

А.Г. Батракова, С.М. Урдзік

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОРАДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОБСТЕЖЕННІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

В роботі проведено аналіз досліджень можливості та актуальності впровадження у практику обстеження автомобільних доріг георадарних технологій. Розглянуто задачі, що можуть бути вирішені за допомогою георадарного обладнання. Приведено зразок вітчизняного георадарного обладнання та програмного забезпечення. Наведено результати експериментальних лабораторних досліджень, що підтверджують адекватність запропонованої методики проведення досліджень.

Ключові слова: георадар, автомобільна дорога, дорожній одяг, земляне полотно, надійність, експлуатаційний стан, дослідження, методика, електрофізичні властивості.

Постановка проблеми

Досить часто навіть за високого рівня проектування, будівництва та утримання автомобільних доріг відбувається руйнування дорожнього одягу та земляного полотна, що, зрештою, призводить до збільшення фінансування на утримання автомобільних доріг, підтримання необхідного рівня експлуатаційного стану дорожнього одягу та земляного полотна. Найчастіше першопричиною руйнування конструкцій дорожнього одягу є порушення технологічного регламенту, перевищення допустимих навантажень, а також локальні порушення властивостей конструктивних шарів дорожнього одягу чи підстилаючого ґрунту, викликані перезволоженням, наявністю прихованих дефектів, сторонніх включень та іншими причинами.

Аналіз досліджень і публікацій

У багатьох дослідженнях [1 - 4] зазначається, що одним із актуальних завдань сучасної будівельної галузі є розробка та впровадження у практику георадарних технологій проектно-вишукувальних робіт та робіт з контролю якості будівництва, що дозволяє оперативно визначати стан будівельних конструкцій без порушення їх цілісності. Впровадження даної технології спрямоване на зниження матеріаломісткості, раціональний розподіл матеріальних та фінансових ресурсів, а також забезпечення несучої здатності дорожніх конструкцій.

Метою статті є проведення аналізу можливості застосування георадарного обладнання при обстеженні конструктивних шарів дорожнього одягу

та земляного полотна автомобільних доріг, що знаходяться в експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Основним приладом, який використовується для георадіолокаційного обстеження автомобільних доріг є георадар [5 - 10]. Принцип дії георадарів заснований на випромінюванні у досліджуване середовище електромагнітних імпульсів тривалістю одиниці або частки наносекунди [11]. Випромінений імпульс, поширюючись у середовищі, зазнає відбиття та заломлення на границях середовищ з різними електрофізичними властивостями (електропровідність та діелектрична проникність). У результаті середовище формує над своєю поверхнею електромагнітне поле, амплітудні та часові параметри якого безпосередньо пов'язані зі структурою середовища, його фізико-механічними характеристиками (щільність, вологість). Основним способом відображення георадіолокаційних даних є побудова радорограм - комплексу записів амплітуд сигналів по глибині, що прийшли до приймальної антени, що відображають час проходження сигналу через досліджувану структуру. Інтерпретація радорограм ґрунтується на кількісному аналізі форми та часу приходу хвиль, що пройшли крізь досліджувану структуру і відбилися від наявних там неоднорідностей чи межі поділу середовищ.

Метод георадіолокаційного зондування в даний час широко застосовується в багатьох країнах в якості неруйнівного контролю стану автомобільних доріг, необхідного для вчасного запровадження заходів щодо підтримки їх стабільної роботи.

Останнім часом у США ведуться інтенсивні роботи зі створення нового типу георадарів із частотним скануванням. Також у США, протягом останніх років, проводяться дослідження щодо

визначення ступеня руйнування арматури мостів методами радіолокації. Це також підтверджує перспективність даного наукового напрямку.

При обстеженні автомобільних доріг георадіолокаційні дослідження використовуються для вирішення двох основних завдань:

- вимірювання міцнісних характеристик конструктивних шарів дорожнього одягу;
- виявлення дефектів та неоднорідностей у ґрунтовій основі, що впливають на стабільність та термін служби дорожнього одягу.

Водночас, за таких очевидних переваг, георадарні технології не знаходять широкого застосування у дорожньому будівництві. Розглянемо низку основних причин, що перешкоджають повсюдному впровадженню георадарних технологій.

Однією з основних причин є складність інтерпретації даних. По суті, в даний час радіолокаційний профіль, що відображає лише час проходження сигналу через досліджувану структуру, інтерпретується не як часовий розріз, а як глибинний розріз. Це призводить до суттєвих помилок у визначенні товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, оскільки час проходження сигналу пов'язаний не тільки з товщиною структури, але й з її електрофізичними характеристиками, які залежать від інших параметрів структури. Тому точність, яку заявляють виробники сучасного георадарного обладнання, можна гарантувати лише за правильної інтерпретації даних.

Виходом із ситуації є розробка математичного апарату вирішення зворотного завдання радіолокаційного зондування, що полягає у відновленні фізико-механічних характеристик матеріалів шарів дорожнього одягу та ґрунтів земляного полотна за величиною електрофізичних характеристик матеріалів та дозволить мінімізувати участь оператора в отриманні кінцевого результату.

Другою досить суттєвою причиною є те, що дефектоскопія будівельних конструкцій перебуває у стадії становлення. На озброєнні шляховиків фактично відсутні як приладова база так і математичний апарат для точного позиціонування та ідентифікації дефектів у тонких, слабкоконтрастних з електрофізичної точки зору шарах дорожнього одягу. Відсутній єдиний комплекс обладнання та математичного забезпечення для обстеження автомобільних доріг, що дозволяє гарантовано з високою точністю інтерпретувати результати георадарних обстежень дорожнього одягу та земляного полотна, оскільки на даний момент не вирішено зворотне завдання відновлення профілю електрофізичних характеристик матеріалів конструктивних шарів дорожнього одягу за значеннями характеристик розсіяного поля.

Третьою причиною є відсутність в Україні нормативної бази, яка регламентує обстеження автомобільних доріг за допомогою георадарів. Єдиним нормативним документом є «Рекомендації з обстеження конструкцій існуючих дорожніх одягів автомобільних доріг для обґрунтування проектних рішень» Р А.2.1-218-05416892-675, в якому один параграф присвячений обстеженню автомобільних доріг за допомогою георадара.

Виходячи з викладеного, стає очевидним, що назріла необхідність розробки якісно нового підходу до вирішення проблеми підвищення довговічності будівельних конструкцій, а саме дорожнього одягу та земляного полотна на автомобільних дорогах загального користування, а також у створенні високоефективної комплексної системи контролю поточного стану та прогнозування характеристик земляного полотна та дорожнього одягу методами неруйнівного контролю. Суть цього підходу полягає:

- у розробці методики визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу методами підповерхневої георадіолокації;

- у розробці системи діагностики прихованих дефектів покриття та основи дорожніх одягів на підставі вивчення властивостей крос-поляризаційної компоненти відбитого сигналу в плоскошарових середовищах;

- у вирішенні зворотного завдання відновлення профілю діелектричної проникності конструктивних шарів дорожнього одягу та земляного полотна за наборами значень розсіяного електромагнітного поля.

Наукова та практична реалізація цього підходу можлива при вирішенні цілого ряду завдань, а саме:

- розробка спеціального зразка вимірювального комплексу для георадарного дослідження дорожнього одягу та земляного полотна;

- розробка обчислювальних алгоритмів та програм візуалізації та інтерпретації даних зондування щодо визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів земляного полотна, ідентифікації та позиціонування підповерхневих дефектів;

- розробка методики визначення електрофізичних характеристик матеріалів шарів дорожніх одягів для створення бази даних до вимірювального комплексу та методики відновлення фізико-механічних характеристик матеріалів неруйнівним методом, що ґрунтується на відновленні профілю діелектричної проникності конструкції за результатами георадарного обстеження;

- розробка методики товщинометрії конструктивних шарів дорожнього одягу, заснованої на адекватних математичних моделях;

- розробка методики дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами підповерхневого зондування, в основу якої покладено математичні моделі виявлення та ідентифікації підповерхневих дефектів шарів дорожнього одягу (тріщини, ділянки руйнувань, підвищеного зволоження);

- дослідження можливості використання методів дистанційного зондування для визначення ділянок розшарування асфальтобетонних шарів дорожніх одягів.

Вирішення перелічених завдань дозволить:

- розробити методику комплексного моніторингу автомобільних доріг методами дистанційного зондування;

- розробити концепцію дорожньої бази даних про стан дорожнього одягу, земляного полотна за результатами обстеження методами підповерхневої георадіолокації;

- визначити кількісні показники для оцінки та прогнозування стану дорожнього одягу та земляного полотна за результатами обстеження.

Отже, потреби практики настійно стимулюють розвиток наукових досліджень на вирішення перелічених вище завдань.

Основними напрямками досліджень, які виконуються у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті спільно зі спеціалістами Харківського національного університету ім. В.М. Каразіна та Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усікова Національної академії наук України є:

- розробка нових та вдосконалення існуючих комплектів георадіолокаційної апаратури та відповідного програмного забезпечення для первинної обробки та інтерпретації даних підповерхневого зондування;

- розробка та вдосконалення методик визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу;

- розробка методики дефектоскопії асфальтобетонних шарів дорожнього одягу;

- вирішення задачі пошуку локальних включень в конструктивних шарах дорожнього одягу.

Для проведення експериментальних досліджень, спрямованих на розробку методик товщинометрії та дефектоскопії конструктивних шарів дорожнього одягу фахівцями кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою ХНАДУ застосовується комплект георадіолокаційного обладнання, яке використовує надширокопasmові сигнали (рис.1). Даний комплекс був розроблений науковцями Інституту радіофізики та електроніки

ім. О.Я. Усікова Національної академії наук України.



Рис. 1. Комплект георадіолокаційної обладнання, що призначений для визначення електрофізичних характеристик ґрунтів земляного полотна та дорожнього одягу.

До складу комплекту входять два основних приймально-передавальних антенних блоки, перший з яких призначений для зондування на глибину до 1,2 м і застосовується при обстеженні дорожніх одягів, другий антенний блок реалізує принцип крос-поляризації та призначений для обстеження пакету асфальтобетонних шарів дорожнього одягу для розв'язання задач пошуку підповерхневих дефектів. Комплект георадіолокаційного обладнання використовується як при проведенні експериментальних лабораторних досліджень дорожнього одягу, так і при польових обстеженнях з метою розробки системи моніторингу автомобільних доріг методами радіолокації.

Як було зазначено раніше, основною складністю при використанні георадарів є складність інтерпретації радарограм. Знання форми зондувального, відбитого та сумарного імпульсу, що реєструється антенним блоком, дозволяє суттєво спростити завдання інтерпретації даних.

У зв'язку з цим при розробці методики визначення товщини конструктивних шарів дорожніх одягів виникає необхідність у моделюванні поширення сигналу, розробці відповідних алгоритмів, що дозволяють коректно інтерпретувати результати георадарних обстежень дорожнього одягу та практичної перевірки адекватності моделей, покладених в основу алгоритмів інтерпретації.

Моделювання поширення сигналу в середовищі з відомими електрофізичними характеристиками дозволяє визначити форму та амплітуду повного сигналу, даючи можливість

коректної інтерпретації радарограм з метою визначення швидкості поширення сигналу в досліджуваних структурах, електрофізичних

характеристик конструктивних матеріалів шарів дорожніх одягів, границі розділу середовищ (рис. 2).

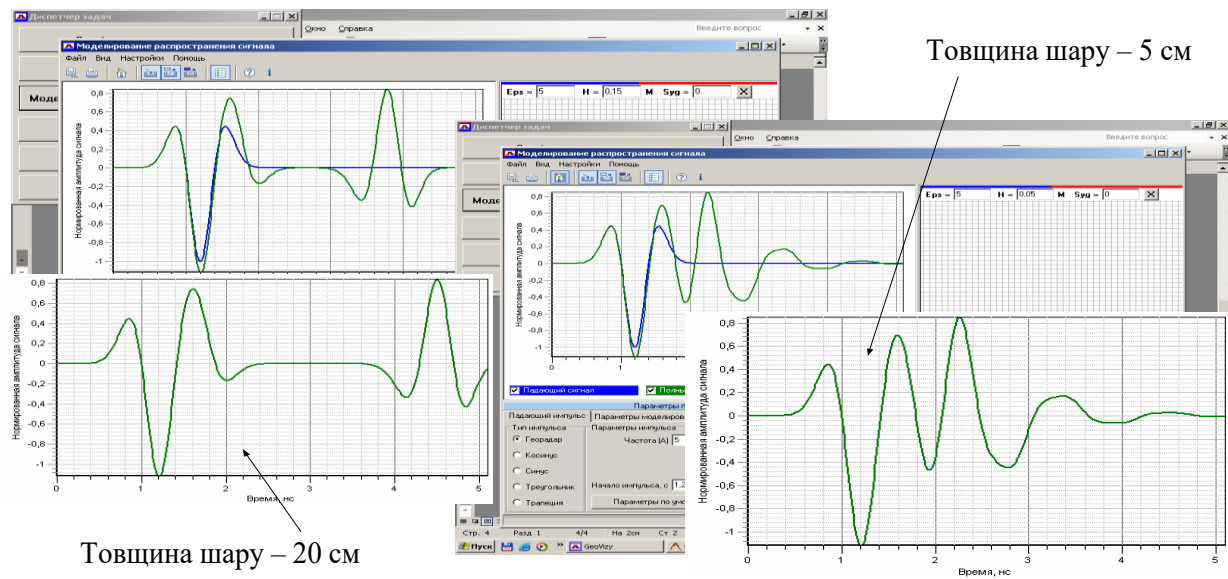


Рис. 2. Моделювання поширення імпульсу при товщині конструктивного шару 20 см та 5 см

Експериментальні лабораторні дослідження, а також використання методів моделювання хвильового поля показали, що відбиті сигнали в середовищах з відомими електрофізичними характеристиками залежать від великої кількості факторів, а саме: кількості шарів; товщини конструктивних шарів; наявності структурних перешкод у результаті відбиття сигналу від границі розділу «повітря - підстилаюче середовище» та інших поверхонь; накладання прямого (падаючого) і відбитого сигналів внаслідок малої товщини конструктивних шарів дорожніх одягів, що викликає труднощі у визначенні границі поділу середовищ на радарограмах. Тому інтерпретація радарограм повинна проводитися не тільки на основі аналізу амплітуди прямого та відбитого сигналів, що проходять через досліджувану структуру, а також шляхом співставлення результатів моделювання поширення сигналу в даному середовищі відомої товщини з експериментальними даними.

З іншого боку, первинна обробка експериментальних даних зводиться до проблеми визначення часової затримки відбитого від внутрішніх неоднорідностей імпульсу. Основна проблема в цьому випадку полягає в необхідності поділу сигналів, що накладаються один на одного, і у визначенні відповідних, наприклад початкових, моментів часу в кожному з сигналів. Раніше були запропоновані підходи до її вирішення [12], засновані на застосуванні перетворення Гільберта і

придатні для зондування шарів діелектрика, що мають ефективну більшу товщину, ніж просторовий розмір зондуючого імпульсу. З іншого боку, у дорожньому будівництві виникає необхідність аналізу властивостей багатшарових структур, що складаються з тонких порівняно з характерним просторовим розміром шару, що зондується імпульсом. Безпосереднє застосування відомих методів обробки сигналів у такому випадку утруднено. Тому було розроблено обчислювальні алгоритми для інтерпретації даних зондування багатшарових об'єктів із шарами малої електричної товщини [13].

Для перевірки та практичного використання запропонованої схеми визначення часової затримки сигналів, що дозволяє обчислювати товщину досліджуваної структури, було розроблено відповідне програмне забезпечення. За допомогою цього програмного продукту були проведені серії лабораторних експериментів з метою встановлення роздільної здатності методу, результати яких представлені на рисунку 3.

Як показали проведені експериментальні лабораторні дослідження, метод дозволяє з досить високою точністю відновлювати товщину шару, що досліджується. Так для шарів з істинною товщиною 9 см, 15 см і 20 см, відновлені за радарограм значення склали 9,1 см, 15,05 см, 20,15 см відповідно.

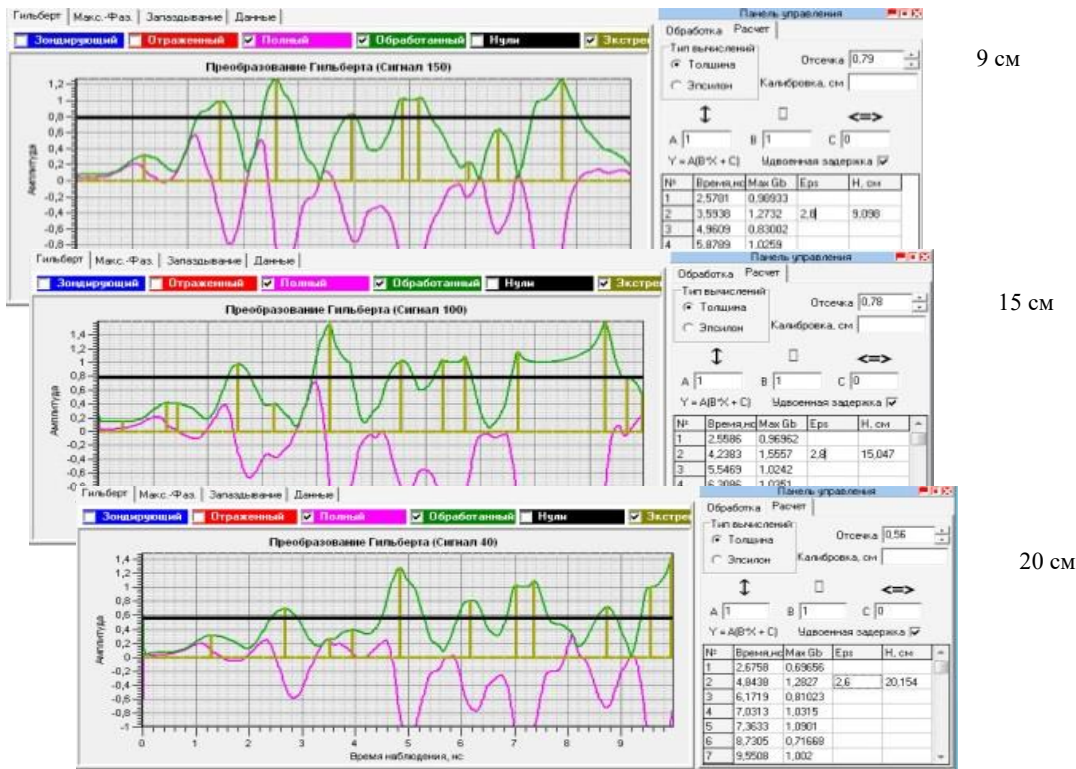


Рис. 3. Вікно програми при обробці радарограм, отриманих при обстеженні шару піску товщиною 9 см, 15 см, 20 см, відповідно

Висновки та пропозиції подальших досліджень

Отже, за результатами проведених лабораторних вимірювань, можна зробити висновок, що знання діелектричної проникності досліджуваної структури робить запропонований алгоритм обробки георадарних даних придатним для практичного застосування і може бути застосований для діагностики конструкції дорожнього одягу з метою вирішення задач товщинометрії конструктивних шарів дорожнього одягу та визначення неоднорідності геометричних параметрів шарів конструкції нежорсткого дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування, що знаходяться в експлуатації.

Література

1. Josef Stryk. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*, 2008. Vol 5, No 1. 9 p.
2. Wong K.T., Urbaz 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. P. 1-13.*
3. 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. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. № 8(12). P. 1-10. <https://doi.org/10.1177/1687814016683154>

4. 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*, 2018. Vol. 356. 8 p. DOI : [10.1088/1757-899X/356/1/012023](https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012023)
5. Josef Stryk. Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*, 2008. Vol 5, No 1. 9 p.
6. Jol Harry M. *Ground penetrating radar, theory and applications*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
7. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43. PP. 119 - 138. DOI : [10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
8. 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.
9. 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.
10. Батракова А.Г. *Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.11 / ХНАДУ. Х., 2014. 390 с.*
11. Владов М.Л., Старовойтов А.В. *Введение в георадиолокацию: учеб. пособие для студ. высш. уч. завед.: М.: МГУ, 2004. 153 с.*
12. Крылов В.В. *Определение понятия задержки сигнала по гильберту и методы её измерения.* / В.В. Крылов, Д.М. Пономарев *Радиотехника и Электроника*, 1980, т.25., №1, с.204-206.
13. Головин Д.В. *Алгоритм определения задержки импульсных сигналов, основанный на преобразовании Гильберта* / Д.В. Головин, С.В. Греков, А.Г. Батракова // *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна: Радіофізика та електроніка*, 2009. № 853, вип. 14, с. 68-73

References

1. Josef Stryk. (2008) Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*, Vol 5, No 1. 9 p.
2. Wong K.T., Urbaz E. (2012) 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. P. 1-13.
3. Li Shengli, Wang Chaoqun, Sun Panxu, Wu Guangming, Wang Dongwei. (2016) A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. *Advances in Mechanical Engineering*. № 8(12). P. 1-10. <https://doi.org/10.1177/1687814016683154>
4. M Miskiewicz, J Lachowicz, P Tysiac, P Jaskula, K Wilde. (2018) The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 356. 8 p. DOI : [10.1088/1757-899X/356/1/012023](https://doi.org/10.1088/1757-899X/356/1/012023)
5. Josef Stryk. (2008) Road diagnostics - ground penetrating radar possibilities. *Intersections Journal*, Vol 5, No 1. 9 p.
6. Jol Harry M. (2009) Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V. 508 p.
7. Saarenketo T., Scullion T. (2000) Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 43. PP. 119 - 138. DOI : [10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
8. Forest R., Pynn J., Alani A., Ferne B. (2004) The Use of Ground Penetrating Radar for the Monitoring of Road Properties. In: TRL annual research review 2003. Crowthorne: TRL, PP. 25 - 37.
9. L. Al-Qadi, S. Lahouar. (2005) Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar. *Materials Evaluation*. Vol. 63. № 9. PP. 921 - 925.
10. Batrakova A. (2014) Methodology for monitoring road traffic of a non-zhorsk type due to the stoppage of georadiolocation technologies: dis. ... Dr. tech. sciences: spec. 05.22.11 / KHNADU. H., 390 p.
11. Vladov M., Starovoitov A. (2004) Introduction to GPR: textbook. allowance for students. higher uch. head: M.: MGU, 153 p.
12. Krylov V., Ponomarev D. (1980) Definition of the concept of Hilbert signal delay and methods for its measurement. *Radio Engineering and Electronics*, vol. 25., No. 1, pp. 204-206.
13. Golovin D., Grekov S., Batrakova A. (2009) Algorithm for Determining the Delay of Pulse Signals Based on the Hilbert Transform. *Bulletin of KhNU im. V.N. Karazina: Radiophysics and Electronics*, No. 853, no. 14, p. 68-73.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.О. Бугаєвський, Харківський національний автомобільно – дорожній університет, Україна.

Автор: БАТРАКОВА Анжеліка Геннадіївна
професор кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail - agbatr@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

Автор: УРДЗІК Сергій Миколайович
доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail - urdzik@khadi.kharkov.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>

USE OF GPR TECHNOLOGIES IN THE ROAD PAVEMENT SURVEY

A. Batrakova, S. Urdzik

Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

The article contains information on the study of the possibilities of introducing GPR technologies into the practice of road surveying. The prospects for the development of this scientific direction are also analyzed. The tasks that can be solved with the use of ground-penetrating radar equipment during the non - rigid pavement.

The main reasons preventing a more dynamic implementation of ground-penetrating radar technologies in the construction industry are considered in detail. The main reasons are: the difficulty of interpreting GPR data, the lack of an instrument base, the lack of a single complex of equipment and mathematical support for non - rigid pavement, which allows for guaranteed high-precision interpretation of the results of GPR surveys of non - rigid pavement and ground surfaces, and the absence of a regulatory framework that regulates the survey of highways with the use of ground-penetrating radars. Modeling of signal propagation in an environment with known electrophysical characteristics allows to determine the shape and amplitude of a complete signal, giving the possibility of correct interpretation of radargrams in order to determine the speed of signal propagation in the studied structures, electrophysical characteristics of structural materials of layers of non - rigid pavement, the interface of environments. To carry out experimental studies aimed at the development of methods of thickness measurement and defectoscopy of structural layers of non - rigid pavement, specialists of the Kharkiv national automobile and highway university use a set of geolocation equipment that uses ultra-broadband signals. A set of georadar equipment is used both for conducting experimental laboratory research of road clothing and for field surveys for the purpose of developing a road monitoring system using radar methods. For the verification and practical use of the proposed scheme for determining the time delay of signals, which allows to calculate the thickness of the structure under study, appropriate software was developed.

A series of laboratory experiments were conducted using this software product. As shown by the experimental laboratory studies, the method allows to restore the thickness of the layer under investigation with a fairly high accuracy.

Keywords: GPR diagnostics, highway, non - rigid pavement, ground surface, reliability, operational condition, research, method, electrophysical properties.