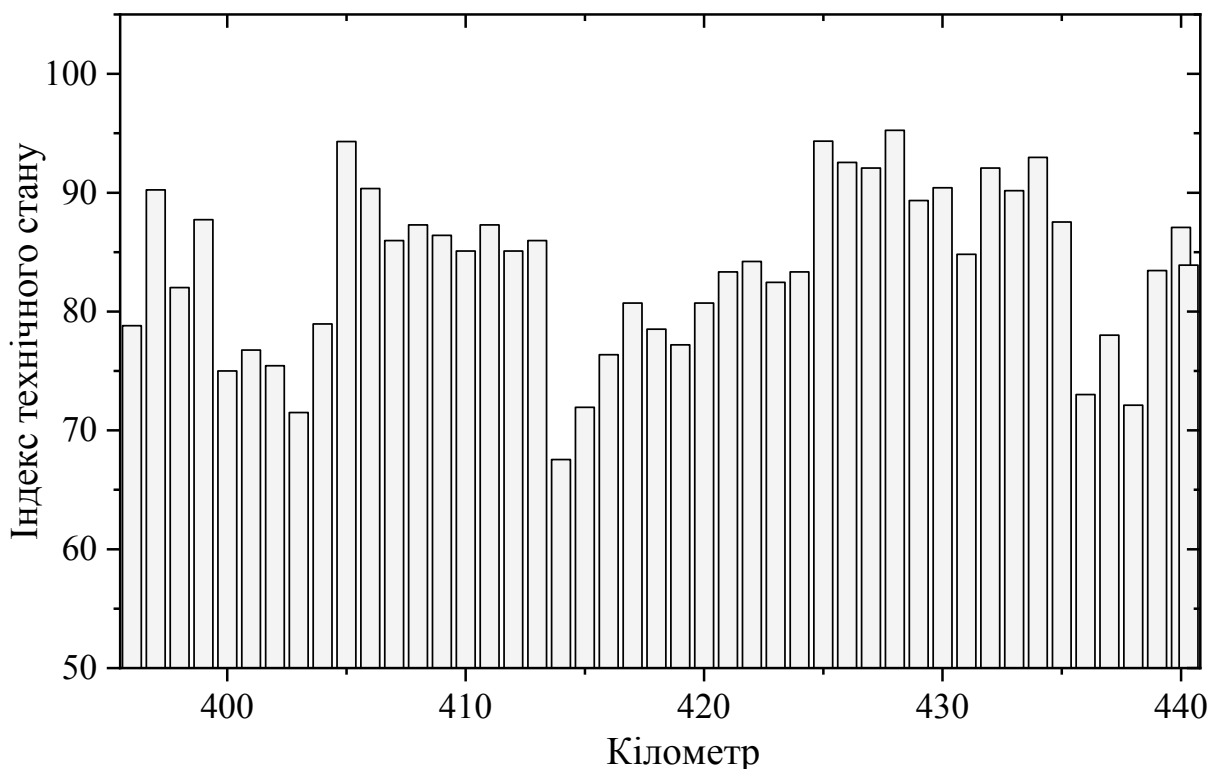


Рисунок В.1 – Лінійний графік індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики

Таблиця В.1 – Статистичні параметри розподілу індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу

Статистичні параметри	Фактичний розподіл	Теоретичний розподіл
Середнє арифметичне	83,6456763	83,01158541
Стандартна похибка	0,961942873	1,127276199
Медіана	84	81,47255951
Середньоквадратичне відхилення	6,733600113	7,890933396
Дисперсія вибірки	45,34137048	62,26682986
Екссес	-0,487216719	-0,545560202
Асиметричність	-0,333629791	0,311880743
Інтервал	27,69589984	30,70011442
Мінімум	67,54791862	68,94219427
Максимум	95,24381847	99,64230869
Сума	4098,638139	4067,567685

Розподіл нормованої статистики Вилкоксона розраховується за формулою [372]:

$$T = \frac{S_{\phi} - M(S_{\phi})}{\sqrt{D(S_{\phi})}}, \quad (\text{B.1})$$

де S_{ϕ} - сума рангів фактичного розподілу;

$M(S_{\phi}), D(S_{\phi})$ - параметри статистики Вилкоксона, що визначаються:

$$M(S_{\phi}) = \frac{m \times (m + n + 1)}{2}; \quad (\text{B.2})$$

$$D(S_{\phi}) = \frac{m \times n \times (m + n + 1)}{12}, \quad (\text{B.3})$$

де m, n - кількість елементів відповідно фактичного та теоретичного розподілу

Розрахунок статистики Вилкоксона наведений у таблиці В.2.

Таблиця В.2 – Розрахунок статистики Вилкоксона

Елементи вибірки індексу технічного стану		Ранг елементів вибірки	
фактичний розподіл	теоретичний розподіл	фактичний розподіл	теоретичний розподіл
1	2	3	4
78,81315	81,62396	26	42
90,23355	75,04219	79	15
82,02247	85,29033	44	63
87,72457	92,24086	72	86
75,00451	91,71481	14	83
76,759	95,31583	19	94
75,44313	68,94219	16	2
71,49552	82,06872	5	45
78,95211	91,01904	27	82
94,30391	76,32819	90	17
90,35631	78,99804	80	28
85,97008	72,2629	64,5	9
87,28595	71,20924	69,5	4
86,4087	77,06263	66	20
85,09283	78,43711	61,5	24

Кінець таблиці В.1

1	2	3	4
87,28595	69,3843	69,5	3
85,09283	79,82142	61,5	30
85,97008	80,92491	64,5	35
67,54792	84,55365	1	59
71,93415	81,18452	7	38
76,36692	81,44378	18	40
80,7066	81,15255	33,5	37
78,51349	92,68641	25	88
77,19762	83,07133	21	49
80,7066	82,39209	33,5	46
83,33834	80,18987	51,5	32
84,21559	96,92569	58	96
82,4611	89,4747	47	76
83,33834	99,64231	51,5	98
94,33673	79,23572	91	29
92,54942	94,83318	87	92
92,06902	72,78836	84,5	10
95,24382	87,27466	93	68
89,34777	89,7206	75	77
90,4084	96,56681	81	95
84,81235	83,0765	60	50
92,06902	80,11857	84,5	31
90,17084	88,19171	78	73
92,97611	81,07792	89	36
87,5336	88,74705	71	74
73,02026	73,92102	11	13
78,00922	77,94064	23	22
72,11318	73,39995	8	12
83,45173	81,20213	54	39
87,08006	83,4269	67	53
83,90527	83,83493	56	55
82,00215	81,47256	43	41
83,01807	98,4225	48	97
84,05691	71,91242	57	6

Сума рангів елементів розподілу індексу технічного стану: фактичного розподілу $S_{\phi}=2537$; теоретичного розподілу $S_m=2314$.

За результатами розрахунку (В.1 – В.3) модуль статистики Вилкоксона $|T| = 0,792$.

В.2 Оцінювання індексу технічного стану нежорсткого дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-18 Харків – Сімферополь – Алушта – Ялта

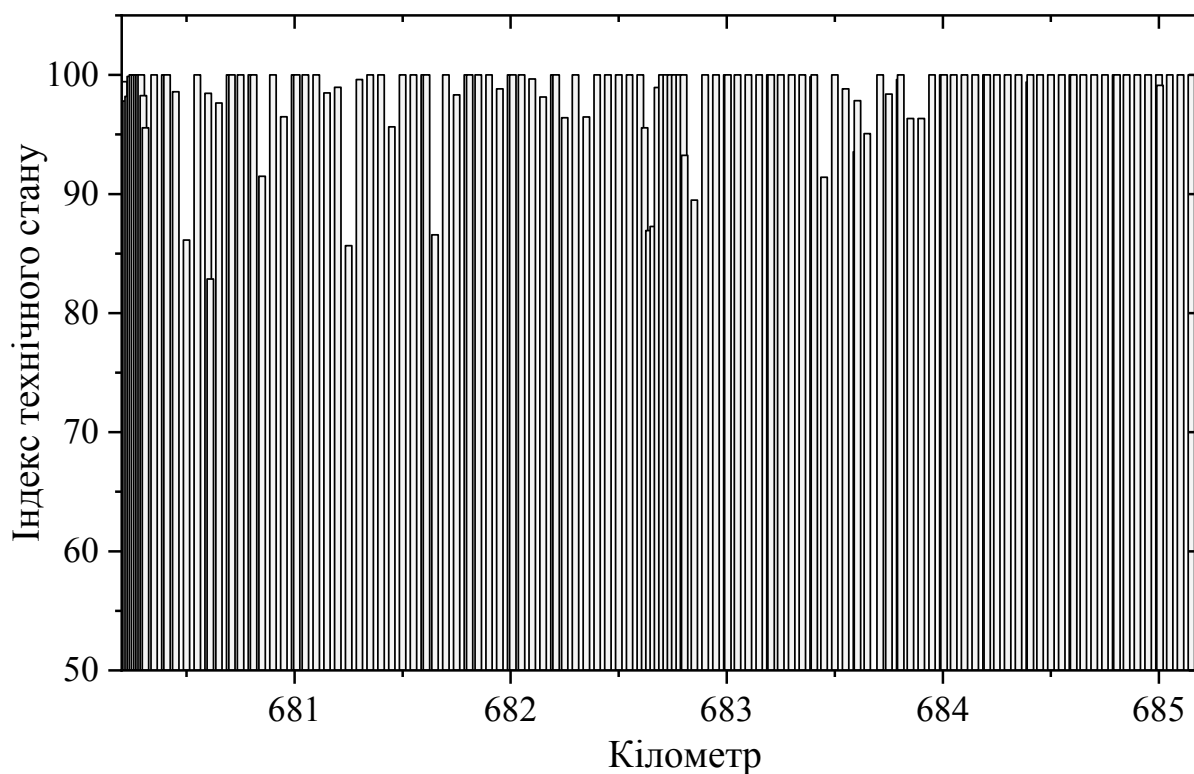


Рисунок В.2 – Лінійний графік індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики

Таблиця В.3 – Статистичні параметри розподілу індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу

Статистичні параметри	Фактичний розподіл	Теоретичний розподіл
Середнє арифметичне	98,59661442	98,64359151
Стандартна похибка	0,281254539	0,301567586
Медіана	100	98,58942393
Середньоквадратичне відхилення	3,29199998	3,529758102
Дисперсія вибірки	10,83726387	12,45919226
Ексцес	8,942590922	-0,276131086
Асиметричність	-3,021989043	0,153497237
Інтервал	17,1327856	17,09146836
Мінімум	82,8672144	90,83632747
Максимум	100	107,9277958
Сума	13507,73618	13514,17204

Таблиця В.4 – Розрахунок статистики Вилкоксона

Елементи вибірки індексу технічного стану		Ранг елементів вибірки	
фактичний розподіл	теоретичний розподіл	фактичний розподіл	теоретичний розподіл
1	2	3	4
98,2843	90,83633	91	8
99,44053	91,3912	124	9
97,79943	92,19686	76	12
98,19105	92,24939	88	13
99,86946	92,30821	130	14
100	92,34377	178,5	15
100	92,71764	178,5	16
100	93,08216	178,5	17
100	93,40428	178,5	19
100	93,45949	178,5	20
98,26565	93,60904	90	22
95,56155	93,61618	39,5	23
100	93,77268	178,5	24
100	93,77561	178,5	25
100	93,83663	178,5	26
98,58268	93,87358	100	27
86,13451	94,15115	3	28
100	94,27225	178,5	29
98,46146	94,41555	97	30
82,86721	94,76264	1	31
97,65023	94,81232	73	32
100	94,96941	178,5	33
100	95,09123	178,5	35
100	95,24796	178,5	36
100	95,33343	178,5	37
100	95,55722	178,5	38
91,48862	95,62029	11	41
100	95,67483	178,5	43
96,48468	95,72563	59	44
100	95,74254	178,5	48
100	95,75206	178,5	46
100	96,01485	178,5	47
100	96,01724	178,5	48
98,48944	96,12237	98	49
98,95566	96,14137	114	50
85,66455	96,24426	2	51
99,6177	96,27633	127	52
100	96,35285	178,5	55
100	96,48108	178,5	58
95,63615	96,55545	42	60
100	96,64532	178,5	61
100	96,72105	178,5	62
100	96,79871	178,5	63
100	96,94601	178,5	64
86,57089	96,9955	4	65

Продовження таблиці В.4

1	2	3	4
100	97,16322	178,5	66
98,3216	97,17069	94	67
100	97,38542	178,5	68
100	97,41983	178,5	69
100	97,45251	178,5	70
100	97,50532	178,5	71
98,82512	97,58798	110	72
100	97,70922	178,5	74
100	97,74025	178,5	75
100	97,87989	178,5	78
99,66432	97,96396	128	79
98,15376	97,96422	86	80
100	97,97165	178,5	81
100	97,97755	178,5	82
96,40076	98,0563	56	83
100	98,05682	178,5	84
96,47535	98,079	57	85
100	98,16752	178,5	87
100	98,25574	178,5	89
100	98,2856	178,5	92
100	98,29647	178,5	93
100	98,45242	178,5	96
95,56155	98,5436	39,5	99
86,94014	98,58942	5	101
87,27582	98,5932	6	102
98,93701	98,60579	113	103
100	98,63953	178,5	104
100	98,65161	178,5	105
100	98,67075	178,5	106
100	98,67327	178,5	107
100	98,69719	178,5	109
100	98,90507	178,5	112
93,25094	99,02847	18	115
89,49467	99,12822	7	117
100	99,30301	178,5	118
100	99,38101	178,5	119
100	99,38982	178,5	120
100	99,39812	178,5	121
100	99,42018	178,5	123
100	99,56782	178,5	125
100	99,9094	178,5	131
100	99,99352	178,5	132
100	100,0527	178,5	225
100	100,0616	178,5	226
100	100,1281	178,5	227
100	100,2804	178,5	228

Кінець таблиці В.4

1	2	3	4
99,83216	100,285	129	229
100	100,3083	178,5	230
91,40469	100,3546	10	231
100	100,3922	178,5	232
98,83817	100,3965	111	233
93,53487	100,4977	21	234
97,83672	100,6022	77	235
95,07201	100,8033	34	236
100	100,8911	178,5	237
98,39619	100,8963	95	238
99,61527	100,9059	127	239
100	100,9395	178,5	240
96,33362	100,9731	53	241
96,34481	101,0442	54	242
100	101,0708	178,5	243
100	101,1128	178,5	244
100	101,1681	178,5	245
100	101,2488	178,5	246
100	101,2789	178,5	247
100	101,3565	178,5	248
100	101,9486	178,5	249
100	102,0075	178,5	250
100	102,2104	178,5	251
100	102,2183	178,5	252
100	102,4736	178,5	253
99,40323	102,4994	122	254
100	102,5517	178,5	255
100	102,6998	178,5	256
100	102,7552	178,5	257
100	102,8877	178,5	258
100	102,8996	178,5	259
100	103,0755	178,5	260
100	103,5534	178,5	261
100	103,7067	178,5	262
100	103,768	178,5	263
100	103,9021	178,5	264
100	104,015	178,5	265
100	104,1969	178,5	266
100	104,2414	178,5	267
100	104,4893	178,5	268
100	104,65	178,5	269
99,1235	104,939	116	270
100	105,9687	178,5	271
100	106,4149	178,5	272
100	107,5787	178,5	273
98,68413	107,9278	108	274

Сума рангів елементів розподілу індексу технічного стану: фактичного розподілу $S_{\phi}=19567$; теоретичного розподілу $S_m=2314$.

За результатами розрахунку (В.1 – В.3) модуль статистики Вилкоксона $|T|=1,991$.

Таблиця В.5 – Статистичні параметри розподілу індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу за скорегованою вибіркою

Статистичні параметри	Фактичний розподіл	Теоретичний розподіл
Середнє арифметичне	90,52049408	91,63066971
Стандартна похибка	0,927240977	0,961310068
Медіана	91,48861502	90,72168179
Середньоквадратичне відхилення	4,636204886	4,806550338
Дисперсія вибірки	21,49439575	23,10292615
Ексцес	-1,052994897	-0,576417176
Асиметричність	-0,235266169	-0,04364139
Інтервал	14,97672405	18,36764197
Мінімум	82,86	81,51643086
Максимум	97,83672405	99,88407283
Сума	2263,012352	2290,766743

Таблиця В.6 – Розрахунок статистики Вилкоксона за скоригованою вибіркою

Елементи вибірки індексу технічного стану		Ранг елементів вибірки	
фактичний розподіл	теоретичний розподіл	фактичний розподіл	теоретичний розподіл
1	2	3	4
82,86	81,51643	2	1
82,86721	84,06705	3	5
83,16	85,89063	4	7
84,32	87,26781	6	12
86,66455	87,74288	8	14
86,13451	87,95309	9	15
86,57089	88,81306	10	16
86,94014	89,03696	11	17
87,27582	89,11142	13	18
89,49467	89,43907	20	19
91,40469	89,9145	25	21
91,48862	90,50812	26	22
91,25094	90,72168	27	23

Кінець таблиці В.6

1	2	3	4
91,53487	90,79874	28	24
91,76	93,11258	29	31
91,56155	93,34522	30	32
93,56155	94,22922	33	34
94,63615	94,61592	35	39
94,33362	95,26946	36	41
94,34481	95,35966	37	42
94,40076	97,46861	38	44

Сума рангів елементів розподілу індексу технічного стану: фактичного розподілу $S_{\phi}=607$; теоретичного розподілу $S_m=668$.

За результатами розрахунку (В.1 – В.3) модуль статистики Вилкоксона $|T| = 0,591$.

В.3 Оцінювання індексу технічного стану нежорсткого дорожнього одягу на автомобільній дорозі Н-13 Дніпро – Царичанка – Кобеляки – Решетилівка

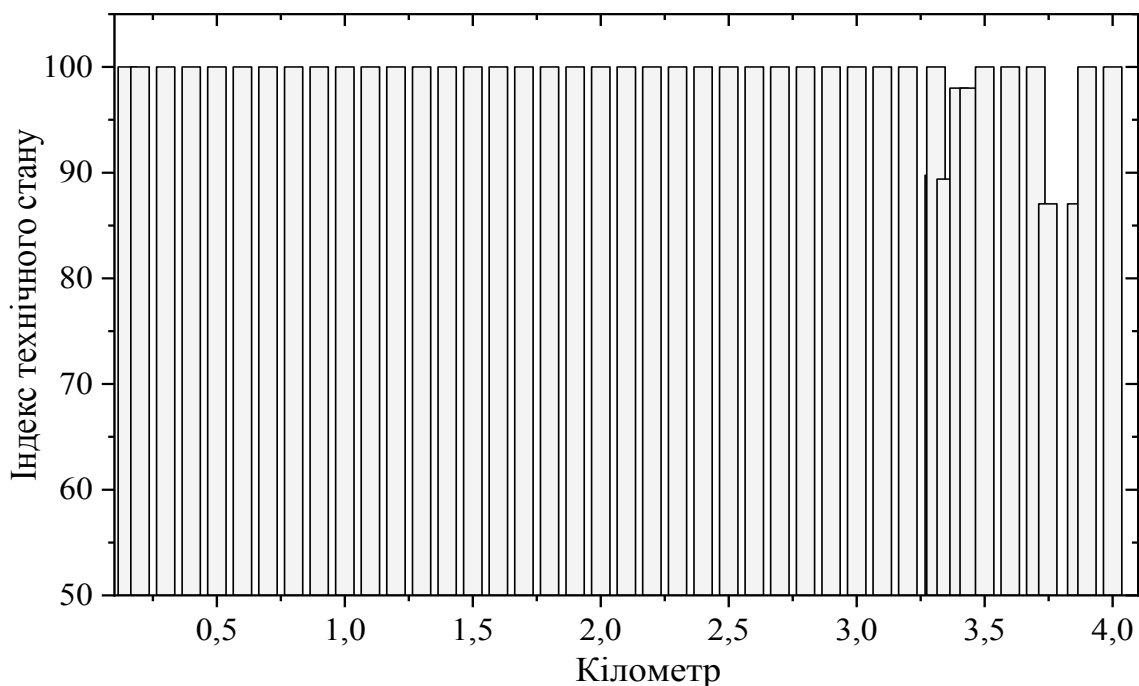


Рисунок В.3 – Лінійний графік індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу за результатами діагностики

Таблиця В.7 – Статистичні параметри розподілу індексу технічного стану конструкції нежорсткого дорожнього одягу

Статистичні параметри	Фактичний розподіл	Теоретичний розподіл
Середнє арифметичне	98,34613743	98,23467457
Стандартна похибка	0,802568727	0,707360958
Медіана	100	97,64853674
Середньоквадратичне відхилення	5,323638671	4,692101776
Дисперсія вибірки	28,3411287	22,01581908
Ексцес	7,550627315	0,472173754
Асиметричність	-3,011752179	0,049155968
Інтервал	19,95305164	22,4566802
Мінімум	87,04694836	86,19966093
Максимум	100	108,6563411
Сума	4327,230047	4322,325681

Таблиця В.8 – Розрахунок статистики Вилкоксона

Елементи вибірки індексу технічного стану		Ранг елементів вибірки	
фактичний розподіл	теоретичний розподіл	фактичний розподіл	теоретичний розподіл
1	2	3	4
100	86,19966	52,65	5
100	88,38468	52,65	6
100	92,38299	52,65	7
100	92,48708	52,65	8
100	93,93883	52,65	9
100	94,30759	52,65	10
100	94,39341	52,65	11
100	94,53526	52,65	12
100	94,58874	52,65	13
100	94,73005	52,65	14
100	94,83653	52,65	15
100	95,02169	52,65	16
100	95,57506	52,65	17
100	95,81982	52,65	18
100	96,02627	52,65	19
100	96,04103	52,65	20
100	96,04551	52,65	21
100	96,57801	52,65	22
100	97,19155	52,65	23
100	97,21405	52,65	24
100	97,51979	52,65	25
100	97,5861	52,65	26
100	97,71098	52,65	27
100	97,9181	52,65	28
100	98,73836	52,65	29
100	99,07424	52,65	30

Кінець таблиці В.8

1	2	3	4
100	99,11166	52,65	31
100	99,15984	52,65	32
100	99,90868	52,65	33
100	100,1002	52,65	74
100	100,5241	52,65	75
100	100,8945	52,65	76
89,74178	100,938	4	77
100	101,1937	52,65	78
89,39437	101,9619	3	79
100	101,9804	52,65	80
100	102,8959	52,65	81
100	103,2773	52,65	82
100	103,4025	52,65	83
100	103,6671	52,65	84
87,04695	104,4846	1,5	85
87,04695	107,3036	1,5	86
100	108,0197	52,65	87
100	108,6563	52,65	88

Сума рангів елементів розподілу індексу технічного стану: фактичного розподілу $S_{\phi}=607$; теоретичного розподілу $S_m=668$.

За результатами розрахунку (В.1 – В.3) модуль статистики Вилкоксона $|T|=2,018$.

ДАТОК Г

Довідки про впровадження результатів
дисертаційного дослідження



Державне агентство автомобільних доріг України
(УКРАВТОДОР)

Служба автомобільних доріг у Дніпропетровській області

вул.Воскресенська, 24, м.Дніпро, 49600, Україна
тел.факс (056)744-82-94, e-mail: admin@sad.gov.ua
код ЄДРПОУ 25843931

04.05.2020 № 1-5/1072

на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
асистента кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Урдзика Сергія Миколайовича

Довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження асистента кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою ХНАДУ Урдзика С.М. було впроваджено у Службі автомобільних доріг Дніпропетровської області при виконанні георадарного обстеження дорожнього одягу на об'єкті будівництва автомобільної дороги державного значення Н-31 Дніпро-Царичанка-Кобеляки-Решетилівка від с. Лобойківка до межі Дніпропетровської області, II етап II стадії (7,56 км) з метою встановлення ділянок дорожнього одягу, що містять під поверхневі тріщини у монолітних шарах покриття та зміцнених шарах основи.

Георадарна діагностика дорожнього одягу проведена із застосуванням георадарів серії «ОДЯГ» згідно з нормативними документами Р В. 2.3-218-02071168-781:2011 «Рекомендації щодо визначення товщини конструктивних шарів існуючого дорожнього одягу», М 02071168-706:2012 «Методика дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами під поверхневого зондування», М 02071168-725:2013 «Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами під поверхневого зондування», основу яких склали результати наукових досліджень Урдзика Сергія Миколайовича.

Зіставлення результатів георадарної діагностики із фактичним станом конструкції дорожнього одягу довели точність та достовірність результатів георадарної діагностики у частині пошуку, позиціонування прихованих тріщин у шарах покриття та зміцнених шарах основи.

Економічна ефективність розробок Урдзика С.М. полягає у високій швидкості отримання інформації щодо стану конструкції дорожнього одягу, збереженні цілісності конструкції, низькій собівартості проведення робіт з діагностики дорожнього одягу. Впровадження результатів наукових досліджень Урдзика С.М. сприяє підвищенню достовірності даних діагностики та підвищенню надійності та довговічності дорожнього одягу.

Заступник начальника

С.С. Кочан

0255665





Державне агентство автомобільних доріг України
(УКРАВТОДОР)

Служба автомобільних доріг у Харківській області

61202 м. Харків, вул. Ахсарова,2

тел. (057) 336-83-28,
факс (057) 336-80-55
E-mail: kh_sad@ukravtodor.gov.ua

“19” 05 2020 р. № 164/10

Д О В І Д К А

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
асистента кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківського національного автомобільного університету
Урдзика Сергія Миколайовича

Результати досліджень асистента ХНАДУ Урдзика С.М. впроваджуються у систему діагностики та контролю якості ремонтних робіт Служби автомобільних доріг у Харківській області та полягають у визначенні товщини шарів дорожнього одягу при контролі якості будівельних та ремонтних робіт та виявленні підповерхневих неоднорідностей у шарах існуючого дорожнього одягу при проведенні ремонтних робіт на автомобільних дорогах загального користування.

Георадарне обладнання «ОДЯГ» та відповідні методики дефектоскопії нежорсткого дорожнього одягу були застосовані під час проведення діагностики нежорсткого дорожнього одягу на автомобільній дорозі М-03 «Київ – Харків – Довжанський» на ділянці км 519+000 – км 528+000 з метою оцінювання якості влаштування асфальтобетонних шарів в процесі капітального ремонту. Використання георадарного обладнання та відповідного програмного забезпечення дозволило з високою швидкістю та точністю визначити товщину шарів, оцінити наявність прихованих тріщин у шарах існуючого покриття дорожнього одягу без порушення цілісності конструкції.

Економічна ефективність розробок Урдзика С.М, що застосовуються на етапах діагностики та контролю якості ремонтних робіт, обумовлена високою швидкістю та низькою собівартістю обстеження, збереженням цілісності конструкції дорожнього одягу. Інформація про будову та стан існуючого дорожнього одягу сприяє підвищенню ефективності ремонтних заходів та забезпеченню довговічності дорожнього одягу.

Заступник начальника з розвитку доріг
Служби автомобільних доріг у
Харківській області



Анатолій ДЕМЧЕНКО

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО
 АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
 (УКРАВТОДОР)**
 « 17 » листопада 20 15 р.
 № 13-8-130
 03680, МСП м. Київ, вул. Фізкультури, 9

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
 аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг і аеродромів
 Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
 Урдзика Сергія Миколайовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань і проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Урдзика С.М. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідної роботи згідно договору № 116/37-45-11 «Розробити методику дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування» (№ державної реєстрації 0111U005508), яка передбачала, в тому числі, розроблення методики М 02071168-705:2012 «Методика дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування».

Наукові розробки асп. Урдзика С.М. склали основу цього технічного документу, якій регламентує порядок позиціонування та ідентифікації підповерхневих дефектів в шарах покриття та зміцнених шарах основи дорожнього одягу нежорсткого типу за результатами георадарного зондування. За результатами наукових досліджень асп. Урдзика С.М. розроблено порядок георадарної діагностики дорожнього одягу нежорсткого типу з метою позиціонування та ідентифікації підповерхневих дефектів покриття (розділ 5 Методики). Результати дисертаційного дослідження асп. Урдзика С.М. складають основу методики інтерпретації, позиціонування та ідентифікації підповерхневих дефектів (тріщин) в монолітних шарах покриття та зміцнених шарах основи (розділ 7 Методики).

Начальник відділу інноваційного розвитку
 та кошторисного ціноутворення
 Державного агентства автомобільних
 доріг України (Укравтодор)

Анатолій Цинка

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

« 17 » листопада 20 15 р.

№ 13-8-129

03680, МСП м. Київ, вул. Фізкультури, 9

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг і аеродромів
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Урдзика Сергія Миколайовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань і проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Урдзика С.М. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідної роботи згідно договору № 64/37-52-12 «Розробити методику комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування та концепцію дорожньої бази даних про стан дорожнього одягу за результатами обстежень методами підповерхневого зондування» (№ державної реєстрації 0112U004745), яка передбачала, в тому числі, розроблення методики М 02071168-725:2013 «Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування». Методику призначено для впровадження системи моніторингу дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування на підставі діагностики, оцінки стану та прогнозування стану дорожнього одягу за результатами георадарного обстеження.

Результати наукових досліджень асп. Урдзика С.М. застосовані при розробленні порядку діагностики та оцінки стану дорожніх одягів з використанням методів підповерхневого зондування (розділ 5 Методики) в частині, що стосується дефектоскопії дорожніх одягів. Наукові розробки асп. Урдзика С.М. склали основу методів оцінки стану дорожнього одягу за результатами діагностики (розділ 6 Методики).

Начальник відділу інноваційного розвитку
та кошторисного ціноутворення
Державного агентства автомобільних
доріг України (Укравтодор)

Анатолій Цинка

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

« 17 » чэрпня 2015 р.
№ 13-8-131
03680, МСП м. Київ, вул. Фізкультури, 9

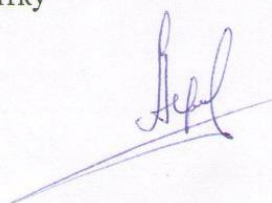
ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг і аеродромів
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Урдзика Сергія Миколайовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань і проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Урдзика С.М. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідної роботи згідно договору № 131/37-56-14 «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» (№ державної реєстрації 0114U004634), яка передбачала розширення технічних можливостей та удосконалення апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ-1» і програмного забезпечення до нього в частині, що стосується забезпечення можливості георадарного обстеження дорожнього одягу нежорсткого типу при русі пересувної лабораторії зі швидкістю транспортного потоку та розроблення відповідного пакету технічної та наукової документації щодо практичного використання георадарного обладнання.

Наукові розробки асп. Урдзика С.М. були використані при обґрунтуванні вимог до устаткування для встановлення апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ-1» на пересувну лабораторію; знайшли відображення в алгоритмах та у відповідному програмному забезпеченні щодо інтерпретації результатів георадарного зондування дорожнього одягу; були застосовані у методиці проведення обстеження дорожнього одягу за допомогою удосконаленого апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ-1».

Начальник відділу інноваційного розвитку
та кошторисного ціноутворення
Державного агентства автомобільних
доріг України (Укравтодор)



Анатолій Цинка



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг і аеродромів
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Урдзика Сергія Миколайовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань і проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Урдзика С.М. були впроваджені в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідної роботи за темою «Провести дослідження та розробити альбом типових конструкцій нежорстких дорожніх одягів для доріг I-II категорій на навантаження 130 кН» (договір від 28.11.2014 № 168/37-57-14, № державної реєстрації 0114U006440), яка передбачала розроблення альбому АД А.2.4-37641918-004:2016 «Альбом типових конструкцій дорожніх одягів для доріг I – II категорій на навантаження 130 кН» з урахуванням сучасних змін та доповнень нормативної бази з конструювання та розрахунків дорожніх одягів.

Наукові розробки аспіранта Урдзика С.М. були використані при чисельному моделюванні напружено-деформованого стану конструкцій дорожніх одягів; знайшли відображення в алгоритмах та у відповідному програмному забезпеченні щодо розрахунків дорожніх одягів за критеріями міцності; були застосовані при визначенні мінімально допустимої товщини монолітних шарів конструкцій дорожнього одягу.

Директор Департаменту розвитку
мережі доріг Укравтодору



Сергій Цепелєв



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, тел. (057) 700-38-66, факс (057) 700-38-65, E-mail: admin@khadi.kharkov.ua

01.06.2020, 924/37
На № _____

ДОВІДКА

про впровадження в навчальний процес
результатів дисертаційного дослідження
асистента кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою ХНАДУ
Урдзіка Сергія Миколайовича

Результати дисертаційного дослідження асистента кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Урдзіка Сергія Миколайовича впроваджені в навчальний процес при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю 192 "Будівництво та цивільна інженерія" та 193 «Геодезія та землеустрій»:

– за освітньо - професійною програмою «Інженерна геодезія» другого (магістерського) рівня вищої освіти при викладанні дисципліни «Інженерно-геодезичний моніторинг і контроль в будівництві»;

– за освітньо - професійною програмою «Геодезія та землеустрій» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти при викладанні дисципліни «Основи проектування автомобільних доріг»;

– за освітньо - професійною програмою "Автомобільні дороги та аеродроми" першого (бакалаврського) рівня вищої освіти при викладанні дисципліни «Комп'ютерні технології в будівництві та експлуатації автомобільних доріг та аеродромів».

Проректор з наукової роботи,
професор



В.О.Богомолів

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 113916

СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ТРИЩИН У
АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ ДОРОГИ ПІД ЧАС
РУХУ ДІАГНОСТИЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ В ТРАНСПОРТНОМУ
ПОТОЦІ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
27.03.2017.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



УКРАЇНА

**ПАТЕНТ****НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ****№ 108136****СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ТРИЩИН У
АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ ДОРОГИ ПІД ЧАС
РУХУ ДІАГНОСТИЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ В ТРАНСПОРТНОМУ
ПОТОЦІ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 11.07.2016.

В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності України

А.А.Малиш



ДАТОК Д

Метрологічна атестація засобів вимірювання,
використаних у дослідженні

МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО “ХАРКІВСЬКИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ” /ДП “Харківстандартметрологія”/

Вул. Мироносицька, 36, м. Харків, 61002, Україна
Уповноважено Держспоживстандартом України
Свідоцтво про уповноваження № ПК 003-2009 від 27.05.2009 р.

СВІДОЦТВО про державну метрологічну атестацію

№ 03/0349

від 09 листопада 2012 р.

Комплекс апаратний вимірювальний, ОДЯГ-1

001

2012 р.

назва засобу вимірювальної техніки, позначення

порядковий номер

дата виготовлення

Виробник Харківський національний автомобільно-дорожній університет

назва підприємства

Належить Харківський національний автомобільно-дорожній університет

назва підприємства (організації)

Призначення (галузь застосування) ЗВТ для георадарного дослідження дорожнього одягу нежорсткого типу з метою визначення товщини конструктивних шарівУмови проведення $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_a = 747 \text{ мм рт. ст.}$, $B = 62 \%$

(температура, вологість тощо)

Результати метрологічної атестації

Назва метрологічної характеристики	Одержане значення метрологічної характеристики	Назва, тип, основні метрологічні характеристики робочих еталонів та ЗВТ, застосованих під час атестації
Діапазон вимірювання товщини конструктивних шарів дорожнього одягу	від 50 мм до 1200 мм	Рулетка вимірювальна металева 10 м, класу точності 3 по ДСТУ 4179
Границі розподільної здатності по глибині не перевищують	$\pm 5 \text{ мм}$	Лінійка металева вимірювальна 1000 мм, згідно з ГОСТ 427

За результатами державної метрологічної атестації (протокол № 03/0349 від 09.11.2012 р.

Комплекс апаратний вимірювальний, ОДЯГ-1

назва, позначення атестованого ЗВТ

визнано таким що відповідає вимогам Комплекс апаратний вимірювальний «ОДЯГ-1».

назва технічної документації, що містить вимоги до метрологічних характеристик

Настанова щодо експлуатування.

та придатним до застосування.

Повірку проводити відповідно до Розділу настанови щодо експлуатування Комплекс

назва та позначення документа, що містить методику повірки атестованого ЗВТ

апаратний вимірювальний «ОДЯГ-1». Настанова щодо експлуатування.

Міжповірочний інтервал 12 місяців.

Заступник генерального

директора

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Код 04725906

Примітка. Свідоцтво видається збереженню протягом усього періоду експлуатації ЗВТ.



[Signature]
підпис

[Signature]
підпис



ДП «Харківстандартметрологія»	Протокол атестації	Підстава	Акт № 03-984
	Апаратний вимірювальний комплекс «ОДЯГ-1»	Аркуш 1	Аркушів 3

МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

Державне підприємство
«Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації,
метрології та сертифікації»
/ДП „Харківстандартметрологія“/

вул. Мироносицька, 36, м. Харків 61002, Україна

Уповноважено Мінекономрозвитку України

Свідоцтво про уповноваження № ПК 003-2014 від 16.05.2014 р.

Протокол № 03/984 від «05» липня 2016 р.
атестації апаратний вимірювальний комплекс «ОДЯГ-1» (георадар)

Виробник	ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРІЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Належить	ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРІЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Георадар призначений для георадарного дослідження дорожнього одягу нежорсткого типу з метою визначення товщини конструктивних шарів.

ПД з вимогами до георадару «Апаратний вимірювальний комплекс для георадарного дослідження дорожнього одягу «ОДЯГ-1». Паспорт.

Місце атестації: 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.
тел./факс 700-38-66

і Умови проведення атестації:

Температура повітря в приміщення 20 °С

Відносна вологість 60 %

Атмосферний тиск 746 кПа.

ДП «Харківстандартметрологія»	Протокол атестації	Підстава	Акт № 03-984
	Апаратний вимірювальний комплекс «ОДЯГ-1»	Аркуш 2	Аркушів 3

2 Перелік ЗВТ та допоміжного обладнання, що використовуються під час атестації:

- лінійка металева вимірювальна 1000 мм, згідно з ГОСТ 427-75;
- рулетка вимірювальна металева 5 м, згідно з ДСТУ 4179-2003;
- гігрометр психрометричний ВИТ 1 ТУ 14307481.001-92;
- термометр метеорологічний скляний ГОСТ 28498-90;
- барометр-анероїд контрольний М-67 ТУ 2504-1797-75;
- стенд калібрувальний СТК-01.

3 Результати державної метрологічної атестації

Комплектність ВІДПОВІДАЄ ВИМОГАМ ПД

Маркування ВІДПОВІДАЄ ВИМОГАМ ПД

Зовнішній огляд ЗАДОВІЛЬНЕ

Опробування ЗАДОВІЛЬНЕ

Результати вимірювань під час контролю метрологічних характеристик георадару приведені в таблиці 1.

Висновок по результату атестації: Метрологічні характеристики апаратного вимірювального комплексу «ОДЯГ-1» (георадар) відповідають вимогам експлуатаційній документації на нього та допускається для подальшого застосування для георадарного дослідження дорожнього одягу нежорсткого типу з метою визначення товщини конструктивних шарів.

ДП «Харківстандартметрологія» Протокол атестації Акт № 03-984
 Апаратний вимірювальний комплекс «СІДІ-1» Аркуш 3 Аркушів 3

Точка діапазону вимірювань, мм	Крок вимірювань (зв'язка), мм	Час проходження сигналу, нс			Розрахунок значення зміни відстані (зв'язки), мм			Середнє значення зв'язки, м	Δ, мм	Допустиме значення зв'язки, мм	Примітка
		1	2	3	1	2	3				
300	5	0,0347	0,0351	0,0349	5,21	5,27	5,24	5,24	0,24	5	Не перевищує
600	5	0,0356	0,0354	0,0349	5,34	5,31	5,24	5,30	0,30	5	Не перевищує
900	5	0,0358	0,0356	0,0354	5,37	5,34	5,31	5,34	0,34	5	Не перевищує
300	10	0,0711	0,0708	0,0708	10,67	10,62	10,62	10,64	0,64	5	Не перевищує
300	60	0,4127	0,4122	0,4127	61,90	61,84	61,90	61,86	1,86	5	Не перевищує
300	160	1,0804	1,0892	1,0938	162,06	163,38	164,07	163,17	3,17	5	Не перевищує
300	360	2,4098	2,4102	2,4311	361,47	361,53	364,67	362,56	2,56	5	Не перевищує
300	600	4,0298	4,0306	4,0316	604,47	604,64	604,74	604,62	4,62	5	Не перевищує

Персонал, який виконував роботи з визначення метрологічних характеристик

1-6
3-ff

Ю.М. Сосновников

Підпис

ПІБ.

МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
“ХАРКІВСЬКИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”
/ДП “Харківстандартметрологія”/

Вул. Мироносицька, 36, м. Харків, 61002, Україна

Уповноважено Мінікономрозвитку України
Свідоцтво про уповноваження № ПК 003-2014 від 16.05.2014 р.

СВІДОЦТВО

ПРО ПОВІРКУ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

№ 03/4258 Чинне до 05 липня 2017 р.

Назва та умовне позначення Комплекс апаратний
вимірювальний ОДЯГ-1 Зав. № 001
Виробник ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

За результатами повірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки
(далі – ЗВТ) відповідає вимогам:

Комплекс апаратний вимірювальний «ОДЯГ-1».

позначення та назва документа, що містить вимоги до метрологічних характеристик і (або)

Настанова щодо експлуатування.

Границі розподільної здатності по глибині 5 мм, діапазон вимірювання
товщини конструктивних шарів дорожнього одягу від 50 мм до 1200 мм
за потреби, значення метрологічних характеристик (клас точності, похибки, діапазон вимірювання тощо)

Особливі застосування ЗВТ відсутні
Обмеження (за зверненням замовника) кількості фізичних всліщин і

діапазонів (частини діапазонів) вимірювань

Додаток на стор.

Персонал, який виконував
роботи з повірки

Місце відбитка
повірного тисра



Ю.М. Сосновіков
ініціал, прізвище

05 липня 2016 р.

МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
“ХАРКІВСЬКИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”
/ДП “Харківстандартметрологія”/

Вул. Мироносицька, 36, м. Харків, 61002, Україна

Уповноважено Мінікономрозвитку України
Свідоцтво про уповноваження № ПК 003-2014 від 16.05.2014 р.

СВІДОЦТВО

ПРО ПОВІРКУ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

№ 03/9871 Від 17 грудня 2018 р.

Назва та умовне позначення Комплекс апаратний
вимірювальний ОДЯГ-1 Зав. № 001
Виробник ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

За результатами повірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки
(далі – ЗВТ) відповідає вимогам:

Комплекс апаратний вимірювальний «ОДЯГ-1».

позначення та назва документа, що містить вимоги до метрологічних характеристик і (або)

Настанова щодо експлуатування.

Границі розподільної здатності по глибині 5 мм, діапазон вимірювання
товщини конструктивних шарів дорожнього одягу від 50 мм до 1200 мм
за потреби, значення метрологічних характеристик (клас точності, похибки, діапазон вимірювання тощо)

Особливі застосування ЗВТ відсутні
Обмеження (за зверненням замовника) кількості фізичних всліщин і

діапазонів (частини діапазонів) вимірювань

Рекомендований міжповірочний інтервал 1 рік.

Дані, одержані під час повірки, наведені 1 сторінці
на зворотному боці свідоцтва або у додатку на арк.

Персонал, який виконував
роботи з повірки

Місце відбитка
повірного тисра



Ю.М. Сосновіков
ініціал, прізвище