

УДК 625.7/8

АЛГОРИТМ ОЦІНКИ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ГЕОРАДІОЛОКАЦІЙНОГО ОБСТЕЖЕННЯ

**В.О. Процюк, асистент, Луцький національний технічний університет,
А.Г. Батракова, проф., д.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Розглянуто вплив вологості на міцнісні та деформаційні характеристики підстильних ґрунтів. Запропоновано алгоритм оцінки вологості земляного полотна за результатами георадіолокаційного обстеження.

Ключові слова: дорожній одяг, земляне полотно, вологість, міцність, модуль пружності, діелектрична проникність.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

**В.А. Процюк, ассистент, Луцкий национальный технический университет,
А.Г. Батракова, проф., д.т.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

Аннотация. Рассмотрено влияние влажности на прочностные и деформационные характеристики подстилающих грунтов. Предложен алгоритм оценки влажности земляного полотна по результатам георадиолокационного обследования.

Ключевые слова: дорожная одежда, земляное полотно, влажность, прочность, модуль упругости, диэлектрическая проницаемость.

THE ESTIMATION ALGORITHM OF SUBGRADE HUMIDITY ON THE GPR SURVEY RESULTS

**V. Protsiuk, T. Asst., Lutsk National Technical University, A. Batrakova,
Prof., D. Sc. (Eng.), Kharkiv National Automobile and Highway University**

Abstract. The effect of humidity for strength and deformation characteristics of the underlying soils is considered. The estimation algorithm of subgrade humidity on the GPR survey results is proposed.

Key words: pavement, subgrade, humidity, strength, modulus of elasticity, dielectric constant.

Вступ

Вологість є фактором, що сильно впливає на міцнісні та деформаційні характеристики ґрунтів земляного полотна та, відповідно, всієї конструкції дорожнього одягу. Спираючись на дані вітчизняних і зарубіжних нормативних документів [1, 2, 3] та результати експериментальних досліджень [4, 5], можна констатувати зниження міцнісних (більш ніж у 3 рази) та деформаційних (до 10 разів) характеристик підстильних ґрунтів зі збіль-

шенням вмісту вологи. Помилки у визначенні вологості підстильного ґрунту можуть стати причиною передчасного руйнування конструкції дорожнього одягу, погіршення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг та збільшення витрат на ремонтні роботи.

Тому питання оцінки (зокрема й експериментальної) вологості ґрунтів є актуальним, про що свідчать численні вітчизняні та закордонні дослідження.

Аналіз публікацій

Визначенню вологості підстильних ґрунтів та встановленню закономірностей її зміни у річному циклі присвячені дослідження В.М. Сіденка [6], О.Я. Тулаєва [7], В.І. Рувінського [8], І.А. Золотаря [7], Н.А. Пузакова [7], Е.І. Шелопаєва [9], М.Б. Корсунського [10]. У роботах учених відображені результати багаторічних досліджень, що були проведені на різних територіях (тип місцевості за характером зволоження), у різних дорожньо-кліматичних зонах, для різних умов роботи конструкції дорожнього одягу. Професором В.М. Сіденком розроблено теоретичні засади тепловологоперенесення у ґрунтах земляного полотна для У-I, У-II і У-III дорожньо-кліматичних зон.

Таким чином, на сьогодні створено надійний теоретичний фундамент з оцінки впливу вологості на міцнісні та деформаційні характеристики ґрунтів та несучу здатність конструкції дорожнього одягу.

Мета і постановка завдання

Успішне застосування теоретичних методів передбачає застосування інструментальних методів оцінки вологості ґрунтів, які у наш час знаходяться у стадії становлення. Вибіркова оцінка характеристик ґрунтів земляного полотна для оцінки експлуатаційних властивостей автомобільної дороги, яка проводиться через 250 м [11], є недостатньою. Про це свідчать результати оцінки вологості ґрунтів земляного полотна, отримані за результатами обстеження автомобільних доріг загального користування [12, 13]. Як доводять результати польових обстежень [12, 13], вологість ґрунтів земляного полотна може істотно змінюватися навіть на незначних за протяжністю ділянках доріг. Це істотно знижує достовірність інформації, отриманої за результатами ґрунтово-геологічних вишукувань.

Усунення вказаних недоліків пов'язується з використанням методів підповерхневої георадіолокації, що адаптовані для вирішення задач діагностики ґрунтів земляного полотна. Безперечною перевагою георадарних технологій, порівняно з традиційними методами, є можливість оцінювання вологості підстильних ґрунтів у безперервному режимі на всій ділянці автомобільної дороги. Тому в роботі запропоновано метод оцінки вологості ґрун-

тів земляного полотна за результатами георадарної діагностики, що дозволяє визначити значення вологості підстильного ґрунту в безперервному режимі, з метою подальшого використання отриманих даних для оцінки міцності конструкції дорожнього одягу за критеріями граничного стану.

Алгоритм оцінки вологості земляного полотна та несучої здатності конструкції дорожнього одягу

Методика визначення вологості ґрунту в польових умовах із застосуванням георадара «ОДЯГ-1» базується на основних закономірностях поширення електромагнітних хвиль в неоднорідному середовищі та складається з основних етапів:

- а) запис набору калібрувальних сигналів з метою видалення сигналу прямого проходження (сигнал, що проходить між випромінювачем та приймачем);
- б) сканування поверхні узбіччя автомобільної дороги;
- в) інтерпретація радарограм з метою встановлення діелектричної проникності (ϵ);
- г) оцінка вологості ґрунту на узбіччі автомобільної дороги з використанням залежностей між електрофізичними (діелектрична проникність) параметрами та вологістю ґрунту;
- д) розрахунок вологості ґрунтів під конструкцією дорожнього одягу із застосуванням теоретичних рішень В.М. Сіденка [6];
- е) встановлення міцнісних та деформаційних характеристик ґрунтів з використанням залежностей між діелектричною проникністю, модулем пружності, кутом внутрішнього тертя та коефіцієнтом зчеплення ґрунту.

Перший етап передбачає калібрування антенного блока, визначення даних щодо типу та фізичних характеристик ґрунту, отриманих під час відбору зразка відповідно до ДСТУ Б В.2.1-8-2001 [14]. Калібрування антенного блока виконується з метою запису калібрувальних сигналів, які використовуються під час обробки георадарного профілю для визначення діелектричної проникності ґрунтів. Відбір зразка ґрунту здійснюється для встановлення типу й вологості ґрунту традиційним методом на початковій ділянці. Зразок також необхідно відбирати на ділянках, де ускладнюється інтерпретація даних георадарного зондування.

На другому етапі виконується сканування узбіччя автомобільної дороги георадаром з центральною частотою зонduючого імпульсу 1,2 ГГц. Зондування проводиться в поздовжньому і поперечному напрямках. Швидкість переміщення георадара обмежується рівністю поверхні узбіччя.

Третій етап передбачає використання алгоритму оцінки діелектричної проникності ґрунтів, що реалізує метод пошарового визначення діелектричної проникності шляхом вирішення задачі про відбиття монохроматичної хвилі від плоскошаруватого середовища [13]. Алгоритм реалізується в такій послідовності:

а) у процесі первинної обробки даних зондування за допомогою перетворення Гільберта визначаються часові затримки сигналів (Δt_i) та їх амплітуди. Ця інформація є вихідною для роботи алгоритму;

б) визначається амплітуда сигналу, який випромінюється. Амплітуда цього імпульсу визначається у процесі отримання калібрувального сигналу від листа металу. Оскільки коефіцієнт відбиття від металу дорівнюватиме одиниці, то амплітуда під час відбиття від листа металу, яку реєструє приймальна антена, дорівнює амплітуді падаючого на поверхню імпульсу ($A_{n-1,n}$);

в) визначається амплітуда сигналу, відбитого від поверхні узбіччя. Цей сигнал першим реєструється приймальною антеною ($A_{n,n-1}$);

г) розраховується коефіцієнт відбиття від поверхні узбіччя

$$R_{n-1,n} = \frac{A_{n,n-1}}{A_{n-1,n}}; \quad (1)$$

д) розраховується діелектрична проникність. У загальному вигляді діелектрична проникність встановлюється за залежністю

$$\sqrt{\varepsilon_n} = \sqrt{\varepsilon_{n-1}} \frac{1 - R_{n-1,n}}{1 + R_{n-1,n}}. \quad (2)$$

Відомо, що діелектрична проникність повітря $\varepsilon_n = 1$. Тоді з рівняння (2) діелектрична проникність верхнього шару ґрунту узбіччя (для обчисленого значення $R_{0,1}$) може бути подана у вигляді

$$\sqrt{\varepsilon_1} = \sqrt{\varepsilon_n} \frac{1 - R_{0,1}}{1 + R_{0,1}}, \quad \varepsilon_1 = \left(\frac{1 - R_{0,1}}{1 + R_{0,1}} \right)^2. \quad (3)$$

Вказаний алгоритм реалізований у програмному комплексі GeoVizu.

На четвертому етапі визначається вологість ґрунту на узбіччі з використанням залежностей між діелектричною проникністю та вологістю ґрунтів різних типів [15]:

а) супісок:

$$W = 0,002\varepsilon^3 - 0,1073\varepsilon^2 + 2,2134\varepsilon + 4,4386;$$

б) суглинок:

$$W = -0,002\varepsilon^3 + 0,0163\varepsilon^2 - 0,0046\varepsilon + 14,679;$$

в) глина:

$$W = -0,0013\varepsilon^3 + 0,1009\varepsilon^2 - 1,7474\varepsilon^2 + 26,147,$$

де W – вологість ґрунту, %; ε – діелектрична проникність ґрунту, од.

Вихідними даними для реалізації п'ятого етапу є тип місцевості за характером зволоження та вологість ґрунту на узбіччі. Визначення вологості підстильного ґрунту під конструкцією дорожнього одягу проводиться з використанням розв'язку В.М. Сіденка [6]

$$W(z, T) = W_{\text{ПВ}} - [W_{\text{ПВ}} - (W_{\text{П}} + m_1 T)] \frac{z}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 a T_1}{l^2} \right) \left[W_{\text{П}} - W_{\text{ПВ}} - \frac{(-1)^n m l^2}{\pi^2 n^2 a_1} \right] + \frac{(-1)^n m l^2}{\pi^2 n^3 a_1} \right\} \sin \frac{n \pi z}{l}, \quad (4)$$

де W – розрахункова вологість, ч.од.; $W_{\text{ПВ}}$ – повна вологоємність ґрунту, ч.од.; $W_{\text{П}}$ – початкова вологість, ч.од.; m – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність наростання вологості ґрунту полотна, 1/год; z – глибина, на якій проводиться розрахунок вологості, м; T – тривалість вологонакопичення, год.; l – відстань до джерела зволоження, м; n – розрахунковий шар; a_1 – коефіцієнт вологопровідності, $\text{м}^2 \cdot \text{год}$.

За результатами георадарного обстеження ділянки автомобільної дороги з II типом місцевості за характером зволоження (ґрунт – супісок) розраховано поле вологості ґрунту земляного полотна під дорожнім одягом упродовж періоду весняного вологонакопичення (рис. 1).

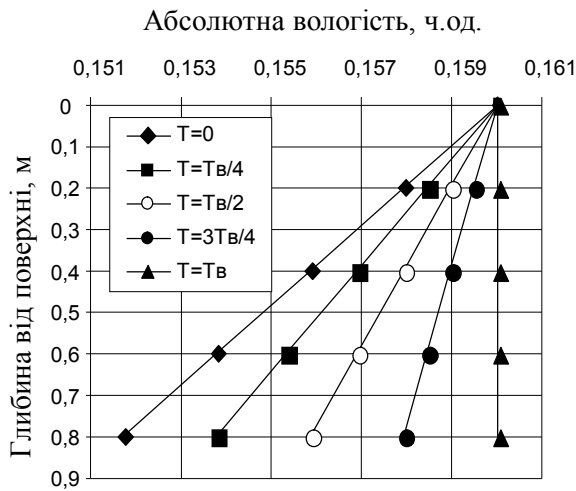


Рис. 1. Зміна поля вологості ґрунту під конструкцією дорожнього одягу

На завершальному етапі алгоритму визначаються міцнісні та деформаційні характеристики підстильного ґрунту. Вихідними даними є абсолютна вологість та відносна вологість (W) ґрунту, а також експериментально встановлені залежності між діелектричною проникністю, модулем пружності, кутом внутрішнього тертя й коефіцієнтом зчеплення ґрунту [5, 15].

Якщо відомі або визначені експериментально [13] товщини шарів конструкції дорожнього одягу, стан матеріалу шарів основи та покриття відповідно до нормативних документів, розраховується міцність дорожнього одягу за критеріями граничного стану [1]. Схему запропонованого алгоритму оцінки вологості земляного полотна наведено на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм визначення вологості ґрунтів земляного полотна

Запропонований алгоритм може бути застосований під час вирішення задач моніторингу, що спирається на результати оцінки вологості та несучої здатності ґрунтів земляного полотна як у нерозрахунковий період, так і в період відтанення земляного полотна та максимального вологонакопичення.

Висновки

Запропоновано алгоритм оцінки вологості підстильного ґрунту за результатами георадарного обстеження та залучення теорії тепловологоперенесення. Для підтвердження адекватності алгоритму проведено серію

польових випробувань [5, 15]. Ці результати, спільно з результатами лабораторних досліджень зв'язку діелектричної проникності ґрунтів різних типів з вологістю ґрунтів, їх мінцисними та деформаційними характеристиками складають основу:

- а) оцінки несучої здатності дорожнього одягу за змінних умов експлуатації;
- б) встановлення найбільш послаблених ділянок на етапі передпроектних вишукувань;
- в) визначення максимального навантаження на вісь у період зниження несучої здатності дорожнього одягу з метою попередження його передчасного руйнування.

Література

1. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004. – Чинний від 2005-01-01. – К. : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2004. – 153 с. – (Стандарт Укравтодор).
2. Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. ТПК 45-3.03-112-2008. – Действующий от 2009-07-01. – Офиц. изд. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 84 с. – (Технический кодекс установившейся практики).
3. Проектирование нежестких дорожных одежд : ОДН 218.046-01. – Действующий от 2001-01-01. – М. : Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства России (РОСАВТОДОР), 2001. – 94 с. – (Отраслевые дорожные нормы).
4. Гнездилова С.А. Учёт изменений состояния грунтов при проектировании дорожных одежд (на примере Белгородской области) : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» / С.А. Гнездилова. – М., 2010. – 23 с.
5. Ряпухін В.М. Дослідження зв'язку між електрофізичними і деформаційними характеристиками ґрунту / В.М. Ряпухін, А.Г. Батракова, В.О. Процюк // Містобудування та територіальне планування: науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 45. – С.102–107.
6. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна / В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 116 с.
7. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / под. ред. И.А. Золотаря. – М. : Транспорт, 1971. – 416 с.
8. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В.И. Рувинский. – М.: Транспорт, 1982. – 168 с.
9. Шелопаев Е.И. Прогнозирование водно-теплого режима земляного полотна и дорожной одежды с применением ЭВМ / Е.И. Шелопаев // Автомобильные дороги. – 1973. – № 10. – С. 26.
10. Корсунский М.Б. Оценка прочности дорог с нежесткими одеждами / М.Б. Корсунский. – М.: Транспорт, 1966. – 151 с.
11. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва: ДБН А.2.1-1-2008. – Чинний від 2008-07-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 72 с. – (Державний стандарт України).
12. Кулижников А.М. Неразрушающие георадарные методы в инженерных изысканиях / А.М. Кулижников, А.А. Белозеров // Геопрофи. – 2004. – № 5. – С. 44–47.
13. Батракова А.Г. Оценка состояния дорожных одежд с привлечением георадарных технологий : монография / А.Г. Батракова. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 156 с.
14. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків : ДСТУ Б В.2.1-8-2001. – Чинний від 2002-04-01. – К. : Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2002. – 16 с. – (Державний стандарт України).
15. Процюк В.А. Применение георадарных технологий при определении прочностных характеристик грунтов земляного полотна / В.А. Процюк, А.Г. Батракова // Автомобильные дороги и мосты. – 2013. – Вып. 2 (12). – С. 40–44.

Рецензент: В.К. Жданюк, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 22 березня 2016 р.