

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ЗА ГЕОРАДАРНИМИ ДАНИМИ

Батракова А. Г., Дорожко Є. В., Урдзік С. М., Шелкова І. С., Назаренко І. В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розроблено динамічну адаптивну модель прогнозування стану конструкції дорожнього одягу, що містить інформацію про вологість підстильного ґрунту, яка отримана під час георадарного зондування. Модель враховує поправку між модельним і визначеним у процесі георадарного зондування коефіцієнтом запасу міцності. Перевагою такого підходу є скорочення набору вихідних даних і підвищення ефективності прогнозування.

Ключові слова: георадарне зондування, динамічна модель, прогнозування міцності, дорожній одяг, вологість ґрунту, діелектрична проникність.

Вступ

Сучасний стан автомобільних доріг України визначається значним рівнем зношення дорожніх одягів, що обумовлено інтенсивним збільшенням рівня транспортних навантажень і частки важкого транспорту та впливом кліматичних факторів. Передчасне руйнування дорожніх конструкцій призводить до значних економічних втрат, погіршення безпеки руху та зниження пропускної здатності доріг.

Одним із ключових факторів, що визначають термін експлуатації дорожнього одягу, є вологість підстильного ґрунту земляного полотна. Зміна вологості безпосередньо впливає на міцнісні та деформаційні характеристики ґрунту, що також позначається на роботі всієї дорожньої конструкції. Дослідженнями [1] доведено, що на автомобільних дорогах III–IV категорій із конструкціями «слабкої» міцності вологість підстильного ґрунту найбільш суттєво впливає на несну здатність конструкції дорожнього одягу. Найбільше на загальну міцність конструкції дорожнього одягу впливає міцність підстильного ґрунту (відносна вологість) для «слабких» конструкцій (на 50,2 %), що влаштовані на підстильному ґрунті з глини легкої пилуватої. Збільшення вологості ґрунту з 0,55 Вт до 0,80 Вт призводить до втрати його несної здатності на 83,9 %.

Традиційні методи визначення вологості ґрунту є трудомісткими, вимагають порушення цілісності покриття та не забезпечують необхідної оперативності контролю. Георадарне зондування як неруйнівний метод діагностики дозволяє оперативно визначати стан підстильного ґрунту та його вологість на основі електрофізичних властивостей. Проте для ефективного використання

цієї технології у системах управління станом доріг необхідно інтегрувати георадарні дані в моделі прогнозування деградації дорожніх конструкцій.

Аналіз публікацій

Для вирішення проблеми аналізу впливу вологості на процес деградації дорожнього одягу на сьогодні застосовують два основні підходи. Перший (емпіричний) полягає в тривалому моніторингу на вибраних ділянках таких параметрів, як вологість, температура, кількість прикладань навантаження. З огляду на зміну погодних факторів (температура й вологість) розробляється модель деградації дорожнього одягу як залежність поточного стану конструкції від кількості прикладань навантаження відповідно до сезонності погодно-кліматичних факторів. Прикладами такого підходу є роботи [2–4]. Другий підхід (механічний) ґрунтується на лабораторних вимірюваннях поведінки зразків матеріалів (асфальтобетону, ґрунтів) за різних значень навантаження. На основі результатів вимірювань створюється базова модель, що визначає зв'язок між властивостями матеріалу та навантаженням. Наприклад, досліджується модуль пружності матеріалу залежно не тільки від величини навантаження, але й від поточного значення вологості ґрунту. Для перевірки такої нелінійної моделі застосовують тести тривісного стискання в умовах контролю над всмоктуванням за повторюваних навантажень, що дозволяє прогнозувати значення модуля пружності й коефіцієнта Пуассона матеріалів шарів з незв'язних матеріалів та ґрунтів. Це наявне в роботах [1–4]. Такі моделі використовуються для прогнозування деградації конструкції дорожнього одягу.

Недоліками наведених підходів є такі:

а) неможливість оперативного аналізу реального стану конструкції, тобто здійснення безперервного моніторингу реальних значень таких найважливіших параметрів, як вологість ґрунтів;

б) відсутність гарантій адекватності й законності застосування результатів лабораторних випробувань до матеріалів, що працюють у реальних умовах експлуатації;

в) у разі поширення моделі деградації локальних ділянок на всю автомобільну дорогу існує неявне припущення щодо просторової однорідності конструкції дорожнього одягу.

З іншого боку, на сьогодні існує ефективний інструмент одержання інформації про внутрішню будову конструкції дорожнього одягу та її параметри – георадар. Він дозволяє здійснювати за відносно невеликих витрат безперервний лінійний моніторинг стану шарів покриття, основи й ґрунтів [1–11]. Тому подальші дослідження спрямовані на об'єднання можливостей емпіричного та механічного підходів у межах єдиної практичної моделі аналізу й прогнозування міцності конструкції дорожнього одягу під час георадарного зондування. Вирішення цих завдань дозволяє розробити алгоритм аналізу несної здатності дорожнього одягу, визначити поправки до адаптивних динамічних моделей деградації дорожнього одягу під час георадарної діагностики ґрунтів, що розвиває й вдосконалює наявні методи діагностики та прогнозування стану дорожнього одягу нежорсткого типу [2, 3].

Мета та постановка завдання

Метою статті є розроблення динамічної моделі прогнозування міцності дорожнього одягу, що використовує результати георадарного зондування для визначення рівня впливу вологості підстильного ґрунту на процеси деградації дорожньої конструкції.

Динамічна модель прогнозування міцності дорожнього одягу з урахуванням георадарного зондування

Розглянемо розвиток динамічних методів щодо завдання врахування впливу вологості підстильного ґрунту. Як і в роботах [9, 10], розглянемо ситуацію, коли під час періодичних обстежень були визначені так звані проблемні ділянки (довжиною від 20 м до 500 м), тобто ділянки, руйнування яких відбувається швидше, за передбачене стандартною моделлю прогнозування. Основна осо-

бливість динамічних моделей прогнозування – моделювання процесів, процес яких змінюється з часом.

Визначимо як показник стану конструкції дорожнього одягу загальний еквівалентний модуль пружності у вигляді співвідношення

$$P_{наб,t} = P_{мод,t} + \alpha_t + \xi_t, \quad (1)$$

де $P_{наб,t}$ – зареєстрований стан дорожнього одягу в момент часу t ; $P_{мод,t}$ – стан дорожнього одягу відповідно до прийнятої базової моделі – розрахунковий стан; α_t – відхилення реального процесу прогнозування від розрахункового; ξ_t – поправка, що враховує вплив випадкових факторів, тобто відмінності в стані різних ділянок, що перебувають в однакових умовах.

На цьому етапі ми ще не здійснили поділ величини α_t на окремі компоненти, кожна з яких пов'язана з певним фактором (зокрема й з вологістю ґрунтів). Водночас використовується відома базова модель прогнозування, наприклад статична регресійна модель, що дозволяє обчислювати розрахункові значення показника стану в задані моменти часу.

Припустимо також, що випадкова величина ξ_t підпорядковується нормальному розподілу з нульовим середнім значенням, тобто можливі випадкові відхилення. Величина α_t (структурне відхилення [2, 3] визначає відмінність вимірюваного (фактичного) показника стану конструкції дорожнього одягу від прогнозного значення згідно з базовою моделлю.

Як зазначено в [2, 3], для опису поведінки таких показників стану конструкції дорожнього одягу, як загальний еквівалентний модуль пружності конструкції, у багатьох випадках прогнозування на основі сигмоїдальної моделі не є ефективним. Для ділянок автомобільних доріг з умовами експлуатації, що відрізняються від проектних, найкращі результати забезпечує модель на основі параболічної інтерполяції разом з адаптивною поправкою.

Відповідно до динамічної моделі завдання прогнозування визначено як процедуру пошуку відхилення елементу моделі ($F = f(K_E, K_\tau, K_\sigma, K_n | N, E_i, h_i, D_i, E_{zp},$

$\phi_{zp}, c_{zp}, R_u, m, T, W)$ – коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву в підстильних ґрунтах ($K_{міц}^\tau$), у деякий момент часу в майбутньому

за допомогою розкладання цієї величини в ряд Тейлора [2, 3]:

$$\alpha_{2,t+\delta} = \alpha_{2,t} + \alpha'_{2,t}\delta + \frac{\alpha''_{2,t}}{2!}\delta^2 + \dots + \frac{\alpha^{(N)}_{2,t}}{N!}\delta^N \quad (2)$$

де $\alpha'_{2,t}, \alpha''_{2,t}, \dots, \alpha^{(N)}_{2,t}$ – похідні першого, другого... N -го порядку за часом.

Доцільність використання ряду Тейлора полягає в тому, що перший член ряду (2) визначає відхилення від прогнозу згідно з базовою моделлю в початковий момент часу, другий – швидкість зміни відповідної величини, а третій доданок – швидкість зміни другого параметра (наприклад, прискорення його зміни).

Під час обчислення першої похідної значення функції у сусідніх з розглянутою точках можуть бути отримані за допомогою лінійної інтерполяції, оскільки ця методика дозволяє проведення вимірювань протягом відносно короткого інтервалу часу.

Далі скористаємося поняттям вектора відхилень із [2, 3], елементами якого є значення функції, що описує відхилення стану дорожнього одягу від прогнозу відповідно до базової моделі, і похідних цієї функції в цей момент часу. Тоді поведінка розглянутої системи, тобто вектор відхилень у момент $t + \delta$ (у межах наближення другого порядку), може бути записаний через вектор відхилень у момент t за допомогою таких співвідношень:

$$\begin{aligned} \alpha_{t+\delta} &= \alpha_t + \alpha'_t\delta + \frac{\alpha''_t}{2!}\delta^2; \\ \alpha'_{t+\delta} &= \alpha'_t + \alpha''_t\delta; \\ \alpha''_{t+\delta} &= \alpha''_t. \end{aligned} \quad (3)$$

Тепер розглянемо характеристику процесу, що обумовлена вологістю підстильного ґрунту та зміною деформаційних характеристик шарів дорожнього одягу. Для цього проведемо «розщеплення» відхилення α_t на дві компоненти: у χ_t – «випадкову» (причини якої повною мірою не визначені) та пов'язану з вологістю підстильного ґрунту й зміною деформаційних характеристик матеріалів шарів дорожнього одягу в часі (ξ_t):

$$\alpha_t = \chi_t + \xi_t. \quad (4)$$

Тоді завдання зводиться до розроблення алгоритму, що дозволяє кількісно проаналізувати відхилення від базової моделі, що пов'язано з вологістю підстильного ґрунту.

Модифікація динамічної моделі здійснюється з огляду на тип конструкції.

Оскільки прогностичний аналіз міцності конструкції дорожнього одягу істотно залежить від вихідної міцності конструкції дорожнього одягу, яку можна визначити загальним еквівалентним модулем її пружності, для застосування динамічної моделі розглянемо:

а) конструкцію дорожнього одягу «підсиленої» міцності;

б) конструкцію дорожнього одягу «середньої» міцності;

в) «слабку» конструкція дорожнього одягу.

Вологість підстильного ґрунту найбільше впливає на загальний еквівалентний модуль пружності конструкції дорожнього одягу «слабкого» типу. Тому для конструкцій «підсиленої» і «середньої» міцності може бути застосована динамічна адаптивна модель (2–4) й алгоритм її реалізації, що запропонований у [2, 3].

Для визначення найбільшої чутливості «слабкої» конструкції дорожнього одягу до зміни вологості підстильного ґрунту запропоновано модифікацію алгоритму динамічного моделювання, що допихає корегування за величиною (ξ_t), що враховує вплив вологості підстильного ґрунту в (4).

Таке визначення завдання дозволяє не тільки спростити вихідну модель, але й надає змогу скоротити набір вихідних даних, тобто достатню точність прогностичного аналізу можна отримати не за даними шестирічних спостережень, а за три роки. У математичному формулюванні в компактній матричній формі задача може бути подана так:

$$\alpha_{t+\delta} = \mathbf{A} \times \alpha_t. \quad (5)$$

Базова модель коефіцієнта запасу міцності

Для використання результатів георадарного зондування в процесі прогнозування коефіцієнта запасу міцності за опором зсуву ($K_{\text{миц}}^{\tau}$) розроблено базову модель, що визначає зміну коефіцієнта запасу міцності за опором зсуву в часі.

Розрахунок граничної кількості прикладань розрахункового навантаження здійсню-

ється за умовою забезпечення опору зсуву в підстильних грунтах [4]:

$$\tau_{дон} \geq K_{\tau_міц} \cdot \tau; \quad (6)$$

$$\tau_{дон} = C_{zp} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (7)$$

де τ – активне напруження в ґрунті від дії короточасного навантаження, МПа; $\tau_{дон}$ – граничне напруження зсуву в ґрунті, МПа; C_{zp} – коефіцієнт питомого зчеплення ґрунту, МПа; k_1 – коефіцієнт, який враховує агресивну дію повторних короточасних навантажень, $k_1 = 0,6$ [4]; k_2 – коефіцієнт запасу, який враховує повторну дію навантажень і залежить від інтенсивності руху розрахункових автомобілів [4]:

$$k_2 = 2,45 \cdot N_p^{\frac{1}{6}}, \quad (8)$$

k_3 – коефіцієнт, який враховує умови роботи ґрунту в конструкції.

Визначимо з [4] напруження зсуву в підстильному ґрунті:

$$\tau^{(i)} = \tau_n^{(i)} + \tau_{\theta}^{(i)}, \quad (9)$$

де $\tau_n^{(i)}, \tau_{\theta}^{(i)}$ – напруження зсуву в підстильному ґрунті від зовнішнього навантаження та від ваги шарів дорожнього одягу, що розташовані вище, МПа [2–4]:

$$\tau_{\theta}^{(i)} = 10^{-5} \left(5 - 0,3\varphi_{zp}^{(i)} \right) \sum_{j=0}^l h_j, \quad (10)$$

де $\varphi_{zp}^{(i)}$ – кут внутрішнього тертя ґрунту в i -й період, град.; l – кількість шарів дорожнього одягу над ґрунтом; j – номер шару дорожнього одягу (зверху); h_j – товщина шару, см

$$\tau_n^{(i)} = \frac{Pe^{\frac{-\varphi_{zp}^{(i)}}{3,3}}}{4 + 2,28 \left(\frac{\sum_{j=0}^l h_j}{D} \cdot \left(\frac{E_{cp}}{E_{zp}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^2}, \quad (11)$$

де E_{cp} – зведений модуль пружності шарів дорожнього одягу, МПа:

$$E_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^l E_j h_j}{\sum_{j=1}^l h_j}, \quad (12)$$

де P – тиск колеса на дорожній одяг, МПа; E_{zp} і E_j – модулі пружності ґрунту і j -го шару дорожнього одягу в розрахунковий період, МПа.

Для обчислення максимального активного напруження зсуву в ґрунті на поверхні земляного полотна може бути використана формула [2–4]:

$$\tau_n \approx 0,218 \frac{Q^{0,9} p^{0,1} (1 - \sin \varphi)}{H^{1,8} (E_{cp} / E_{zp})^{0,5} \cos \varphi}, \quad (13)$$

де Q – вертикальне навантаження від колеса на покриття, кН; p – середній тиск на покриття, МПа; E_{zp} – модуль пружності ґрунту земляного полотна, МПа; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Тоді, відповідно до (6–8), запишемо для довільного року експлуатації автомобільної дороги (t):

$$K_{\tau_міц}(t) = 2,45 \cdot \frac{K_1 \cdot K_3}{N_t(t)^{1/6}} \cdot \frac{C_{zp}}{\tau}, \quad (14)$$

де $K_{\tau_міц}(t)$ – коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву в ґрунтах на рік експлуатації t ;

$N_t(t)$ – добова кількість прикладань розрахункового навантаження на рік експлуатації t , од./добу.

Згідно з умовою збільшення кількості прикладань розрахункового навантаження в геометричній прогресії, добова кількість прикладань розрахункового навантаження на довільний рік експлуатації визначається відповідно до [2]:

$$N_t(t) = 0,7 \cdot K_n \cdot \sum N_p \cdot q^{t-1}, \quad (15)$$

де K_n – коефіцієнт, що враховує ймовірність відхилення сумарного руху від середнього, що очікується, згідно з [3]; $\sum N_p$ – зведена розрахункова інтенсивність, од./добу [3]; q – показник зміни інтенсивності руху за роками.

З урахуванням (15) вираз (14) можна записати так:

$$K_{\tau_міц}(t) = 2,45 \cdot \frac{K_1 \cdot K_3}{\left(0,7 \cdot K_n \cdot \sum N_p \cdot q^{t-1} \right)^{1/6}} \cdot \frac{C_{zp}}{\tau}. \quad (16)$$

Модель (16) визначає зміну коефіцієнта запасу міцності в часі залежно від кількості прикладань розрахункового навантаження за добу, міцнісних і деформаційних характеристик підстильного ґрунту. Модель не враховує нелінійність зміни модуля пружності матеріалів шарів конструкції дорожнього одягу в часі. Врахування зміни деформаційних характеристик шарів дорожнього одягу в часі здійснюється за допомогою вимірювань, які визначає поправка (5), як і відхилення реального процесу деградації від базової моделі (16).

Алгоритм прогнозування залишкового ресурсу

Для прогнозування залишкового ресурсу під час георадарного зондування скористаємося алгоритмом визначення міцності дорожнього одягу, результатами роботи якого є коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву в ґрунтах – «визначений коефіцієнт запасу міцності» ($K_{\tau_міц}^{визн}$). Залишковим ресурсом (Δt) є час (кількість років), що залишається до завершення нормативного терміну експлуатації дорожнього одягу ($T_{сл}$) згідно з [2] або до вичерпання конструкцією нормативного [2] коефіцієнта запасу міцності ($K_{\tau_міц}^{норм}$).

Для цього скористуємося рівнянням (16), якщо

$$q^{t-1} = q^{T_{сл}-\Delta t-1} = \frac{q^{T_{сл}-1}}{q^{\Delta t}} \quad (17)$$

Перетворення рівняння (16) співвідносно величини Δt з урахуванням (17) призводить до того, що

$$q^{\Delta t} = \frac{0,7 \cdot K_n \cdot \sum N_p \cdot q^{T_{сл}-1}}{\left(\frac{2,45 \cdot K_1 \cdot K_3}{K_{\tau_міц}^{визн}} \cdot \frac{C_{зр}}{\tau} \right)^6} \quad (18)$$

Логарифмування виразу (18) дозволяє визначити величину залишкового ресурсу (Δt) у вигляді

$$\Delta t = \lg \left[\frac{0,7 \cdot K_n \cdot \sum N_p \cdot q^{T_{сл}-1}}{\left(\frac{2,45 \cdot K_1 \cdot K_3}{K_{\tau_міц}^{визн}} \cdot \frac{C_{зр}}{\tau} \right)^6} \right] / \lg[q] \quad (19)$$

Прогнозування стану дорожнього одягу з урахуванням вологості підстильного ґрунту за динамічною моделлю

Динамічна модель (2) передбачає прогнозування із залученням результатів георадарного зондування за певний період (пропонується три роки). Прогнозний аналіз параметра, що визначає стан конструкції дорожнього одягу ($K_{\tau_міц}$), отримується через побудову динамічної моделі зміни коефіцієнта запасу міцності за опором зсуву в ґрунтах та через розрахування поправки (4), що визначена під час польових обстежень дорожнього одягу та враховує відхилення реального процесу зміни коефіцієнта запасу міцності за опором зсуву в ґрунтах від базової моделі (16). Методика прогнозування реалізується в такий спосіб:

а) за результатами обстежень визначається коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву в ґрунті ($K_{\tau_міц}^{визн}$) за три роки (t_1, t_2, t_3);

б) динамічна модель наведена як ступеневий ряд третього порядку (параболічна функція). Визначаються коефіцієнти базової динамічної моделі:

$$K_{\tau_міц}^{визн}(t) = c_0 + c_1 \times t + c_2 \times t^2, \quad (20)$$

де c_0, c_1, c_2 – коефіцієнти динамічної моделі;

в) розраховується коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву в ґрунті $K_{\tau_міц}^{визн}(t+\delta)$ динамічної моделі для часу $t+\delta$. Крок прогнозу (δ) – один рік;

г) визначається поправка (α_t) до значень базової розрахункової моделі (16) $K_{\tau_міц}(t+\delta)$ як відхилення від динамічної моделі $K_{\tau_міц}^{визн}(t+\delta)$ за три роки (t_1, t_2, t_3);

д) визначаються коефіцієнти функції поправок:

$$\alpha_t = a_0 + a_1 \times t + a_2 \times t^2, \quad (21)$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти функції відхилень;

е) розраховується поправка до базової моделі з метою її корегування до результатів вимірювань:

$$\alpha_{t+\delta} = \sum_{j=0}^N \frac{\alpha_t^{(j)}}{j!} \delta^j; \quad (22)$$

ж) корегується базова модель (16), що дозволяє зробити прогноз на період $t+\delta$:

$$K_{\tau_міц}^{дин}(t+\delta) = K_{\tau_міц}(t) + \sum_{j=0}^2 \frac{\alpha_t^{(j)}}{j!} \delta^j. \quad (23)$$

Динамічна модель враховує не тільки загальні закономірності зміни коефіцієнта запасу міцності в часі, але й швидкість його зміни, що обумовлена нелінійним (частково «випадковим») типом зміни деформаційних характеристик матеріалів шарів конструкції дорожнього одягу в часі, тобто враховує реальний процес на підставі результатів обстежень.

Схему прогнозу за запропонованою моделлю наведено на рис. 1.

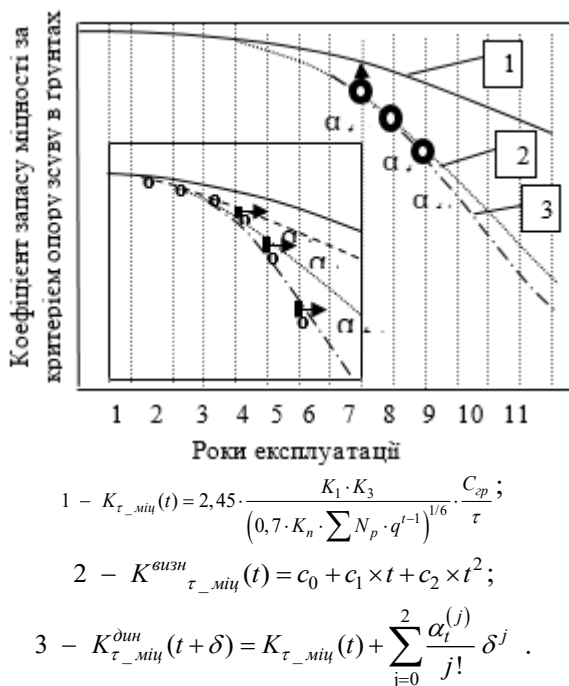


Рис. 1. Схема прогнозування за динамічною моделлю

Фінансування

Роботу проведено за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту «Розроблення комплексу методів і засобів георадарної діагностики для оцінювання надійності об'єктів критичної транспортної інфраструктури».

Висновки

У роботі розроблено динамічну адаптивну модель прогнозування міцності дорожнього одягу, що інтегрує результати георадарного зондування для визначення рівня впливу вологості підстильного ґрунту на процеси деградації дорожньої конструкції.

Література

1. Процюк В. О. Експрес-метод оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.11, 19. Харків, 2019. 234 с.
2. Батракова А. Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11. Харків, 2014. 39 с.
3. Батракова А. Г. Діагностика дорожніх одягів із застосуванням георадарних технологій. Наукові нотатки. Луцьк, 2014. Вип. 46. С. 12–21.
4. Гамеляк І. П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11. Київ, 2005. 438 с.
5. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar / A. Klotzsche et al. A Decade of Progress. Vadose Zone Journal. 2018. Vol. 17/ № 1. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0052>
6. Teshale E. Z., Holzbauer M., Dai S. Using Ground Penetrating Radar to Monitor Seasonal Moisture Fluctuations in Base Layers of Existing Roads. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2022. Vol. 2676/ № 6. <https://doi.org/10.1177/03611981221074360>
7. Rahman M. M., Gassman S. L., Islam K. M. Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. Geosciences. 2023. Vol. 13/ № 4. 103. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
8. Ground-Penetrating Radar Full-Wave Inversion for Soil Moisture Mapping in Trench-Hill Potato Fields for Precise Irrigation / K. Wu et al. Remote Sensing. 2022. Vol. 14. № 23. 6046. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14236046>
9. Atun R., Gürsoy Ö., Koşaroğlu S. Field Scale Soil Moisture Estimation with Ground Penetrating Radar and Sentinel 1 Data. Sustainability. 2024. Vol. 16. № 24. 10995. URL: <https://doi.org/10.3390/su162410995>
10. The influence of wetting and drying paths on the shear strength of a silty clayey compacted soil / M. Matuella et al. E3S Web of Conferences. 2016. Vol. 9. Article 14017. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160914017>
11. Aziz I., Alipour M. Rapid subsurface sensing via Bayesian-optimized FDTD modeling of ground penetrating radar. Journal of Building Engineering. 2025. Article 112243. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112243>

References

1. Protsiuk, V. O. (2019). *Ekspres-metod otsiniuvannia rozrakhunkovykh parametriv truntiv zemlianooho polotna za dopomohoiu pol'ovoho heoradaru* [Express method for evaluating calculated parameters of subgrade soils using a field ground-penetrating radar] (Author's abstract of the candidate's thesis). Kharkiv National

- Automobile and Highway University, Kharkiv [in Ukrainian].
2. Batrakova, A. H. (2014). *Metodolohiia monitorynhu dorozhnikh odiahiv nezhorstkoho typu iz zastosuvanniam heoradiolokatsiinykh tekhnolohii* [Methodology of monitoring flexible-type pavements using ground-penetrating radar technologies] (Doctoral dissertation, specialty 05.22.11). Kharkiv [in Ukrainian].
 3. Batrakova, A. H. (2014). *Diahnostyka dorozhnikh odiahiv iz zastosuvanniam heoradarnykh tekhnolohii* [Diagnostics of road pavements using ground-penetrating radar technologies]. *Naukovi notatky*. (46). 12–21 [in Ukrainian].
 4. Hameliak, I. P. (2005). *Osnovy zabezpechennia nadiinosti konstruksii dorozhnoho odiagu* [Fundamentals of ensuring the reliability of pavement structures] (Doctoral dissertation, specialty 05.22.11). Kyiv [in Ukrainian].
 5. Klotzsche, A., Jonard, F., Looms, M. C., Van der Kruk, J., & Huisman, J. A. (2018). Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress. *Vadose Zone Journal*. 17 (1). <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0052>
 6. Teshale, E. Z., Holzbauer, M., & Dai, S. (2022). Using ground penetrating radar to monitor seasonal moisture fluctuations in base layers of existing roads. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 2676 (6). <https://doi.org/10.1177/03611981221074360>
 7. Rahman, M. M., Gassman, S. L., & Islam, K. M. (2023). Effect of moisture content on subgrade soils resilient modulus for predicting pavement rutting. *Geosciences*. 13(4). 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
 8. Wu, K., Desesquelles, H., Cockenpot, R., Guyard, L., Cuisiniez, V., & Lambot, S. (2022). Ground-penetrating radar full-wave inversion for soil moisture mapping in trench-hill potato fields for precise irrigation. *Remote Sensing*. 14(23). 6046. <https://doi.org/10.3390/rs14236046>
 9. Atun, R., Gürsoy, Ö., & Koşaroğlu, S. (2024). Field scale soil moisture estimation with ground penetrating radar and Sentinel 1 data. *Sustainability*. 16(24). 10995. <https://doi.org/10.3390/su162410995>
 10. Matuella, M., Núñez, W., Gehling, W. Y. Y., Weber, R., Fedrigo, W., Porto, M., & Delongui, L. (2016). The influence of wetting and drying paths on the shear strength of a silty clayey compacted soil. *E3S Web of Conferences*, 9, 14017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160914017>
 11. Aziz, I., & Alipour, M. (2025). Rapid subsurface sensing via Bayesian-optimized FDTD modeling of ground penetrating radar. *Journal of Building Engineering*. 112243. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112243>

Батракова Анжеліка Геннадіївна, д.т.н., проф. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, agbatr@ukr.net, тел. +38 050-323-13-78

Дорошко Євген Вікторович, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, evgeniy.dorozhko@gmail.com, +38 068-069-97-22

Урдзік Сергій Миколайович, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, urdzick@gmail.com, +38 067-593-50-92

Шелкова Ірина Сергіївна, асист. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, irinagunko98@gmail.com, +38 099-481-32-19

Назаренко Ірина Валентинівна, аспірант каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, iryna379nazarenko@gmail.com, +38 066-828-86-39,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Dynamic model for predicting the strength of road surfaces based on georadar data

Abstract. Problem. The current state of Ukrainian automobile roads is characterized by significant wear level of road pavements caused by intensive growth of transport loads, increase in heavy transport proportion and climatic factors influence. Premature destruction leads to significant economic losses, traffic safety deterioration and road capacity reduction. Subgrade soil moisture is a key factor determining road pavement durability. Research proven that on Category III–IV roads with "weak" strength structures, subgrade soil moisture most significantly affects bearing capacity. The greatest contribution to total strength is made by subgrade soil strength (50.2 %) for "weak" structures on light silty clay subgrade. Increasing soil moisture from 0.55 Wm to 0.80 Wm leads to 83.9 % bearing capacity loss. Traditional soil moisture determination methods are labor-intensive, require pavement integrity disruption and lack necessary operational control efficiency. **Goal.** To develop a dynamic model for predicting road pavement strength that uses ground-penetrating radar sounding results to account for subgrade soil moisture influence on road structure degradation processes. **Methodology.** Development of dynamic methods for accounting subgrade soil moisture influence using Taylor series expansion for predicting deviations from baseline models. The methodology involves decomposition of deviation into random component and component related to subgrade soil moisture and deformation characteristics changes over time. For "weak" pavement structures most sensitive to moisture changes, a modified dynamic modeling algorithm is proposed with correction accounting for subgrade soil moisture influence. A baseline model characterizing safety factor coefficient change over time and residual service life prediction algorithm are developed. **Results.** A dynamic adaptive model for predicting road pavement strength has been developed integ-

rating georadar sounding data. The model accounts for correction between model and georadar-determined safety factor coefficient. A baseline model for safety factor coefficient based on shear resistance in subgrade soils and residual service life prediction algorithm were created. Forecasting methodology using dynamic modeling with parabolic interpolation and adaptive correction over three years was implemented. **Originality.** The research combines empirical and mechanical approaches within unified practical model for assessing and predicting road pavement structure strength based on georadar sounding results, developing and improving existing diagnostics and forecasting methods for flexible pavements. **Practical Value.** The approach reduces initial data set and increases forecasting efficiency. Sufficient predictive accuracy is achieved using three years of observations. Ground-penetrating radar enables operational subgrade soil condition assessment and moisture determination based on electrophysical properties, allowing continuous linear monitoring at relatively low costs.

Key words: ground-penetrating radar sounding, dynamic model, strength prediction, road pavement, soil moisture, dielectric permittivity.

Batrakova Angelika, Professor, Doct. of Science, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>, agbatr@ukr.net,

Dorozhko Yevhen, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2894-2131>, evgeniy.dorozhko@gmail.com,

Urdzik Serhii, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>, urdzick@gmail.com

Shelkova Iryna, assistant, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2562-2175>, irinagunko98@gmail.com,

Nazarenko Iryna, PhD student, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8516-1433>, iryna379nazarenko@gmail.com

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
