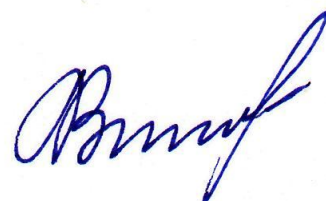


Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ПРОЦЮК ВІТАЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 625.7/.8

ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ
ГРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗА ДОПОМОГОЮ
ПОЛЬОВОГО ГЕОРАДАРУ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

19 – Архітектура та будівництво

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Павлюк Дмитро Олександрович,
Національний транспортний університет,
завідувач кафедри проектування доріг, геодезії та
землеустрою, м. Київ

кандидат технічних наук, доцент
Ільченко Володимир Васильович
Полтавський національний технічний університет,
доцент кафедри Автомобільних доріг, геодезії,
землеустрою та сільських будівель, м. Полтава

Захист відбудеться «21» лютого 2019 р. о 13³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, конференц-зал

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

Автореферат розісланий «18» січня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



Р.В. Смолянук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Збільшення інтенсивності руху, навантажень на вісь автомобіля, кількості багатоосьових транспортних засобів у складі потоку, а також негативний вплив природно-кліматичних факторів призводить до передчасного руйнування конструкцій дорожніх одягів. Щорічно збитки держави від незадовільного транспортно-експлуатаційного стану дорожнього одягу становлять до 4 % від валового внутрішнього продукту через зниження швидкості руху, збільшення збитків від дорожньо-транспортних пригод, зростанням позапланових аварійних ремонтних робіт.

Однією з причин, що сприяє передчасному руйнуванню та зменшенню терміну служби дорожнього одягу є невідповідність конструкції дорожнього одягу реальним умовам експлуатації, що обумовлена неповнотою інформації про зміну розрахункової вологості, міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів робочої зони земляного полотна, а іноді і їх помилковим визначенням ще на стадії передпроектних вишукувань. Відомо, що основним фактором, що впливає на міцність та деформаційну стійкість ґрунту земляного полотна та, відповідно, всієї конструкції дорожнього одягу, є вологість ґрунту робочої зони земляного полотна, яка змінюється у часі під впливом погоднокліматичних факторів, пов'язана зі зміною рівня ґрунтових вод, зміною стану конструкції дорожнього одягу та техногенним впливом. Зазначимо також, що вологість ґрунту земляного полотна може значно змінюватися й в просторі – навіть на невеликій за протяжністю ділянці автомобільної дороги. Нехтування цими фактами призводить до зниження надійності проектних рішень, що проявляються у накопичені пластичних деформацій у ґрунтах земляного полотна через зниження опору ґрунту зсуву, у передчасному втомному руйнуванні монолітних шарів покриття через збільшення напружень розтягу у конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг III-IV категорій.

У нормативних документах з проектування нежорсткого дорожнього одягу значення розрахункових параметрів ґрунтів є усередненими для цілого дорожнього району, у межах якого ділянки автомобільних доріг можуть відрізнятися за кліматичними і гідрогеологічними умовами, типом та гранулометричним складом ґрунту, що призводить до невідповідності нормативних розрахункових параметрів ґрунтів фактичному стану ґрунтів земляного полотна у розрахунковий період і сприяє або передчасному руйнуванню конструкції дорожнього одягу через незабезпечену міцність та надійність, або невиправданому запасу міцності конструкції дорожнього одягу. В кінцевому підсумку, нехтування точністю визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна сприяє нераціональній витраті коштів на будівництво, ремонт та утримання дорожнього одягу.

Ефективним шляхом вирішенням означених проблем є залучення сучасних технічних засобів діагностики та відповідних методик їх практичного застосування, що дозволяють оперативно, без руйнування цілісності конструкції отримувати інформацію про розрахункові параметри ґрунтів земляного полотна. Розвиток георадарних технологій та впровадження результатів георадарного обстеження в практику дорожнього будівництва довели ефективність використання георадарів як інструменту отримання безперервної інформації про стан досліджуємого середовища у реальному масштабі часу. Разом з тим, використання георадарів для оцінювання вологості та

розрахункових параметрів ґрунту стримується відсутністю методик залучення георадарних даних до вирішення означеної задачі. Розроблення таких методик надасть змогу: оцінити вологість ґрунту та пов'язані з нею розрахункові характеристики; оцінити змінювання цих характеристик у часі (річному циклі) та просторі (за довжиною автомобільної дороги); обґрунтувати конструкції дорожнього одягу, що відповідають реальним умовам експлуатації. На даний час створені передумови для вирішення **актуальної та практично значущої задачі** – розроблення експрес-методу оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів із залученням даних георадарного зондування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження виконані згідно з тематикою науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету і Державного агентства автомобільних доріг України, в рамках виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темами: № 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» (державний реєстраційний № 0112U004745), яка передбачала у тому числі розроблення методики М 02071168-725:2013 «Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами під поверхневого зондування»; № 47/37-02-15 «Провести дослідження і розробити методику оцінки збитків від проїзду великовагових транспортних засобів по автомобільних дорогах загального користування» (державний реєстраційний № 0115U001613), яка передбачала у тому числі розроблення методики М 02071168-752:2016 «Методика оцінки збитків від проїзду великовагових транспортних засобів по автомобільних дорогах загального користування».

Мета і завдання дослідження. Розроблення експрес-методу оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна під час георадарної діагностики дорожнього одягу нежорсткого типу. Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено такі основні завдання:

– провести аналіз існуючих методів та засобів визначення вологості та розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна та обґрунтувати найбільш ефективні методи та засоби, що дозволяють отримувати безперервну інформацію про вологість ґрунтів робочої зони земляного полотна у реальному масштабі часу;

– теоретично обґрунтувати модель діелектричних властивостей ґрунту, що встановлює зв'язок між електрофізичними параметрами ґрунту та його вологістю;

– експериментально дослідити закономірності змінення електрофізичних параметрів ґрунту від його вологості, щільності, міцністних та деформаційних параметрів;

– розробити алгоритм та експрес-метод оцінювання вологості ґрунту земляного полотна, міцністних і деформаційних параметрів ґрунту за результатами георадарної діагностики дорожнього одягу;

– провести перевірку адекватності теоретичних моделей та методик георадарних вимірювань за допомогою лабораторних експериментів та польових випробувань на автомобільних дорогах загального користування, виконати аналіз точності та

відтворюваності результатів вимірювань;

– розробити практичну методичку оцінювання вологості ґрунту земляного полотна, міцнісних і деформаційних параметрів ґрунту за результатами георадарної діагностики дорожнього одягу нежорсткого типу.

Об’єкт дослідження – оцінювання розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна неруйнівними методами.

Предмет дослідження – методики оцінювання розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна з урахуванням зв'язку електрофізичних параметрів з вологістю, міцнісними та деформаційними параметрами ґрунту під час георадарної діагностики дорожнього одягу нежорсткого типу.

Методи дослідження дозволяють у повному обсязі вирішити поставлені у роботі завдання. При розробленні моделі діелектричних властивостей ґрунту та алгоритму оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами вимірювань польовим георадаром використано теоретичні положення механіки ґрунтів та фундаментальні положення теорії взаємодії надширокосмугових імпульсних сигналів георадару із конструкцією дорожнього одягу та ґрунтом земляного полотна. Дослідження закономірностей змінення електрофізичних параметрів ґрунту від його фізичних, міцнісних та деформаційних параметрів проводилося з використанням методів планування експерименту, математичного моделювання та математичної статистики. Обробка результатів георадарного зондування здійснювалася з використанням пакетів прикладних програм, що реалізують методи аналізу хвильових полів у плоскошаруватих середовищах, які разом з методиками застосування георадарного устаткування становлять основу експериментальної частини дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів:

– розроблено узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунту, яка поєднує у собі модель Шмугге та модель Бірчака – «рефракційну модель» для багатокомпонентних середовищ, що дозволяє встановити значення діелектричної проникності ґрунту в залежності від його гранулометричного складу, щільності сухого скелету ґрунту та об’ємної вологості;

– встановлено залежності змінення діелектричної проникності ґрунтів від відносної вологості, щільності, міцнісних та деформаційних параметрів для різних типів ґрунтів, що дозволяє оцінити вологість ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» та визначити розрахункові параметри ґрунту за результатами георадарного зондування за наявності апріорної інформації щодо типу ґрунту;

– дістав подальшого розвитку метод оцінювання вологості ґрунту на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за результатами георадарного зондування, що використовує метод пошарового визначення діелектричної проникності матеріалів конструктивних шарів дорожнього одягу, та, на відміну від раніше відомих, спирається на узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунту та експериментально встановлений зв'язок між електрофізичними та фізичними параметрами ґрунтів.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено експрес-метод визначення розрахункових параметрів ґрунту

земляного полотна, який, на відміну від відомих, залучає дані георадарного зондування конструкції дорожнього одягу та ґрунтується на експериментально встановленому зв'язку між діелектричною проникністю, вологістю ґрунту земляного полотна та його міцнісними і деформаційними параметрами. Це дозволяє забезпечити швидкість (у часі) та безперервність (у просторі) визначення розрахункових параметрів ґрунту, враховуючи місцеві умови за зволоженням, завдяки чому підвищується точність діагностики дорожнього одягу та обґрунтованість проектних рішень;

– розроблено та впроваджено у виробничу практику практичну методіку георадарного зондування дорожнього одягу, відповідні алгоритми та методіку обробки і інтерпретації результатів георадарного зондування під час вирішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»;

– розроблено методіку визначення вологості та розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за даними георадарного зондування. Залучення моделей тепло-вологоперенесення до результатів георадарного зондування дозволяє оцінювати розподіл вологості за глибиною та часом у період максимального вологонакопичення.

За результатами дисертаційного дослідження розроблено технологічні документи дорожньої галузі щодо комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування. Здійснено широке впровадження розроблених методик дорожніми організаціями, що належать до сфери управління Державного агентства автомобільних доріг України, Службою автомобільних доріг України у Волинській області, у навчальному процесі під час викладання дисципліни «Проектування міських вулиць та доріг спеціального призначення» в Луцькому НТУ.

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні теоретичних (постановка задач та розроблення теоретичних моделей) і експериментальних досліджень, узагальненні отриманих результатів та встановленні основоположних закономірностей та кореляційних залежностей; розробленні й впровадженні практичних методик і рекомендацій. Всі результати, що наведені в дисертації, одержані здобувачем особисто або за його безпосередньою участю. У роботах, що опубліковано у співавторстві, авторові належать: аналіз існуючих методів та засобів визначення вологості ґрунтів земляного полотна та шарів дорожнього одягу [3, 7]; розроблення узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту та алгоритму оцінювання та прогнозування вологості та пов'язаних з нею розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна [7]; постановка задачі оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару [2, 11, 15]; проведення лабораторних досліджень з встановлення закономірностей змінення електрофізичних параметрів ґрунту від його вологості, щільності, міцнісних та деформаційних параметрів для ґрунтів різних типів [1, 2]; проведення польових досліджень дорожніх одягів з використанням георадарного обладнання [12]; розроблення методик щодо практичного використання результатів дослідження [7].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались: на міжнародній науково-практичній конференції студентів та молодих вчених «Інтеграційні процеси та інноваційні технології. Досягнення та перспективи технічних наук» (Харків, 27 травня 2011 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 конференції «Science – Future of Lithuania. Transport engineering and management: 15th Conference for Lithuania Junior Researches» (Вільнюс, 4 травня 2014 р.), на міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг» (Харків, 14-15 листопада 2013 р.); на міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений» (Белгород, 8-10 жовтня 2013 р.); на III міжнародній науково-технічній конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (Луцьк-Світязь, 29 травня - 01 липня 2014 р.); Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференції молодих учених та студентів «Сучасні проблеми містобудування. Перспективи та пріоритети розвитку» (Луцьк, 17 листопада 2017р.); на щорічних науково-методичних конференціях викладачів і наукових співробітників ХНАДУ (2011-2013р.); на щорічних науково-методичних конференціях викладачів і студентів Луцького НТУ (2014-2018 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 9 статей у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (серед яких 5 одноосібних, 1 стаття у фаховому виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus), 2 статті у зарубіжних періодичних наукових виданнях, 4 статті у збірниках праць за матеріалами науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 275 найменувань та шести додатків. Загальний обсяг дисертації становить 234 сторінки, у тому числі: 165 сторінок основного тексту, 54 рисунки, 22 таблиці, список використаних джерел на 27 сторінках, додатки на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету, завдання і методи дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію роботи, повноту публікації основних результатів та їх впровадження.

У першому розділі подано огляд основних напрямів досліджень з визначення вологості ґрунтів земляного полотна та її зв'язку з міцністними та деформаційними параметрами, проаналізовано стан та тенденції розвитку методів і технічних засобів визначення розрахункових параметрів ґрунту, узагальнено світовий досвід використання георадарів для вирішення завдань оцінювання вологості ґрунтів, проаналізовано моделі діелектричних властивостей ґрунтів як основу інтерпретації георадарних даних, обґрунтовано напрямки досліджень з розроблення методу оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадара при діагностиці дорожнього одягу нежорсткого типу.

Запорукою забезпечення нормативного транспортно-експлуатаційного стану дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування є наявність повної та достовірної інформації про розрахункові параметри ґрунтів земляного полотна протягом терміну служби автомобільної дороги, від обґрунтованості яких залежить транспортно-експлуатаційний стан покриття та термін служби дорожнього одягу. Розрахункові параметри ґрунтів, у свою чергу, суттєво залежать від гранулометричного складу ґрунту, його розрахункової вологості, щільності, а також від температури, порового тиску та зміни цих фізико-механічних характеристик у часі. Небезпечний вплив надмірної вологості ґрунтів земляного полотна проявляється у зниженні щільності та міцності ґрунту активної зони земляного полотна, що призводить до деформацій та руйнувань дорожнього одягу внаслідок пластичних деформацій перезволоженого ґрунту земляного полотна.

Принципи нормування розрахункової вологості та пов'язаних з нею розрахункових параметрів ґрунтів робочого шару земляного полотна при вирішенні завдань дорожнього будівництва закладено у роботах М.М. Іванова, О.К. Біруля, М.І. Волкова, М.І. Карлінського, В.С. Мезенцева, Н.А. Пузакова, В.М. Сіденко та інших вчених. Ними створено основи сучасних уявлень про дорожню класифікацію ґрунтів, їх фізико-механічні властивості та порядок нормування розрахункових параметрів ґрунтів. Аналіз досліджень у сфері нормування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна доводить, що розрахункові параметри ґрунтів земляного полотна, що містяться у сучасних нормативних документах, отримано за результатами узагальнення значного обсягу вимірювань на обмеженій території, усереднено по дорожньо-кліматичних районах для інших територій без детального врахування місцевих умов. Це стимулювало розвиток досліджень зі встановлення зв'язку між вологістю ґрунту земляного полотна та його міцністними і деформаційними параметрами з урахуванням місцевих умов. Вагомий внесок у цей напрямок зроблений В.Ф. Бабковим, А.О. Белятинським, В.К. Вирожемським, І.П. Гамеляком, В.К. Жданюком, Ю.О. Кірічком, В.П. Носовим, Н.В. Орнатським, Д.О. Павлюком, В.В. Петровичем, М.А. Пузаковим, В.І. Рувінським, В.Я. Савенко, О.С. Славінською, О.Я. Тулаєвим, М.О. Цитовичем, І.І. Черкасовим.

Проведений аналіз доводить, що дослідження зв'язку між вологістю ґрунтів та їх міцністними та деформаційними параметрами розвиваються за двома основними напрямками. Перший напрям ґрунтується на систематизації, узагальненні отриманих раніше експериментальних даних. Другий напрям досліджень пов'язаний з деталізацією дорожньо-кліматичного районування територій шляхом більш точного врахування місцевих умов та уточнення залежностей між вологістю, щільністю ґрунтів та їх міцністними та деформаційними параметрами. Зазначимо, що через різноманіття ґрунтових, геологічних, гідрологічних, природно-кліматичних умов районів дослідження, моделі позбавлені такої властивості, як універсальність. Методи потребують великої кількості статистичних даних, обмежуються певними ґрунтово-геологічними та гідрологічними умовами, потребують значного обсягу апріорної інформації, що ускладнює їх практичне використання. Істотним недоліком багатьох експериментальних методів з визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна є залежність результатів експериментальних досліджень від методів і способів

обробки отриманої інформації про характеристики ґрунтів, а при застосуванні теоретичних методів – потреба у апіорній інформації про вологість ґрунту земляного полотна, що призводить до необхідності залучення руйнівних інструментальних методів з визначення початкової вологості ґрунту під конструкцією дорожнього одягу.

Аналіз та узагальнення тенденцій розвитку інструментальних методів вимірювання вологості ґрунтів дозволив визначити, що найбільший потенціал мають неруйнівні хвильові методи, які спираються на випромінювання та реєстрацію електромагнітних хвиль, серед яких незаперечні переваги має метод георадарного зондування. Він дозволяє отримувати інформацію про електрофізичні параметри ґрунтів у безперервному (у часі та просторі) режимі, не порушуючи цілісності дорожнього одягу. Значний внесок з впровадження георадарних технологій у практику дорожнього будівництва зроблений А.Г. Батраковою, А.А. Білозеровим, О.М. Куліжниковим, М.О. Лушніковим, І.В. Макєсчевою, А.Р. Annan, J.L. Davis, G.C. Torp, T. Saarenketo, T. Scullion та іншими вітчизняними та закордонними вченими. Незважаючи велику кількість досліджень та значні досягнення у сфері георадарної діагностики автомобільних доріг, застосування георадарів під час вирішення задач обґрунтування розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна стримується недосконалістю математичних моделей, що пов'язують фізичні й електрофізичні параметри ґрунтів. Тому подальші дослідження повинні бути спрямовані на встановлення зв'язку між електрофізичними параметрами та вологістю ґрунтів земляного полотна. Потребують розроблення алгоритми визначення вологості ґрунтів земляного полотна та обґрунтування міцнісних і деформаційних параметрів ґрунтів, що використовують дані георадарного зондування. Основу цих алгоритмів повинні скласти моделі діелектричних властивостей ґрунту, які встановлюють зв'язок між діелектричною проникністю ґрунту, його вологістю, міцнісними та деформаційними параметрами. Аналіз та узагальнення моделей діелектричних властивостей ґрунту дозволив обґрунтувати доцільність застосування моделі Бірчака і моделі Шмугге, які можуть скласти основу узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунтів, що визначатиме зв'язок між діелектричною проникністю ґрунту та його вологістю.

На підставі проведеного аналізу та сформульованих висновків визначено мету та основні завдання дисертаційного дослідження, окреслено основне коло питань, які потребують вирішення при розробленні експрес-методу оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару.

У другому розділі дисертації наведено рішення задачі оцінювання розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування, що спирається на метод пошарового визначення ефективної діелектричної проникності конструктивних шарів дорожнього одягу, узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунтів, зв'язок діелектричної проникності ґрунтів з їх вологістю, міцнісними та деформаційними параметрами.

Обґрунтовано фізичну модель ґрунту для електрофізичних вимірювань, яка являє собою трифазну систему, що складається з мінеральної фази сухого ґрунту, повітря і вільної води. Для оцінювання вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням моностатичної антенної системи пропонується:

- а) використовувати рішення задач товщинометрії конструктивних шарів

дорожнього одягу, засноване на розрахунку коефіцієнтів відбиття і коефіцієнтів проходження електромагнітних хвиль через конструкцію дорожнього одягу для визначення діелектричної проникності (ε) на межі «конструкція дорожнього одягу – грунт земляного полотна»;

б) оцінити вологість ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – грунт земляного полотна» шляхом застосування моделей, що зв'язують об'ємні частки води (вологість - W) та повітря (пористість - ρ), гранулометричний склад (Γ) та тип ґрунту (B) з вимірним значенням діелектричної проникності:

$$\varepsilon = f(W, \rho, \Gamma, B). \quad (1)$$

Під час оцінювання вологості ґрунту земляного полотна необхідно вирішити зворотну задачу – за відомою функцією відгуку матеріалу, в нашому випадку – діелектрична проникність (ε), відновити значення вологості (W) за апріорно відомими параметрами ґрунту, що не змінюються в процесі експлуатації, а саме, гранулометричний склад ґрунту (Γ) і вид ґрунту (B):

$$W = f(\varepsilon); \quad (2)$$

в) оцінити розподіл вологості ґрунту земляного полотна за глибиною (z) в залежності від типу місцевості за характером зволоження і водно-теплогового режиму роботи земляного полотна під час обстеження.

Для вирішення задачі оцінювання вологості ґрунту запропоновано узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунту, яка поєднує у собі модель Шмугге та модель Бірчака – «рефракційну модель» для багатоконпонентних середовищ. Перевагою запропонованої моделі є можливість врахування вільної та зв'язаної води, щільності і гранулометричного складу ґрунтів під час оцінювання діелектричної проникності ґрунту:

а) без урахування зв'язаної води:

$$\sqrt{\varepsilon_{zp}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_e} - 1) + \frac{P_{cz}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (3)$$

б) з урахуванням зв'язаної води:

– для $W \leq W_t$ – вільна вода відсутня:

$$\sqrt{\varepsilon_{zp}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_{ze}} - 1) + \frac{P_{cz}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (4)$$

– для $W > W_t$ – за наявності вільної води:

$$\sqrt{\varepsilon_{zp}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_e} - 1) - W_t \times (\sqrt{\varepsilon_e} - \sqrt{\varepsilon_{ze}}) + \frac{P_{cz}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (5)$$

Слід зазначити, що моделі (3) і (4) тотожні для $W \leq W_t$, оскільки за відсутності вільної води в ґрунтах вологість ґрунту W визначається зв'язаною водою. Тоді ε_e в (3)

відповідає ε_{36} в (4). Аналіз моделі доводить, що вміст глинистої фракції істотно впливає на діелектричну проникність ґрунту: і збільшенням вмісту глинистої фракції за однакової вологості діелектрична проникність ґрунту збільшується; темп зростання діелектричної проникності, що залежить від об'ємної вологості ґрунту, зі збільшенням вмісту глинистої фракції збільшується; зменшення щільності ґрунту призводить до зменшення його діелектричної проникності. При цьому вклад щільності ґрунту (у реальному діапазоні значень щільності ґрунту у земляному полотні) у діелектричну проникність становить від 3 % до 10 % та досягає мінімальних значень по мірі зменшення об'ємної вологості ґрунту, тоді як збільшення вологості призводить до зростання діелектричної проникності понад 200 %. Мінеральний склад ґрунту незначно впливає на величину діелектричної проникності. За повної заміни мінерального складу ґрунту діелектрична проникність змінюється на 10 %, тоді як збільшення вологості ґрунту лише на 1,2 % (від 0,68 Вт до 0,73 Вт) збільшує діелектричну проникність майже вдвічі.

Діелектрична проникність ґрунту є функцією відгуку на зміну його фізичних і структурних параметрів: вологості, щільності, гранулометричного складу ґрунту. З іншого боку, результатом георадарного зондування ґрунтів є: форма і амплітуда імпульсу, який прийшов в приймальну антену, час проходження сигналу через досліджувану структуру. Обробка результатів георадарного зондування дозволяє оцінити діелектричну проникність досліджуваного ґрунту, що, в свою чергу, дозволяє оцінити його вологість. Для визначення вологості ґрунту за відомою діелектричною проникністю ґрунту, скористуємося моделями (3-5), виразивши об'ємну вологість:

а) для $W \leq W_t$ – вільна вода відсутня:

$$W = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - \sqrt{\varepsilon_m})}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} + P \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} - \frac{P_{c2}}{P_m} \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)}; \quad (6)$$

б) для $W > W_t$ – за наявності вільної води:

$$\begin{aligned} W &= \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - \sqrt{\varepsilon_m})}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} + W_t \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - \sqrt{\varepsilon_{36}})}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} + P \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} = \\ &= \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} + W_t \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - \sqrt{\varepsilon_{36}})}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)} - \frac{P_{c2}}{P_m} \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\rho} - 1)}. \end{aligned} \quad (7)$$

За результатами проведених теоретичних досліджень запропоновано рішення задачі оцінювання фактичної вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування та розроблено алгоритм (рис. 1), що спирається на метод пошарового перерахування тимчасових затримок і амплітуд сигналів, відбитих від границь шарів конструкції, у значення товщини конструктивних шарів і їх діелектричну проникність, узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунтів (6-7) та зв'язок діелектричної проникності ґрунтів з їх вологістю.

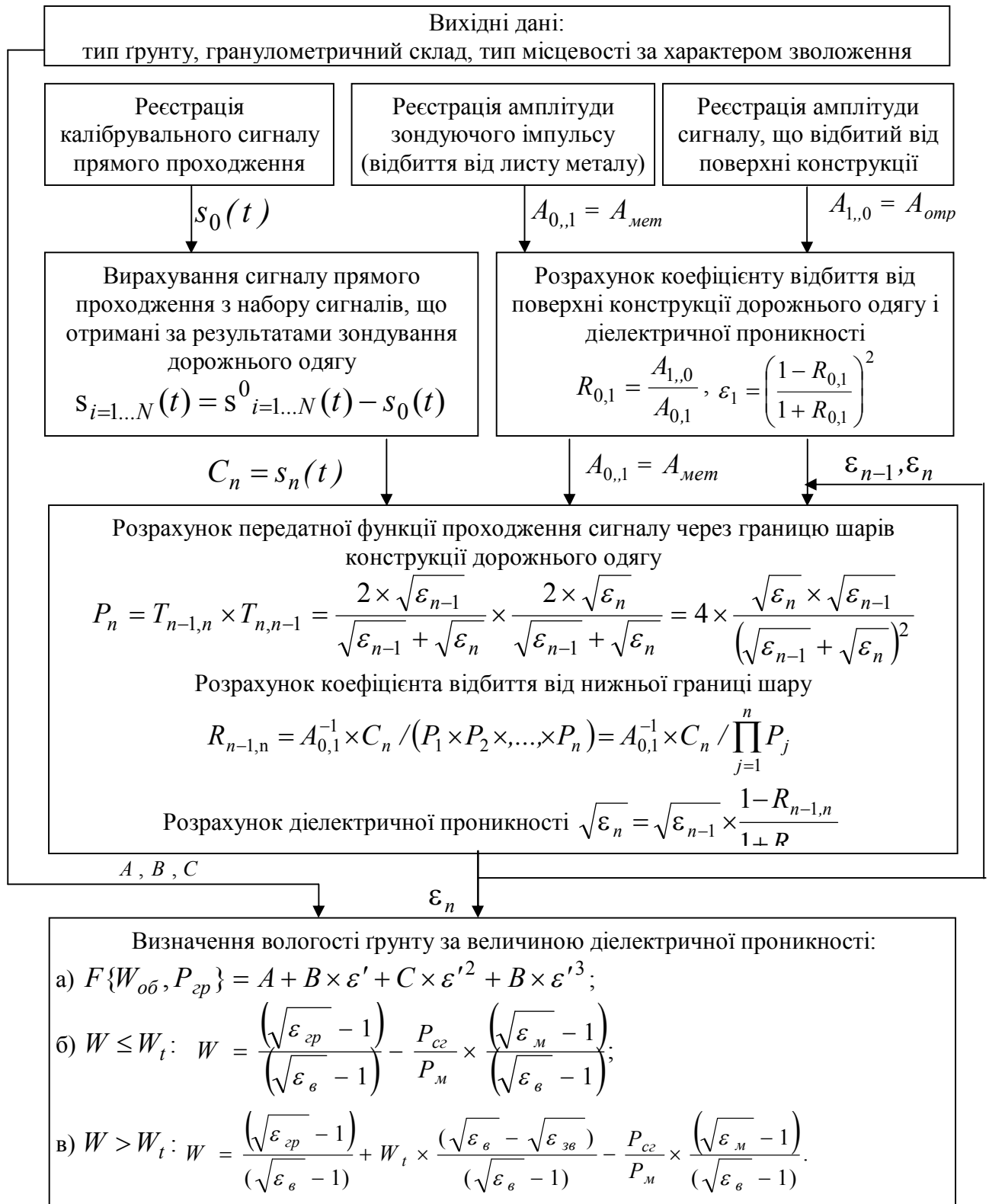


Рис. 1. Схема алгоритму оцінювання вологості ґрунту на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»

Розподіл вологості за глибиною пропонується визначати за рішеннями проф. В.М. Сіденка для другого та третього типу місцевості за характером зволоження, де початковій вологості відповідає вологість на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна».

Розглядатиме міцнісні та деформаційні параметри ґрунту як функцію від діелектричної проникності:

$$\{E, \varphi, c\} = F\{P_{zp} = f(\varepsilon); W_p = f(\varepsilon)\}, \quad (8)$$

де E, φ, c – відповідно модуль пружності ґрунту, МПа; кут внутрішнього тертя, град; питоме зчеплення, МПа.

Результати (8) є основою оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів за результатами оцінки їх вологості. алгоритми оцінювання розрахункових параметрів ґрунту за результатами георадарного зондування, який ґрунтується на:

- а) алгоритмі визначення розрахункової вологості ґрунту;
- б) експериментально встановленому зв'язку між діелектричною проникністю, вологістю ґрунту земляного полотна та його міцнісними (φ, C) та деформаційними ($E_{гр.}$) параметрами (рис. 2).

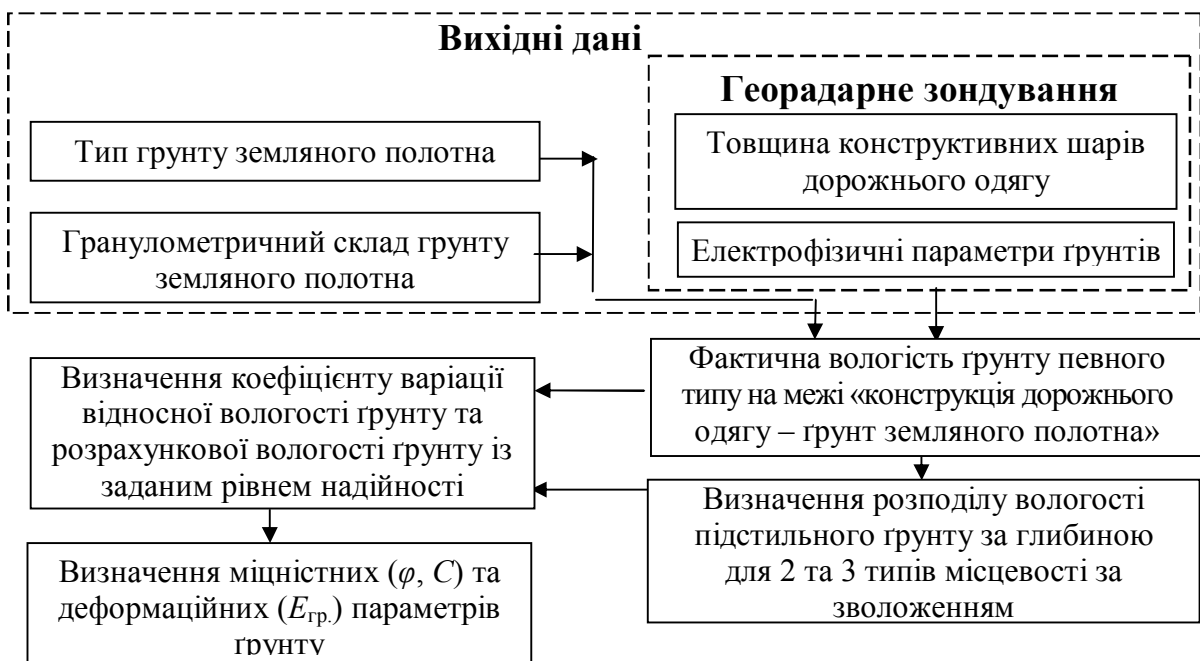


Рис. 2. Схема алгоритму оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів

У третьому розділі експериментально досліджено закономірності зміни електрофізичних параметрів ґрунту від його вологості, міцнісних та деформаційних параметрів; виконано аналіз точності вимірювань та відтворюваності результатів вимірювань; проведено перевірку адекватності теоретичних моделей та методик георадарних вимірювань за допомогою лабораторних експериментів та польових випробувань на автомобільних дорогах загального користування.

Експериментальні дослідження виконувалися у лабораторних та у польових умовах. Лабораторні дослідження проводилися з метою: обґрунтування параметрів теоретичних моделей з оцінювання розрахункових параметрів ґрунту за допомогою георадару; перевірки адекватності теоретичних моделей, алгоритмів і практичних методик застосування георадару для оцінювання електрофізичних та фізичних параметрів ґрунту. Для виконання програми експериментальних досліджень використаний ґрунт із земляного полотна автомобільної дороги: сугісок піщанистий

дрібний; суглинок важкий пілуватий; глина легка пілувата. Для проб ґрунту стандартними методами визначалися: гранулометричний склад, число пластичності, вологість на межі пластичності та текучості. Визначення діелектричної проникності ґрунту проводили георадарним комплексом «ОДЯГ-1» із центральною частотою антени 1,2 Гц у повітрі. Візуалізація здійснювалася за допомогою програмного комплексу «GPR Proview». Інтерпретація результатів зондування виконувалася за допомогою програми «Geovisuy», яка реалізує в тому числі й алгоритми обробки, що розроблені безпосередньо автором дисертації. Мінімальну кількість випробувань встановлено за результатами статистичної обробки експериментальних даних. За результатами теоретичних досліджень щодо узгодження геометричних розмірів експериментальних зразків із просторово-часовими характеристиками зондувальних сигналів обґрунтовано параметри лабораторних моделей для проведення георадарних вимірювань. Встановлено, що за умови поперечного розміру моделі 1,18 м інтерференція сигналів, відбитих від верхньої площини й від бічних граней експериментальної моделі не буде виявляти значного впливу на роботу алгоритму розподілу сигналів. Доведено відтворюваність вимірювань діелектричної проникності ґрунтових моделей за критерієм Кохрена для рівня значущості 0,95.

Експериментально досліджено та встановлено залежності, що відображують вплив вологості (W), гранулометричного складу ґрунту на його міцнісні (φ, C) та деформаційні параметри (E_{sp}):

– для супіску:

$$E_{sp} = 404W^2 - 745W + 383; \quad (9)$$

$$\varphi = 25,05W^{-0,422}; \quad (10)$$

$$C = 0,0112W^{-0,9711}; \quad (11)$$

– для суглинку:

$$E_{sp} = 392W^2 - 760W + 374; \quad (12)$$

$$\varphi = 13,111W^{-1,0795}; \quad (13)$$

$$C = 0,0026W^{-3,9797}; \quad (14)$$

– для глини:

$$E_{sp} = 394W^2 - 701W + 316; \quad (15)$$

$$\varphi = 4,687W^{-2,5336}; \quad (16)$$

$$C = 0,0059W^{-3,3991}. \quad (17)$$

Для дослідження параметрів моделі оцінювання вологості ґрунтів за величиною діелектричної проникності та перевірки адекватності запропонованої узагальненої моделі електрофізичних параметрів ґрунтів проведено серії експериментів, що ґрунтувалися на загально прийнятих уявленнях: електрофізичні параметри матеріалу значною мірою залежать від їх вологості; ґрунт є складною дисперсною системою, тому діелектрична проникність (ϵ) залежить від співвідношення фаз у ґрунті. За результатами лабораторних вимірювань встановлено залежності, що відображають зв'язок відносної вологості (W) з діелектричною проникністю:

– для супіску:

$$W = -0,0014\varepsilon^2 + 0,06\varepsilon + 0,29; \quad (18)$$

– для суглинку:

$$W = 0,0003\varepsilon^2 + 0,0133\varepsilon + 0,34; \quad (19)$$

– для глини:

$$W = 0,00004\varepsilon^2 + 0,0127\varepsilon + 0,32; \quad (20)$$

де W – відносна вологість ґрунту, частки од. від W_T ;

ε – діелектрична проникність ґрунту, од.

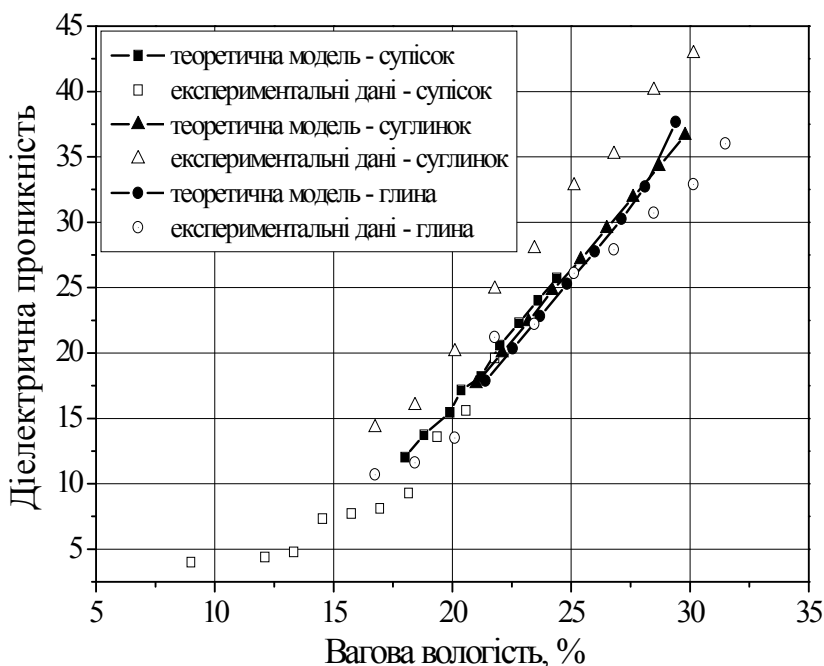
Коефіцієнт кореляції становить від 0,9661 до 0,9981, що свідчить про високу точність апроксимуючих моделей. Залежності (18-20) дозволяють визначити параметри моделі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за результатами георадарного зондування.

За результатами експериментальних досліджень визначено параметри моделі, що встановлює зв'язок між діелектричною проникністю та міцністними (питоме зчеплення - C , кут внутрішнього тертя - φ) і деформаційними (модуль пружності - E) параметрами ґрунту (табл. 1).

Таблиця 1 – Коефіцієнти зв'язку між діелектричною проникністю та міцністними і деформаційними параметрами ґрунту

Тип ґрунту	Коефіцієнти рівняння						Коефіцієнт кореляції (R^2) для:		
	$E=A \cdot \varepsilon^B$		$C=A \cdot \varepsilon^B$		$\varphi=A \cdot \varepsilon^B$		$E=f(\varepsilon)$	$C=f(\varepsilon)$	$\varphi=f(\varepsilon)$
	A	B	A	B	A	B			
Супісок	290,52	-0,7344	0,0331	-0,3242	39,842	-0,1477	0,9334	0,9596	0,9596
Суглинок	49872	-2,3463	9,6327	-2,12	119,92	-0,5703	0,926	0,9373	0,9584
Глина	31615	-2,2877	9,7135	1,8818	43,71	0,3723	0,964	0,9921	0,9723

Перевірка адекватності теоретичної моделі діелектричних властивостей ґрунту проводилася шляхом зіставлення результатів лабораторних вимірювань



діелектричної проникності ґрунтів з різною вологістю за допомогою георадару з розрахунковими значеннями діелектричної проникності, що визначена за узагальненою моделлю діелектричних властивостей ґрунту (рис. 3). Коефіцієнт кореляції між теоретичною залежністю та експериментальними даними становить: для супіскоку $R=0,976$; для суглинку $R=0,91$; для глини $R=0,97$. Даний зв'язок характеризується як тісний та свідчить про

Рис. 3. Перевірка адекватності теоретичної моделі

адекватність моделі.

Перевірка адекватності алгоритму визначення вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування проводилася на одношарових та багатошарових ґрунтових моделях з різною вологістю ґрунту. У процесі експериментальних досліджень георадар рухався від секції моделі з більшою вологістю до секції з меншою вологістю ґрунту. Під час руху георадару фіксувалися ділянки переходу між секціями з різною вологістю ґрунту. Результати інтерпретації сигналів наведено у таблиці 2. Відносна похибка вимірювань не перевищує 5 %, що доводить високу точність запропонованих моделей та алгоритмів щодо визначення вологості ґрунту за результатами георадарного зондування.

Таблиця 2 – Визначення вологості ґрунтів на лабораторних моделях

Номер відліку сигналу	Вологість ґрунту, %		Відносна похибка вимірювань, %
	фактична	розрахункова	
30	22	21,66	1,54
40	22	21,91	0,44
60	18	17,88	0,67
70	18	18,02	0,11
115	15	15,00	0
140	15	15,05	0,33

Експериментальні дослідження з визначення вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за допомогою польового георадару проводилися на автомобільних дорогах загального користування Харківській області у різні періоди року. Зондування дорожнього одягу виконувалося георадаром «ОДЯГ-1» у безперервному режимі руху георадару. Відбір проб ґрунту проводилися на неукріпленій частині узбіччя; на укосі насипу. Відносне відхилення вагової вологості, що визначена за допомогою георадару не перевищує 5 %, що свідчить про високу порівнянність результатів (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати вимірювань вологості на неукріпленій частині узбіччя

Місцеположення	Вагова вологість, %		Відносна похибка, %	
	за термоваговим методом на глибині			за георадарними даними
	6 см.	40 см – 50 см		
Початок ділянки	20	23	23,4	1,7
Середина ділянки /просадка	20	23	23,5	2,2
Кінець ділянки	22	22	22,1	0,5

Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили підтвердити теоретичні положення другого розділу дисертації: довести адекватність розроблених моделей оцінювання вологості та пов'язаного з ними методу оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна.

У четвертому розділі за результатами узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень розроблено практичні методики з оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунтів за допомогою польового георадару при діагностиці дорожніх одягів нежорсткого типу, наведено оцінку економічної ефективності та напрямки подальшого впровадження результатів дослідження.

За результатами узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень, що проведені в лабораторних та польових умовах на автомобільних дорогах загального користування, розроблено практичну методику георадарного зондування конструкції дорожнього одягу під час вирішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт». Методика складається з: етапу збору вихідних даних, до яких віднесено: інформацію про тип ґрунту; калібрувальні сигнали георадару, що використовуються для подальшої обробки радарограм; етапу зондування конструкції дорожнього одягу з метою реєстрації амплітуди сигналів, що надійшли до приймача, та формування часового розподілу сигналів за глибиною; етапу оброблення отриманих даних в програмі Geovizu з метою відновлення діелектричної проникності (ϵ) ґрунту земляного полотна; етапу оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт» за величиною діелектричної проникності.

Залучення моделей тепло-вологоперенесення до результатів георадарного зондування дозволяє оцінювати розподіл вологості за глибиною та часом у період максимального вологонакопичення. Для практичного застосування методики розроблено порядок отримання та запису калібрувальних сигналів георадару, визначено параметри та порядок проведення георадарного зондування, запропоновано послідовність реалізації алгоритму інтерпретації результатів зондування. Розроблено методику оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів (кут внутрішнього тертя, коефіцієнт зчеплення, модуль пружності) за допомогою польового георадару та наведено приклади практичного застосування методики з оцінювання розрахункових параметрів ґрунту за результатами георадарного зондування. Методика передбачає: розрахунок коефіцієнту варіації відносної вологості або коефіцієнту варіації діелектричної проникності ґрунту; визначення розрахункової вологості ґрунту у межах довірчого інтервалу, що відповідає заданому рівню надійності або розрахункового значення відносної діелектричної проникності; оцінювання розрахункових параметрів ґрунту залежно від розрахункової вологості або від розрахункової діелектричної проникності. Запропоновано напрямки практичного застосування результатів георадарного зондування, розроблених методик та алгоритмів під час: оцінювання міцності конструкції дорожнього одягу із залученням даних георадарного зондування у розрахунковий період; визначення допустимої (за критерієм опору зсуву в ґрунтах земляного полотна) кількості прикладань розрахункового навантаження з урахуванням фактичної вологості ґрунту земляного полотна; визначення допустимого навантаження на вісь у період максимального вологонакопичення та зниження міцності дорожнього одягу.

Визначено економічну ефективність від впровадження результатів дисертаційного дослідження, що досягається через зменшення собівартості діагностики, повноту та безперервність у просторі інформації про вологість та розрахункові параметри ґрунтів земляного полотна автомобільної дороги. Очікуваний

річний економічний ефект через зниження собівартості неруйнівної діагностики за умови обстеження 2000 км/рік становить 1697,86 тис.грн./рік. Очікуваний економічний ефект від реалізації стратегії збереження дорожнього одягу у період зниження несучої здатності дорожнього одягу досягається через зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів та зменшення збитків від перебування вантажів та пасажирів у шляху. Практичні методики, які були розроблені у дисертаційному дослідженні, впроваджено у проектній організації Волинської області, технологічні документи Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор». Результати досліджень широко застосовуються у навчальному процесі Луцького національного технічного університету.

ВИСНОВКИ

Основний науковий результат дисертаційного дослідження полягає у розвитку теоретичних та практичних положень щодо оцінювання вологості ґрунту земляного полотна та розрахункових параметрів ґрунту за даними георадарного зондування, які реалізовано в експрес-методі оцінювання розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна за допомогою польового георадару. Це надає змогу отримувати інформацію про стан ґрунту земляного полотна у безперервному режимі та є основою практичних методик із застосування георадарних даних під час діагностики дорожніх одягів.

1. Аналіз методів оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна дозволив встановити, що серед методів неруйнівної діагностики найбільший потенціал мають хвильові методи, до яких відноситься метод георадарного зондування. Вони дозволяють отримувати інформацію про фізичні властивості ґрунтів у безперервному режимі у реальному масштабі часу, без порушення цілісності конструкції дорожнього одягу.

2. Розроблено узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунту, яка поєднує у собі модель Шмугге та модель Бірчака – «рефракційну модель» для багатокомпонентних середовищ та дозволяє встановити значення діелектричної проникності ґрунту в залежності від його гранулометричного складу, щільності та об'ємної вологості. За результатами теоретичного аналізу параметрів моделі встановлено:

а) зі збільшенням вмісту глинистої фракції за однакової об'ємної вологості діелектрична проникність ґрунту збільшується;

б) темп зростання діелектричної проникності, що залежить від об'ємної вологості ґрунту, зі збільшенням вмісту глинистої фракції збільшується;

в) поле діелектричної проникності за запропонованою моделлю свідчить, що зменшення щільності ґрунту призводить до зменшення його діелектричної проникності. Вклад щільності ґрунту (у реальному діапазоні значень щільності ґрунту у земляному полотні) у діелектричну проникність становить від 3 % до 10 % та досягає мінімальних значень по мірі зменшення об'ємної вологості ґрунту, тоді як збільшення вологості призводить до зростання діелектричної проникності понад 200 %;

г) мінеральний склад ґрунту незначно впливає на величину діелектричної проникності. За повної заміни мінерального складу ґрунту діелектрична проникність

змінюється на 10 %, тоді як збільшення вологості ґрунту лише на 1,2 % (від 0,68 Вт до 0,73 Вт) збільшує діелектричну проникність майже вдвічі.

За результатами експериментальних досліджень та чисельного моделювання підтверджено адекватність узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту (коефіцієнт кореляції між теоретичною залежністю та експериментальними даними становить: для супіску $R=0,976$; для суглинку $R=0,91$; для глини $R=0,97$), що дозволяє використовувати запропоновану модель під час оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунтів за результатами георадарного зондування.

3. Експериментальні дослідження фізичних, міцнісних, деформаційних та електрофізичних параметрів ґрунтів дозволили:

а) встановити зв'язок вологості, щільності, гранулометричного складу та діелектричної проникності типових ґрунтів з їх міцнісними (питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя) та деформаційними (модуль пружності) параметрами (коефіцієнт кореляції – від 0,9260 до 0,9921);

б) підтвердити основні теоретичні положення моделі обґрунтування розрахункових параметрів ґрунту із залученням даних георадарного зондування;

в) розробити алгоритм оцінювання розрахункових параметрів ґрунту із залученням даних георадарного зондування, що ґрунтується на рішенні задачі оцінювання вологості ґрунту на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» та спирається на експериментально встановлений зв'язок діелектричної проникності з міцнісними та деформаційними параметрами ґрунту.

4. Отримано рішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування георадаром з центральною частотою 1,2 ГГц. Рішення спирається як на відомий метод пошарового перерахування тимчасових затримок і амплітуд сигналів, відбитих від границь шарів конструкції, у значення їх ефективної діелектричної проникності, так і на вперше запропоновану узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунтів та експериментально встановлений зв'язок діелектричної проникності ґрунтів з їх вологістю і щільністю (коефіцієнт кореляції – від 0,9661 до 0,9981).

5. За результатами експериментальних досліджень у лабораторних та польових умовах підтверджено адекватність теоретичних моделей та практичних методик за рівня довірчої вірогідності 95 %:

а) розбіжність результатів оцінювання вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням георадарних даних не перевищує 5 %;

б) дисперсія відтворюваності результатів вимірювань діелектричної проникності: для супіску - 0,128; для суглинку - 0,167; для глини - 0,131.

6. Сукупність отриманих теоретичних та експериментальних результатів дослідження є основою експрес-методу оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів за даними георадарного зондування, а також практичних методик: оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»; оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів.

7. Очікуваний економічний ефект від впровадження методик оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна із залученням даних георадарного зондування становить:

а) від зниження собівартості діагностики георадарним комплексом – 1697,86 тис.грн./рік за умови обстеження 2000 км автомобільних доріг загального користування;

б) від уточнення за результатами георадарної діагностики періоду втрати запасу міцності конструкції дорожнього одягу та рекомендацій щодо обмеження руху великовагових транспортних засобів на автомобільних дорогах загального користування – від 653,24 грн/км·добу (через зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів) до 2,836 тис грн./км·добу (через зменшення збитків від перебування вантажів та пасажирів у шляху).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях:

1. Батракова А.Г., Урдзік С.М., Процюк В.О. Дослідження електрофізичних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів. Містобудування та територіальне планування : науково-технічний збірник. К., 2011. Вип. 40. С. 93–97.

2. Ряпухін В.М. Батракова А.Г., Процюк В.О. Дослідження зв'язку між електрофізичними і деформаційними характеристиками ґрунту. Містобудування та територіальне планування : науково-технічний збірник. К., 2012. Вип. 45. С. 102–107.

3. Батракова А.Г., Урдзік С.Н., Процюк В.А. Применение георадаров для оценки влажности и инфильтрации в слоях конструкций дорожных одежд. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К., 2012. Вип. 83. С. 13–18.

4. Процюк В.О. Прогнозування несучої здатності дорожніх одягів на ділянках з надмірним зволоженням ґрунтів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К., 2013. Вип. 89. С. 24–32.

5. Процюк В.О. Аналіз методів та засобів визначення вологості ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг. Наукові нотатки. Луцьк, 2014. Вип. 45. С. 453–457

6. Процюк В.О. Аналіз і удосконалення методики збереження цілісності конструкції дорожнього одягу у весняний період. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К., Вип. 93. С. 79–85.

7. Процюк В.О., Батракова А.Г. Алгоритм оцінки вологості ґрунтів земляного полотна за результатами георадіолокаційного обстеження. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета : сб. науч. тр. X., 2016. Вип. 72. С. 157–161. (включений до наукометричної бази *Index Copernicus*)

8. Процюк В.О. Фізичні основи методу георадіолокації в діагностиці дорожніх одягів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : зб. наук. праць. Луцьк, 2017. Вип. 6. С. 192–199.

9. Процюк В.О. Огляд основних математичних моделей визначення діелектричної проникності ґрунтів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць. Луцьк, 2017. Вип. 7. С. 207–212.

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях:

10. Процюк В., Батракова А. Применение георадарных технологий при определении прочностных характеристик грунтов земляного полотна. Автомобильные дороги и мосты. 2013. Вып. 2 (12). С. 40–44.

11. Процюк В. Использование данных, полученных при георадарном обследовании автомобильной дороги, для определения мер по сохранению конструкции дорожных одежд. Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». 2015. №1. С. 27–31.

Публікації у збірниках доповідей, тез конференцій і семінарів:

12. Батракова А.Г., Урдзік С.Н., Процюк В.А. Исследование возможностей применения георадара «Одяг» для поиска и идентификации подповерхностных дефектов в конструкциях дорожных одежд. Наука – будущее Литвы. Инженерия транспорта и организация перевозок : сборник статей 15-ой конференции молодых ученых Литвы, г. Вильнюс, Литва, 4 мая 2012 г. Вильнюс, 2012. С. 138–143.

13. Процюк В.О. Дослідження впливу вологості підстильного ґрунту та товщини шарів основи на загальний модуль пружності конструкції дорожнього одягу. Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Харків, 14-16 лист. 2013 р. X., 2013. С. 27–31.

14. Процюк В.А., Батракова А.Г. Георадарные исследования прочностных характеристик подстилающих грунтов земляного полотна. Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений : материалы Междунар. научно-практ. конф., г. Белгород, 8-10 окт. 2013 г. Белгород, 2013. С. 323–324.

15. Процюк В.А. Анализ оценки влияния влажности на прочностные деформационные грунтов земляного полотна автомобильных дорог и методов прогнозирования данной влажности. Наука – будущее Литвы. Инженерия транспорта и организация перевозок : сборник статей 17-ой конференции молодых ученых , г. Вильнюс, Литва, 8 мая 2014 г. Вильнюс, 2014. С. 283–286.

АНОТАЦІЯ

Процюк В.О. Експрес-метод оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару. – 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 МОН України, Харків, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна на автомобільних дорогах без руйнування конструкції дорожнього одягу. Основний науковий результат полягає у розвитку теоретичних і практичних положень оцінювання розрахункових параметрів ґрунту за даними георадарного зондування, які реалізовано в експрес-методі оцінювання розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна за допомогою польового георадару. Розроблено узагальнену модель діелектричних властивостей

грунту, яка дозволяє оцінити діелектричну проникність ґрунту залежно від його гранулометричного складу, щільності та об'ємної вологості. Встановлено зв'язок вологості, щільності, гранулометричного складу та діелектричної проникності типових ґрунтів з їх міцнісними та деформаційними параметрами. Отримано рішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами зондування георадаром з центральною частотою 1,2 ГГц. Розроблено алгоритм оцінювання розрахункових параметрів ґрунту із залученням даних георадарного зондування. Розроблено експрес-метод оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів за даними георадарного зондування та практичні методики: оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»; оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів. Підтверджено адекватність теоретичних моделей та практичних методик, здійснено їх широке впровадження.

Ключові слова: ґрунт земляного полотна, розрахункові параметри ґрунту, вологість, діелектрична проникність, георадар.

АННОТАЦІЯ

Процюк В.А. Экспресс-метод оценки расчетных параметров грунтов земляного полотна с помощью полевого георадара. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы». (192 – Строительство и гражданская инженерия). – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи оценки расчетных параметров грунтов земляного полотна на автомобильных дорогах без разрушения конструкции дорожной одежды. Основным научным результатом заключается в развитии теоретических и практических положений оценки расчетных параметров грунтов по данным георадарного зондирования, которые реализованы в экспресс-методе оценки расчетных параметров грунта земляного полотна с помощью полевого георадара. Проведенный анализ существующих методов оценки влажности и расчетных параметров грунтов земляного полотна позволил установить, что среди методов неразрушающей диагностики наибольший потенциал для определения влажности грунтов имеют волновые методы, к которым относится метод георадарного зондирования. В работе разработана и предложена обобщенная модель диэлектрических свойств грунтов, которая сочетает в себе модель Шмугге и модель Бирчака – «рефракционную модель» для многокомпонентных сред и позволяет установить значения диэлектрической проницаемости грунта в зависимости от его гранулометрического состава, плотности и объемной влажности. Проведены экспериментальные исследования физических, прочностных, деформационных и электрофизических параметров грунтов, что позволило установить связь влажности, плотности, гранулометрического состава и диэлектрической проницаемости типичных грунтов с их прочностными и деформационными параметрами и подтвердить основные теоретические положения модели оценки расчетных параметров грунтов с

привлечением данных георадарного зондирования. Получено решение задачи оценки влажности грунта земляного полотна по результатам зондирования георадаром с центральной частотой 1,2 ГГц. На основе полученного решения и связи диэлектрической проницаемости с прочностными и деформационными параметрами грунта, разработан алгоритм оценки расчетных параметров грунтов с привлечением данных георадарного зондирования. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования стали основой разработки экспресс-метода оценки расчетных параметров грунтов земляного полотна по данным георадарного зондирования, и практических методик: оценки влажности грунтов земляного полотна на грани «конструкция дорожной одежды – грунт земляного полотна»; оценки расчетных параметров грунтов. Подтверждена адекватность теоретических моделей и практических методик, осуществлено их широкое внедрение в производство и в учебный процесс.

Ключевые слова: грунт земляного полотна, расчетные параметры грунта, влажность, диэлектрическая проницаемость, георадар.

ABSTRACT

Protsiuk V.O. Express-method for estimating the subgrade soils calculated parameters using a field georadar. - Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.22.11 «Highways and airfields». (192 – Construction and Civil Engineering). – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and applied task of estimating the subgrade soils calculated parameters on highways without destructive the construction of pavement. The main scientific result consists in the development of theoretical and practical provisions for estimating the soils calculated parameters according to the georadar sensing data, which are implemented in the express method for estimating the subgrade soils parameters using a field georadar. The generalized model of soil dielectric properties is proposed, which allows to estimate the soil dielectric permittivity, depending on its granulometric composition, density and volume moisture content. The relation between humidity, density, granulometric composition and dielectric permittivity of typical soils with their strength and deformation parameters is established. The problem solution to the estimating the subgrade soil moisture content based on the results of sensing a georadar with a center frequency of 1.2 GHz has been obtained. The algorithm to the estimating the subgrade soil calculated parameters using georadar sensing data is developed. An express method to the estimating the soils calculated parameters based on georadar sensing data and practical methods was developed: estimating the subgrade soil moisture content on the edge of the "pavement – subgrade soil"; estimating the calculated parameters of soils.

Key words: subgrade soil, calculated soil parameters, moisture, dielectric permeability, georadar.

