

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПРОЦЮК ВІТАЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 625.7/.8

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

05.22.11 – Автомобільні шляхи та аеродроми

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ В.О. Процюк

Науковий керівник Батракова Анжеліка Геннадіївна, доктор технічних наук,
доцент

Харків – 2019

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 проблеми з оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна на автомобільних дорогах без руйнування конструкції дорожнього одягу. Основними факторами, які можуть впливати на розрахункові характеристики (а саме міцність та деформаційну стійкість) ґрунту земляного полотна є вологість та щільність ґрунту, яка змінюється у часі під впливом погодно-кліматичних факторів, а також пов'язана зі зміною рівня ґрунтових вод.

Одним зі шляхів вирішення означеної проблеми є отримання найбільш повної у часі та просторі інформації про вологість ґрунту земляного полотна та пов'язані з нею міцнісні та деформаційні характеристики ґрунту.

Незважаючи на різноманіття методів визначення вологості ґрунту, існуючі методи дозволяють отримати значення вологості ґрунтів лише у контрольних точках, що не дає повної картини про варіювання вологості в повздовжньому і поперечному напрямках.

Ефективним вирішенням даної проблеми по уточненню вологості ґрунту земляного полотна 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 і геометричні параметри шарів дорожніх одягів. Розвиток георадарних технологій та впровадження

результатів георадарного обстеження в практику дорожнього будівництва довели ефективність використання георадарів як інструменту отримання безперервної інформації про стан досліджуваного середовища у реальному масштабі часу. Разом з тим, використання георадарів для оцінювання вологості 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.

У роботі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт, предмет, мету і завдання дослідження, описано методи дослідження, а також визначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, надано інформацію про апробацію та публікації результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- 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 полягає у наступному:

- 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 методику георадарного зондування дорожнього одягу, відповідні алгоритми та методику обробки і інтерпретації результатів георадарного зондування під час вирішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»;

- розроблено методику 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.

Виконаний у першому розділі критичний аналіз існуючих методів оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна та встановлено, що серед згаданих методів неруйнівної діагностики найбільший потенціал для визначення вологості ґрунтів мають хвильові методи, до яких відноситься метод георадарного зондування. Вони дозволяють отримувати інформацію про фізичні властивості ґрунтів в безперервному режимі у реальному масштабі часу, без порушення цілісності конструкції дорожнього одягу.

У другому розділі запропоновано 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.

Завдяки проведеним експериментальним дослідженням фізичних, міцнісних, деформаційних та електрофізичних параметрів ґрунтів, було:

а) встановлено 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) підтверджено основні теоретичні положення моделі оцінювання розрахункових параметрів ґрунту із залученням даних георадарного зондування;

в) розроблено 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 отриманий зв'язок діелектричної проникності з міцнісними та деформаційними параметрами ґрунту.

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

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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 Харьковського національного автомобільно-дорожного університета : сб. науч. тр. Х., 2016. Вып. 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. Х., 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.

ABSTRACT

Protsiuk V.O. Express-method estimating the subgrade soils calculated parameters using a field georadar. – Qualifying 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 factors that can affect to the design subgrade characteristics (namely strength and deformation resistance) are the humidity and soil density, which changes in time under the influence of weather-climatic factors, and also related to changes in groundwater level.

One of the ways to solve this problem is to obtain the most complete and timely information about subgrade moisture content and its associated strength and deformation soil characteristics.

Despite the variety of methods for determining the soil moisture, existing methods can to obtain soil moisture values only at control points, which does not give

a complete picture of the moisture variation in the longitudinal and transverse directions.

Effective solution for this problem by clarifying the subgrade soil moisture content is the attraction of modern technical means for diagnostics and the corresponding methods of their practical application, which allow to promptly, without distraction the structure integrity, to receive information about the calculated subgrade parameters soil and geometric parameters of the pavement layers. The development of georadar technologies and the introduction of georadar survey results into road construction practices have proved the effectiveness of using georadars as a tool for obtaining continuous information about the state of the investigated environment in real time. However, the using georadars for assessing the soil moisture content is restrained by the lack of methods for attracting georadar data to the solution of the specified task. The development of such techniques will enable: to assess the soil moisture and its associated design characteristics, estimate the changes in these characteristics in time (annual cycle) and space (along the length of the road); to substantiate the pavement design that correspond to real conditions of operation.

The paper substantiates the relevance of the topic, articulates the object, subject, purpose and task of the research, describes the research methods, as well as determines the connection of work with scientific programs, themes; Information about testing and publication of the dissertation research results was provided.

The scientific novelty of the results obtained is as follows:

- developed a generalized model of soil dielectric properties is proposed that combines the Schmugge model and the Birchak model – the "refractive model" for multicomponent media, which allows determining the the soil dielectric permittivity value, depending on its granulometric composition, the density of the dry soil skeleton and bulk humidity;
- the dependences of the change in the soils permittivity on the relative humidity and density, strength and deformation parameters for different soils types

were determined, which allows to estimate the soil moisture content on the edge of the "pavement – subgrade soil" and determine the soil calculated parameters according to the results of georadar sounding in the presence of a priori information on the soil type;

- further developed the assessing method the soil moisture content on the edge of the "pavement – subgrade soil" by the results of georadar sounding, using the layer determination method of materials dielectric permeability of pavement constructive layers, and, unlike the previously known, relies on a generalized dielectric model the soil properties and experimentally established the connection between the electrophysical and physical soils parameters.

The practical results value is obtained:

- the express determination method for the estimated subgrade soil parameters, which, unlike the known ones, involves the georadar sounding data of the pavement and is based on an experimentally established connection between dielectric permittivity, soil moisture and the strength and deformation parameters. This allows to ensure the speed (in time) and continuity (in space) of the determination the soil calculated parameters, taking into account the local conditions for moisture, which increases the accuracy of pavement diagnostics and the design decisions validity;

- developed and implemented in the production practice of practical georadar sounding methods of pavements, corresponding algorithms and processing and interpretation methods of the georadar sounding results during the decision of the assessing task the soil moisture content on the edge the "pavement – subgrade soil";

- developed the determining methods the humidity and the subgrade soil calculated parameters for georadar sounding data. Heat involvement and results moisture transfer models of georadar sounding allows us to estimate the distribution of moisture content in depth and time during the maximum moisture accumulation period;

According to the dissertation research results, technological documents on integrated monitoring of highways by subgrade sounding methods have been developed. Widespread implementation of the developed methods by road organizations belonging to the Motor Roads State Agency of Ukraine, the Road Services of Ukraine in the Volyn region, in the educational process during the teaching of discipline "Design of city streets and special-purpose roads" in Lutsk NTU.

In the first section, a critical analysis of the existing methods for assessing the soils moisture content of pavement is made, and it is established that among the mentioned non-destructive diagnostics methods, the greatest potential for determination of soil moisture is the wave methods, which include the georadar sounding method. They allow to receive information about physical soils properties in a continuous mode in real time, without violating the integrity of the pavement design.

In the second section a generalized soil dielectric properties model is proposed, which combines the Schmugge model and the Birchak model, a "refractive model" for multicomponent media, and allows determination of the soil permittivity value, depending on its granulometric composition, density and bulk humidity. The theoretical analysis results of the model parameters:

- a) increasing the content of the clay fraction at the same volumetric moisture, the soil dielectric permeability increases;
- b) the growth rate of dielectric permeability, which depends on the soil moisture volume, with increasing content of clay fraction increases;
- c) the dielectric permittivity field according to the proposed model shows that the decrease in the density of the soil leads to a decrease in its dielectric constant. The soil density contribution (in the real range of soil density values in the subgrade soil) in dielectric permeability is from 3% to 10% and reaches the minimum values as the soil moisture volume decreases, while an increase in moisture leads to an increase in dielectric permeability of more than 200%;

d) the mineral composition of the ground slightly affects the dielectric permittivity amount. When completely replacing the soil mineral composition, the dielectric constant changes by 10%, while the increase in soil moisture by only 1.2% (from 0.68 W to 0.73 W) increases the dielectric permeability almost twice.

Thanks to the experimental research of physical, strength, deformation and electrophysical parameters of soils, it was:

a) the relation between humidity, density, granulometric composition and dielectric permittivity of typical soils with their strength (specific gravity, internal friction angle) and deformation (elastic modulus) parameters (correlation coefficient – from 0.9260 to 0.9921);

b) the basic model theoretical principles of the grounding parameters calculation with the involvement of georadar sounding data are confirmed;

c) the estimating algorithm to the soil calculated parameters with the application of georadar sounding data is developed, which is based on the decision of the assessing task the soil moisture content on the edge of "pavement – subgrade soil" and based on the experimentally obtained connection of dielectric constant with strength and deformation soil parameters.

The combination of the obtained research theoretical and experimental results is the basis of the express-method for estimating the soils calculated parameters based on georadar sounding data, as well as practical methods: estimating the soil moisture content on the edge of the "pavement – subgrade soil"; estimating the subgrade soils calculated parameters on the edge of the "pavement – subgrade soil" using a field georadar.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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. Х., 2016. Вып. 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. Х., 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.

ЗМІСТ

Вступ.....	21
Розділ 1 Аналіз проблем з визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна	29
1.1 Деформації і руйнування дорожнього одягу, що викликані надмірною вологістю ґрунтів земляного полотна.....	29
1.2 Загальні положення щодо нормування розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна	29
1.3 Методи визначення розрахункових параметрів ґрунтів.....	35
1.3.1 Зв'язок вологості з міцнісними та деформаційними параметрами ґрунтів	35
1.3.2 Методи оцінювання та прогнозування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна	40
1.4 Експериментальні методи і технічні засоби оцінювання вологості ґрунтів	46
1.5 Застосування георадарів щодо визначення фізичних параметрів ґрунтів земляного полотна	54
1.5.1 Методи оцінювання вологості ґрунтів, що засновані на визначенні діелектричної проникності георадаром	54
1.5.2 Моделі діелектричних властивостей ґрунту.....	62
1.6 Висновки за розділом. Мета і завдання дослідження	68
Розділ 2 Теоретичні положення оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування	72
2.1 Постановка задач оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування	72
2.2 Модель взаємодії електромагнітних хвиль з дорожнім одягом і ґрунтами земляного полотна	73

2.3 Постановка задачі оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна за результатами електрофізичних вимірювань	77
2.3.1 Обґрунтування моделі ґрунту як багатокомпонентної системи.....	79
2.3.2 Модель оцінювання діелектричної проникності ґрунтів.....	81
2.3.3 Оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за величиною діелектричної проникності.....	91
2.4 Постановка задачі оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару	95
2.4.1 Визначення діелектричної проникності та оцінювання вологості ґрунту польовим георадаром	95
2.4.2 Визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування.....	101
2.5 Висновки за розділом.....	109
Розділ 3 Експериментальні дослідження електрофізичних, фізичних, міцнісних та деформаційних властивостей ґрунтів земляного полотна	111
3.1 Обґрунтування параметрів моделей. Прилади та устаткування.....	112
3.1.1 Прилади та устаткування для проведення експериментальних досліджень.....	112
3.1.2 Обґрунтування параметрів лабораторних моделей для проведення георадарних вимірювань	115
3.2 Лабораторні дослідження з визначення фізичних, міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів	118
3.2.1 Визначення типу ґрунту та його основних фізичних характеристик.....	118
3.2.2 Визначення деформаційних параметрів ґрунтів.....	120
3.2.3 Визначення міцнісних параметрів ґрунтів.....	132
3.3 Лабораторні дослідження з визначення електрофізичних параметрів ґрунтів.....	136

3.3.1 Оцінювання параметрів моделі щодо визначення вологості ґрунтів за величиною діелектричної проникності.....	138
3.3.2 Встановлення зв'язку між діелектричною проникністю та фізичними, міцнісними і деформаційними параметрами ґрунтів.....	140
3.3.3 Перевірка адекватності узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту («Бірчака-Шмугге»).....	144
3.3.4 Перевірка адекватності моделі визначення вологості ґрунтів.....	145
3.3.5 Перевірка відтворюваності результатів вимірювань.....	149
3.4 Перевірка адекватності методів та моделей визначення вологості ґрунтів в польових умовах.....	153
3.4.1 Перевірка адекватності методу оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за допомогою польового георадару	153
3.5 Висновки за розділом	156
Розділ 4 Рекомендації щодо практичного застосування результатів дослідження.....	160
4.1 Методика оцінювання вологості ґрунту із застосуванням георадарних даних.....	160
4.2 Методика оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів.....	164
4.3 Економічна ефективність впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	167
4.3.1 Економічна ефективність від застосування методу оцінювання вологості ґрунту за результатами георадарного зондування дорожнього одягу	168
4.3.2 Ефективність застосування методу оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування під час реалізації стратегії збереження автомобільних доріг.....	171
4.4 Розвиток та подальше впровадження наукових результатів, що отримані у дисертаційному дослідженні.....	174
4.5 Висновки за розділом	176
Загальні висновки.....	178

	20
Список використаних джерел.....	182
Додаток А. Результати тарування важільного пресу.....	209
Додаток Б. Статистична перевірка достовірності визначення загального модулю пружності ґрунтової моделі	211
Додаток В. Зв'язок міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів з відносною вологістю	215
Додаток Г. Приклади розрахунку економічної ефективності від уточнення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна	220
Додаток Д. Довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	227
Додаток Е Список опублікованих праць за темою дисертації.....	231

ВСТУП

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 погодно-кліматичних 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 методику оцінювання вологості ґрунту земляного полотна, міцністних 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, міцністними 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 надширококутових імпульсних сигналів георадару із конструкцією дорожнього одягу та ґрунтом земляного полотна. Дослідження закономірностей змінення електрофізичних параметрів ґрунту від його фізичних, міцністних 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 методику георадарного зондування дорожнього одягу, відповідні алгоритми та методику обробки і інтерпретації результатів георадарного зондування під час вирішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»;

– розроблено методику 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 «Инновационные 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ З ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

1.1 Деформації і руйнування дорожнього одягу, що викликані надмірною вологістю ґрунтів земляного полотна

Забезпечення нормативного транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг є основною задачею дорожньої галузі України. Державне агентство автомобільних доріг «Укравтодор» оцінює збитки української економіки через незадовільний транспортно-експлуатаційний стан мережі автомобільних доріг у 120 млрд. грн. на рік. Збитки враховують перевитрату пального, зменшення швидкості перевезень, а також вартість ремонту транспортних засобів. Значна частка транспортних витрат призводить до зростання собівартості всієї продукції, що перевозиться автомобільними дорогами України, приблизно на 15 %.

Серед основних факторів, що обумовлюють транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг, визначають [1]: природно-кліматичні та ґрунтово-геологічні умови району будівництва та експлуатації автомобільної дороги; особливості проектування та будівництва; особливості ремонту та утримання автомобільної дороги. Аналіз значимості цих факторів [2, 3] доводить, що на транспортно-експлуатаційні показники дорожнього одягу протягом терміну служби, найбільш суттєво впливають природно-кліматичні фактори та тип ґрунту земляного полотна. В свою чергу, ґрунти земляного полотна значною мірою обумовлюють міцність дорожнього одягу, його надійність, та, в кінцевому підсумку, термін служби автомобільної дороги до капітального ремонту. Існує багато досліджень, де відзначається, що деформації земляного полотна є однією з головних причин руйнування дорожнього одягу [2–5].

Природні фактори формують водно-тепловий режим земляного полотна, що визначається закономірностями сезонного змінення вологості та температури ґрунтів земляного полотна та шарів основи. небезпечний вплив надмірної вологості ґрунтів земляного полотна проявляється у зниженні щільності та міцності ґрунту активної зони земляного полотна, що призводить до появи пучин взимку та просядок навесні, поздовжніх тріщин, проломів на покритті автомобільної дороги, колійності внаслідок пластичних деформацій перезволоженого ґрунту земляного полотна, викликає обломлювання крамок покриття (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Руйнування та деформації дорожнього одягу під впливом вологості ґрунту: а) просядка; б) поздовжні тріщини; в) обломлювання крамок проїзної частини б) колія

Встановлено [6], що в районах надмірного зволоження ґрунтів з плином часу властивості ґрунтів у робочому шарі земляного полотна змінюються. За наявності вдосконалених водонепроникних покриттів істотно зменшується повітрообмін ґрунтів земляного полотна з атмосферою, що призводить до підвищення вологості ґрунту активної зони земляного полотна. Якщо в бічних резервах або канавах застоюється вода, суглинисті ґрунти через 15-20 років експлуатації у районах дорожньо-кліматичної зони У-І перетворюються у глиняні ґрунти. У цьому випадку, розрахункові параметри ґрунтів, що були закладені на етапі проектування, не відповідають фактичним значенням.

Помилки при врахуванні природно-кліматичних умов, типу та вологості ґрунту, пов'язаних з ними розрахункових параметрів ґрунту, що змінюються протягом життєвого циклу автомобільної дороги, призводять до зниження проектної надійності автомобільних доріг, і, як наслідок, надлишковим витратам на відновлення їх транспортно-експлуатаційних показників. Для запобігання помилок на стадії проектування та експлуатації, необхідно керуватися розрахунковими параметрами ґрунтів, що отримані за результатами польових та лабораторних досліджень у природних умовах району проектування, що дозволить:

- а) забезпечити міцність та надійність конструкції дорожнього одягу;
- б) забезпечити нормативний техніко-експлуатаційний стан протягом терміну служби автомобільної дороги;
- в) планувати заходи зі збереження автомобільних доріг у весняний період;
- г) планувати терміни і види ремонтних робіт, забезпечуючи ефективне розподілення фінансових і матеріальних ресурсів.

1.2 Загальні положення щодо нормування розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна

Для території України найбільш несприятливим періодом для експлуатації автомобільних доріг є період відтавання ґрунту земляного

полотна, коли вологість ґрунту земляного полотна набуває максимальних значень (розрахункова вологість), що обумовлює мінімальну міцність земляного полотна та конструкції дорожнього одягу [7].

До основних розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна, що застосовуються при проектуванні автомобільних доріг, відносяться показники міцності та деформативності ґрунтів робочого шару земляного полотна, від обґрунтованості яких залежить транспортно-експлуатаційний стан покриття та термін служби дорожнього одягу. Розрахункові параметри ґрунтів, як у природному заляганні, так й у земляному полотні автомобільних доріг, в свою чергу, суттєво залежать від гранулометричного складу ґрунту, його розрахункової вологості, щільності, температури, порового тиску та зміни цих фізико-механічних характеристик в часі під час промерзання та відтавання, а також від режиму навантаження під час випробовування [8].

Принципи та методи нормування розрахункової вологості та розрахункових параметрів ґрунтів робочого шару земляного полотна стосовно до задач дорожнього будівництва закладено у дослідженнях 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, їхні фізико-механічні властивості та порядок нормування розрахункових параметрів ґрунтів.

Проф. М.М. Івановим розроблено загальні положення нормування розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна, які складаються з встановлення розрахункового стану ґрунту в даних умовах на першому етапі та призначення міцнісних і деформаційних розрахункових параметрів ґрунту, що відповідають розрахунковому стану [9]. Такий порядок дозволяє обґрунтовано призначати розрахункові параметри ґрунтів для проектування дорожнього одягу, а також забезпечує можливість удосконалювати, з одного боку – методи визначення та прогнозування розрахункового стану ґрунту земляного полотна для конкретних місцевих умов, з другого боку – методи визначення

розрахункових (міцнісних і деформаційних) параметрів ґрунтів для відповідного розрахункового стану.

Розвитку сучасних уявлень про нормування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна сприяли роботи О.К. Біруля [10, 11], де запропоновано використання імовірнісного підходу під час нормування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна. Основні положення з нормування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна, що закладено в працях М.М. Іванова, О.К. Біруля, дістали подальшого розвитку у працях проф. В.М. Сіденка [12], де доведено, що розрахункова вологість ґрунтів земляного полотна визначається сукупністю кліматичних умов місцевості та теплофізичних властивостей дорожнього одягу. Узагальнення раніше проведених теоретичних досліджень, а також багаторічних спостережень дослідників ХНАДУ, МАДІ, СіБАДІ створили сучасну систему нормування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна та пов'язаних з нею міцнісних та деформаційних параметрів залежно від дорожньо-кліматичного районування та типу місцевості за зволоженням.

Для розрахунків дорожнього одягу та земляного полотна, переважно, використовують табличні значення розрахункових параметрів ґрунтів, що містяться у нормативних документах [13–17]. Слід зазначити, що у нормативних документах [13–17] наведено мінімальні значення міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів у відповідних умовах, щоб гарантувати необхідну надійність конструкцій.

На думку фахівців [18, 19], розрахункові параметри ґрунтів земляного полотна, що містяться у сучасних нормативних документах, отримано за результатами узагальнення значного обсягу досліджень на обмеженій території, усереднено по дорожньо-кліматичних зонах для інших територій без детального врахування місцевих природних умов. Це призводить до помилок у розрахунках та зниження надійності проектних рішень, що приймаються.

Визначення значень міцнісних і деформаційних розрахункових параметрів можна проводити і для відомих розрахункових станів. Цей спосіб є

найбільш надійним, оскільки передбачає можливість врахування особливостей реальних ґрунтів. Проте такі дослідження є досить трудомісткими, тому, як правило, їх виконують обмежено лише для умов, що значно відрізняються від найбільш поширених (типових).

Найбільш достовірні значення деформаційних і міцнісних параметрів ґрунтів земляного полотна отримують шляхом випробування їх штамповим обладнанням в розрахунковий період безпосередньо в процесі розкриття дорожнього одягу [20–22] або шляхом випробування в лабораторії зразків з непорушеною будовою [13, 23], відібраних із земляного полотна із відповідним станом ґрунту, близькому до розрахункового. Проведення польових випробувань в розрахунковий період ускладнюється через обмеження часу досліджень і тому випробування щодо визначення міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів проводять в лабораторії на зразках, що були попередньо заформовані за відповідної вологості і щільності ґрунту. Дослідженнями О.М. Кривиського та М.А. Пузакова [24] доведено, що розрахункові параметри ґрунтів, що отримані шляхом випробування ґрунту земляного полотна в конструкції, в більшості випадків істотно не відрізняються від розрахункових параметрів переформованих зразків ґрунту у тому ж розрахунковому стані [9]. До того ж, земляне полотно автомобільних доріг відсипають і ущільнюють подібно до формуванню зразків ґрунту, тому стан ґрунту в переформованому зразку найбільшим чином відповідає фактичному стану в земляному полотні в перші роки експлуатації [24].

Таким чином, актуальність задачі визначення розрахункових параметрів ґрунтів, різноманіття природно-кліматичних та ґрунтових умов, обмежені можливості щодо польових випробувань ґрунтів, а також недосконалість існуючої нормативної бази створили передумови для розвитку досліджень, які пов'язані з визначенням розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна для різних регіональних природно-кліматичних умов, накопиченням експериментальних даних, що є одним із шляхів забезпечення надійності проектних рішень.

1.3 Методи визначення розрахункових параметрів ґрунтів

1.3.1 Зв'язок вологості з міцнісними та деформаційними параметрами ґрунтів

У дисертаційному дослідженні під міцнісними параметрами будемо розуміти кут внутрішнього тертя (φ , $^{\circ}$) і питоме зчеплення (C , МПа), під деформаційними параметрами – модуль пружності (E , МПа) ґрунту. Ці параметри ґрунтів земляного полотна істотно залежать від вологості ґрунту та визначають напружено-деформований стан земляного полотна та дорожнього одягу, що доведено численними дослідженнями [1, 7, 9, 25–30]. Збільшення вологості ґрунтів земляного полотна призводить до зниження міцнісних і деформаційних параметрів [3, 13, 15, 16, 31–34] ґрунтів.

Попередні розрахунки, що виконані автором дослідження, також доводять, що збільшення вологості ґрунту лише на 4 % для супіску, на 6 % для суглинку і глини призводить до зменшення модуля пружності ґрунту відповідно на 23 МПа – 44 МПа [35]. Для капітального типу конструкції із товщиною шарів основи 40 см, зменшення модуля пружності земляного полотна, відсипаного із супіску, призводить до зменшення загального модуля пружності дорожнього одягу на 14 %. Але, якщо товщина основи конструкції з перехідним і полегшеним типом покриття становить лише 28 см і основа влаштована на ґрунті земляного полотна із суглинку, збільшення вологості ґрунту земляного полотна на 6 % призводить до зменшення загального модуля пружності конструкції на 125 МПа, тобто міцність конструкції дорожнього одягу зменшується майже вдвічі.

Тому актуальність питання забезпечення надійності земляного полотна та дорожнього одягу шляхом найбільш повного врахування природно-кліматичних особливостей району будівництва та, відповідно, ґрунтово-геологічних та гідрологічних умов зберігається й понині.

Одним із напрямків досліджень у цій галузі дорожньої науки є

встановлення зв'язку між вологістю ґрунту земляного полотна та його міцнісними і деформаційними параметрами. Дослідження СоюзДорНДІ [36–41] і роботи О.К. Біруля [8, 10, 11, 42–44] створили основу для вивчення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна в різних природно-кліматичних зонах. Вагомий внесок у цей напрямок досліджень зроблений В.Ф. Бабковим [45], А.О. Бєлятинським [46, 47], В.К. Вирожемським [48, 49], І.П. Гамеляком [50], В.К. Жданюком [51, 52], Ю.О. Кірічеком [53, 54], В.П. Носовим [55], Н.В. Орнатським [56], Д.О. Павлюком [57], В.В. Петровичем [50, 58], М.А. Пузаковим [40, 59–61], В.І. Рувінським [62], В.Я. Савенко [29, 30, 33], О.С. Славінською [27, 29, 30, 33], О.Я. Тулаєвим [36], М.О. Цитовичем [2], І.І. Черкасовим [3].

Експериментальному дослідженню ґрунтів степових районів України присвячені роботи О.К. Біруля [8, 10, 11, 44], І.А. Носича [63, 64], С.І. Міховича [25], В.М. Сіденка [12, 25, 65–67], М.Н. Гудзинського [68], Ю.О. Кірічека [69]; в північних районів України – роботи Д.О. Павлюка [70–73], в районах вічномерзлих ґрунтів – І.А. Золотаря [74, 75]; в південних районах Росії – С.В. Алексікова [76]; в Белгородській області Росії – С.О. Гнезділової [77]; в районах Західного Сибіру – С.В. Єфіменко [18, 31, 78], В.Н. Єфіменко [18, 25]; в Казахстані – Н.Г. Шкулової [79] та А.Ф. Котвицького [80]; в Білорусії – І.І. Леоновича [81–83], Р.З. Порицького [84].

На даний час дослідження зв'язку між вологістю ґрунтів та їх міцнісними та деформаційними параметрами розвиваються за двома основними напрямками. Перший напрямок ґрунтується на систематизації, узагальненні отриманих раніше експериментальних даних. Так, за результатами досліджень ґрунтів земляного полотна, проведених ще в 40-х роках ХХ сторіччя, в роботі Л.О. Преферансової [39] була представлена характеристика міцності ґрунтів в залежності від гідрологічних, ґрунтових і кліматичних умов місцевості. Ці характеристики ґрунтів отримані з врахуванням лише зимових умов зволоження. Не зважаючи на це, в даній роботі [39] важливе практичне значення має класифікація місцевості за характером зволоження.

Другий напрямок досліджень пов'язаний з деталізацією дорожньо-кліматичного районування територій будівництва шляхом більш детального врахування місцевих ґрунтових, геологічних та гідрологічних умов та уточнення залежностей між вологістю, щільністю ґрунтів та їх міцнісними та деформаційними параметрами. Основу цього напрямку досліджень створено О.К. Біруля [8], С.І. Міховичем [85], І.А. Носичем [63], В.М. Сіденком [66]. Стосовно до ґрунтово-гідрологічних умов південних регіонів Росії С.В. Алексіковим [76] удосконалено методику щодо встановлення розрахункової вологості ґрунту. Запропонована автором методика дозволяє обґрунтувати регіональну розрахункову вологість і міцність ґрунтів узбіччя земляного полотна за даними агрометеослужби з урахуванням типу ґрунту, типу місцевості за характером зволоження, конструкції дорожнього одягу і типу укріплення узбіччя.

За результатами досліджень суглинистих і торф'яних ґрунтів в умовах Західного Сибіру В.М. Єфіменко [86] уточнено математичну модель вологонакопичення в робочому шарі земляного полотна для другого та третього типів місцевості за характером зволоження, експериментально отримано кореляційний зв'язок між вологістю та розрахунковими параметрами суглинистих та глинистих ґрунтів земляного полотна, що дозволяє використовувати ці результати під час проектування дорожнього одягу в умовах західносибірського регіону.

Дослідження щодо уточнення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна у Белгородській області Росії проведені С.О. Гнезділовою. В роботі [77] за результатами спостережень за вологістю ґрунтів земляного полотна і температурою повітря отримано регресійне співвідношення між цими показниками, що дозволило авторіві роботи удосконалити методику визначення розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна, яка враховує тип місцевості за характером зволоження, матеріали основи конструкції дорожнього одягу та температуру повітря.

На даний час накопичений значний досвід з визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна для різних природно-кліматичних, ґрунтово-геологічних, гідрологічних умов проектування автомобільних доріг. В більшості цих досліджень застосовувалися дані агрометеостанцій (АМС) про вологість ґрунтів відкритого поля і використовувалися ймовірнісні методи визначення розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна.

Проведений аналіз методів дослідження міцнісних і деформаційних параметрів ґрунтів дозволив узагальнити і систематизувати кореляційні залежності між вологістю та міцнісними і деформаційними параметрами ґрунтів, що отриманні для різних територій розташування автомобільних доріг (табл. 1.1). Більшість авторів йдуть шляхом уточнення коефіцієнтів регресійних моделей. Так, В.М. Єфіменко [18] уточнює модель В.М. Сіденка для суглинистих ґрунтів. Багато авторів, встановлюючи зв'язок між вологістю та розрахунковими параметрами ґрунтів, отримують експоненціальні залежності, що характеризуються значною розбіжністю у значеннях коефіцієнтів [18] навіть для близьких природно-кліматичних умов.

Зазначимо також, що моделі (таблиця 1.1) у силу різноманіття ґрунтових, геологічних, гідрологічних, природно-кліматичних умов районів дослідження позбавлені такої властивості, як універсальність. Отже, залежності, які отримані для ґрунтів одного району, не можуть бути автоматично застосовані в інших ґрунтових та гідрологічних умовах. Результати експериментальних досліджень істотно залежать від методів і способів обробки отриманої інформації про характеристики ґрунтів.

Крім того, використання зазначених моделей потребує апіорної інформації про тип та вологість ґрунту земляного полотна, яка може змінюватися навіть на незначних за довжиною ділянках автомобільних доріг. Складнощі з експериментального визначення вологості ґрунтів в польових умовах обумовлюють застосування у перелічених моделях (таблиця 1.1) методів прогнозування вологості ґрунтів, що знижує їх точність.

Таблиця 1.1 – Моделі оцінювання міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів

Автор	Залежність	Коефіцієнти	Умови
1	2	3	4
Сіденко В.М. [12]	$E_{cp} = \frac{N}{W^n}$	$n=1, 2, 3$ при коефіцієнті ущільнення ґрунту відповідно 0,8; 0,9 і 1. $N = 40 - 60$.	Для степових районів України
Сіденко В.М., Міхович С.І. [25]	$E_{y,c,tg\varphi_0} = AW^3 + BW^2 + CW + D$	Коефіцієнти зведені до табличної форми [25]	Для степових районів України
Золотарь І.А.	$E_{cp} = \frac{N}{W^n}$	$N=217; n=1,7$	
Єфіменко С.В. Єфіменко В.Н. [18, 31]	Для суглинку: $E_{cp} = A + B \cdot e^{C \cdot W_{от}},$ $C = e^{C1 \cdot W_{от}},$ $\varphi = A1 + B1 \cdot e^{C2 \cdot W_{от}}.$	$A=10,92;$ $B=3771,47;$ $C=-9,76;$ $C1=-5,09;$ $A1=15;$ $B1=4738,4;$ $C2=-11,88.$	Для південно-східної частини Західного Сибіру
	Для супіску: $E_{cp} = A + B \cdot e^{C \cdot W_{от}},$ $C = e^{C1 \cdot W_{от}},$ $\varphi = A1 + B1 \cdot e^{C2 \cdot W_{от}}.$	$A=28,95;$ $B=49297,25;$ $C=-14,9$ $C1=-6,77;$ $A1=18,85;$ $B1=94,76;$ $C2=-4,86.$	
Гнезділова С.О. [77]	$E = A \cdot e^{C \cdot W_{от}},$ $C = A1 \cdot e^{C1 \cdot W_{от}},$ $\varphi = A2 \cdot e^{C2 \cdot W_{от}}.$	$A=159,83;$ $C=-3,09$ $A1=0,27;$ $C1=-3,47;$ $A2=32,15;$ $C2=-0,91;$	Для Белгородської області Росії
Алексіков С.В. [76]	$E = \frac{C \cdot K_y^{1,5}}{W^a},$ $c = \frac{C \cdot K_y^{1,5}}{W^a},$ $\varphi = C + a \cdot K_y + b \cdot W,$	Коефіцієнти представленні в табличній формі [76]	Для півдня Росії

1.3.2 Методи оцінювання та прогнозування розрахункової вологості ґрунтів земляного полотна

Сезонне коливання вологості ґрунтів земляного полотна в значній мірі впливає на коливання їх міцності і експлуатаційні якості покриття [7, 25]. Тому під час проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг особливо важливою задачею є прогнозування вологості ґрунтів земляного полотна, встановлення розрахункової вологості та пов'язаних з нею розрахункових параметрів ґрунтів в річному циклі [59, 62, 87]. Під розрахунковою розуміється вологість, що обумовлює найменшу міцність земляного полотна автомобільної дороги [88]. Прогнозування міцнісних і деформаційних параметрів ґрунтів в розрахунковий період ускладнюється великою різноманітністю різновидів ґрунтів, залежністю їх характеристик від вологості, щільності, температури.

Існуючі методи розрахунку та прогнозування вологості ґрунтів об'єднані у дві великі групи: аналітичну та емпіричну, які досить часто перемежуються між собою.

Найбільш поширеними в практичній діяльності щодо встановлення вологості є аналітичні методи, висвітлені в роботах проф. І.А. Золотаря [59], С.В. Нерпіна [89], Н.А. Пузакова [59], В.І. Рувінського [62], В.М. Сіденка [12], А.Я. Тулаєва [59], Е.І. Шелопаєва [90, 91], та інших.

Метод прогнозування вологості в річному циклі, що запропонований Е.І. Шелопаєвим [90], заснований на рівняннях термодинаміки і враховує явища промерзання в процесі міграції вологи. Метод дозволяє більш повно враховувати кількість опадів, температуру повітря, вітер, випаровування і параметри шарів конструкції дорожнього одягу. Однак недоліком даного методу являється велика кількість вхідних даних для розрахунку, які складно відтворюються, і визначаються найчастіше з великою похибкою.

Метод визначення розрахункової вологості ґрунту земляного полотна, що запропонований професором В.І. Рувінським базується на фізико-технічній

основі [62] та дозволяє вирішувати задачі визначення вологості ґрунтів земляного полотна при різних схемах зволоження: зверху з врахуванням виду матеріалів покриття і основи, що є основною перевагою цього методу; знизу від рівня ґрунтових вод з використанням капілярної теорії міграції вологи. Ґрунтова система при цьому представляється у вигляді декількох капілярних груп, що є, на думку Маркуца [92], спірним, оскільки в ґрунтах порушеної структури, що утворюють земляне полотно, капілярна система виникає надзвичайно повільно. У штучно-ущільнених ґрунтах утворюються найчастіше замкнуті порові простори і міграція вологи в основному обумовлена плівковим механізмом. Тому висота капілярного підняття в зв'язних ґрунтах (суглинках і глинах) приймається (умовно) не більше двох метрів, у той час, як в природних умовах за наявності впорядкованої капілярної системи вона досягає декількох десятків метрів. Складність визначення гідрофізичних характеристик, що входять в розрахункові формули, їх низька відтворюваність в дослідках обмежує можливості пропонованого методу.

Метод прогнозування вологості в осінній період, що заснований професором І.А. Золотарем [59], дозволяє враховувати конструктивні параметри земляного полотна, кліматичні характеристики місцевості і тип ґрунтів за допомогою введення коефіцієнтів переносу вологи. За цим методом можна прогнозувати вологість ґрунтів земляного полотна наприкінці осіннього періоду та у зимовий період накопичення вологи. Ці переваги дозволяють не тільки прогнозувати, а й регулювати водно-тепловий режим земляного полотна. Зважаючи на відсутність надійних даних про коефіцієнти переносу вологи в ґрунтах ці гідрофізичні характеристики були визначені експериментальним шляхом. На підставі цих досліджень були розроблені рекомендації щодо проектування земляного полотна автомобільних доріг з врахуванням водно-теплових процесів.

Разом з тим, дослідження проф. І.А. Золотаря проведені для територій вічномерзлих ґрунтів, тому теорія тепло-вологопереносу для ґрунтів із сезонним промерзанням не відображає реальний стан процесу. Зазначимо

також, що нечітка відтворюваність результатів визначення коефіцієнтів переносу вологи, зумовила розробку більш надійних способів розрахунку та прогнозування вмісту вологості у ґрунтах активної зони земляного полотна автомобільних доріг. На основі досліджень вологості ґрунтів у степових районах України, використання основних законів термодинаміки та залучення теорії тепломасообміну О.В. Ликова В.М. Сіденком було удосконалено теорію тепломасообміну у земляному полотні [12, 59] та отримано аналітичні рівняння щодо розрахунку змінення поля вологості ґрунтів. Найбільший інтерес представляє період морозного вологонакопичення.

Для першого типу місцевості, де ґрунтові води залягають глибоко, рівняння має вигляд [9, 84]:

$$W(z, T) = W_{\Pi} - mz \sqrt{\frac{T}{\pi a_1}} \exp\left(-\frac{z^2}{4a_1 T}\right) + m \cdot \left(T + \frac{z^2}{2a_1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_1 T}}\right), \quad (1.1)$$

де W – вологість ґрунту на початок періоду вологонакопичення, %;

W_{Π} – повна вологоємність ґрунту, %;

m – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність наростання вологості ґрунту земляного полотна, 1/год;

z – глибина на якій проводиться розрахунок вологості, м;

T – період вологонакопичення, год;

a_1 – коефіцієнт вологопровідності, м²·год.

Аналіз даної формули доводить, що в період морозного вологонакопичення вологість в активній зоні зменшується зверху вниз. При відносній вологості $W_{\Pi} \leq 0,50 - 0,60$ W_T накопичення вологи обумовлюється термодифузією парів, при $W_{\Pi} \geq 0,65 - 0,70$ W_T – головним чином накопичення вологи є концентраційна міграція рідкої фази.

Аналогічні залежності було отримано для другого і третього типу місцевості за характером зволоження [25, 87].

Приведені В.М. Сіденком залежності [25, 87] дозволяють прогнозувати вологість ґрунту на певній глибині в конкретний період часу після початку і в період повного вологонакопичення для різних умов зволоження ґрунтів земляного полотна автомобільної дороги, а також розробити рекомендації щодо проектування конструкцій дорожнього одягу для першого типу місцевості за характером зволоження.

Застосування рівняння (1.1) обмежується великою кількістю початкових умов та вихідних даних, серед яких найбільші складнощі викликає визначення вологості ґрунту земляного полотна під конструкцією дорожнього одягу на початку періоду накопичення вологи (W).

Окреме місце займають методи, засновані на рівнянні водного балансу і гідро-кліматичних розрахунках. Існує декілька методів розрахунку вологості ґрунтів за кліматичними показниками: метод А.Р. Константинова [93], метод М.І. Карлінського [94], метод А.С. Плоцького, метод гідролого-кліматичних розрахунків [87, 88, 90–98].

Необхідно, щоб аналітична модель методу дозволяла проводити розрахунки не лише багаторічної вологості ґрунту, а й за конкретні роки, при цьому враховувати глибину залягання ґрунтових вод і фізичні властивості ґрунту. З урахуванням сформульованих критеріїв професором А.В. Скрипниковим був зроблений аналіз сучасних спостережень [99] і доведено, що для розрахунків природної вологості ґрунтів найбільш загальним є метод гідро-кліматичних розрахунків В.С. Мезенцева [100, 101]. Метод заснований на вирішенні рівняння водно-теплового балансу ґрунтового приземного шару, що дозволяє розраховувати відносну вологість ґрунту в активному шарі, сумарне випаровування, стік та інші характеристики.

Загальний вигляд складеного рівняння балансу має вигляд [99, 102]:

$$C + W_1 - W_2 + Q_1 - Q_2 = Z + (Y_2 - Y_1) + (G_2 - G_1) + (S_2 - S_1) + (P_2 - P_1), \quad (1.2)$$

де C – конденсація водяних парів, мм;

Z – сумарне випаровування, мм;

Y_1 і Y_2 – приплив і відтік поверхневих вод, мм ;

G_1 і G_2 – приплив і відтік ґрунтової вологи в розрахунковому шарі h_p , мм;

S_1 і S_2 – приплив і відтік ґрунтової води в розрахунковому шарі $h_{zp}-h_p$, мм;

P_1 і P_2 – приплив і відтік ґрунтових вод, мм;

W_1 і W_2 – вологість ґрунту в шарі h_p на початок і кінець розрахункового періоду часу, мм;

Q_1 і Q_2 – запас вологи в шарі h_p на початок і кінець розрахункового періоду часу, мм.

Після деяких перетворень і балансових розрахунків отримано рівняння водно-теплового балансу [99]:

$$\frac{r}{r+1} \cdot \frac{Z_{m,i}}{LW_T} \cdot W'_{cp,j} + W_{cp,j} = \frac{r}{r+1} \cdot \frac{KX_i - m_i + g_i}{LW_T} + W_{i,j}, \quad (1.3)$$

де W_T – відносна вологість ґрунту в частках від вологості на межі текучості, частки од.;

KX_i – атмосферні опади, мм;

$Z_{m,i}$ – максимальне випаровування за розрахунковий період, мм;

L – коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту, дорівнює: для супісків пілуватих і суглинків легких пілуватих 0,63, суглинків важких пілуватих 0,68 – 0,74;

r – параметр, що характеризує водно-фізичні властивості ґрунту (становить для супісків, суглинків легких 1,5, суглинків важких і глин - 2,5);

$W_{cp,i}$ – середня вологість ґрунту, частки од.;

$W_{l,i}$ – вологість ґрунту від початку i - розрахункового періоду, частки од.;

m_i – додаткове зниження вологості ґрунтового шару за рахунок збільшення поверхневого стоку після завчасного проведення підготовчих інженерних заходів, мм;

Рівняння (1.3) дозволяє розраховувати середню вологість ґрунту W_{cp} – в

межах робочого шару земляного полотна помісячно для різного i – розрахункового періоду часу.

Разом з тим, слід зазначити, що методи, які засновані на рівнянні водного балансу, потребують залучення для розрахунку вологості великої кількості гідро-кліматичних даних. Це ускладнює застосування даної методики під час прогнозування максимальної вологості ґрунту.

Поряд з методами, що розглянуті, існують методи прогнозування вологості, що використовують емпіричні рівняння, які ґрунтуються на статистичній обробці даних багаторічних спостережень за вологісним режимом земляного полотна автомобільних доріг, або вологісним режимом ґрунтів відкритого поля і зв'язують накопичення вологи в ґрунті з метеорологічними умовами (температурою, кількістю опадів, випаровуванням) періоду, що передує прогнозованому періоду [103, 104]. Дані методи знайшли своє відображення в роботах О.К. Біруля [10], В.М. Сіденка [12], О.А. Роде [105, 106], М.І. Карлінського [94].

Метод встановлення розрахункової вологості ґрунту земляного полотна, запропонований О.К. Біруля [10], заснований на теорії ймовірності. При відсутності спостережень за вологістю земляного полотна О.К. Біруля пропонує використовувати результати багаторічних спостережень за вологістю ґрунтів відкритого поля агрометеостанції (АМС). За даними довготривалих (понад 15 років) спостережень на найближчій АМС до району автомобільної дороги, що має аналогічні кліматичні, ґрунтові та гідрологічні умови, складають статистичний ряд із сезонної максимальної вологості ґрунту відкритого поля. За правилами теорії ймовірності будують криву розподілу, криву забезпеченості і, залежно від прийнятої забезпеченості, обчислюють значення розрахункової вологості ґрунту.

Метод О.К. Біруля є дуже складним, якщо його застосувати для розрахунку не тільки максимально можливої вологості, але і вологості ґрунтів протягом усього річного циклу.

Дослідження щодо прогнозування вологості ґрунтів в річному циклі

провів М.І. Карлінський [94]. На основі статистичної обробки матеріалів багатьох АМС за спостереженнями про вологість ґрунту М.І. Карлінський запропонував формулу для розрахунку вологості ґрунтів. Основою методу є рівняння водного балансу ґрунту, що використовував і В.С. Мезенцев [100], де структура і властивості ґрунту враховуються за допомогою коефіцієнтів, що визначені для окремих типів ґрунтів, а тому обмежує широке використання методу.

Статистичні дані являються досить обмеженими в застосуванні. Вони являються досить трудомісткими і при цьому малоефективними саме у визначенні та прогнозуванні вологості. Що робить методику малопродуктивною. До того ж отриманні значення під час спостереження притаманні лише для даної території і не можуть бути використанні під час прогнозування для інших територій.

Аналізуючи теоретичні методи прогнозування вологості ґрунтів, можна зробити висновок про недосконалість даних методів. Методи потребують великої кількості статистичних даних, обмежуються певними ґрунтово-геологічними та гідрологічними умовами, потребують значного обсягу апріорної інформації, що ускладнює їх практичне використання.

Зазначимо також, що всі наведені вище теоретичні методи розрахунку і прогнозування вологості ґрунту в період максимального вологонакопичення потребують знання початкової вологості. Це призводить до необхідності залучення інструментальних засобів, що дозволяють встановити початкову вологість ґрунту під конструкцією дорожнього одягу.

1.4 Експериментальні методи і технічні засоби оцінювання вологості ґрунтів

Методи та засоби для отримання значень абсолютної вологості ґрунтів поділяються (таблиця 1.2):

а) за характером дії на покриття: руйнівні та неруйнівні;

- б) за вимірювальним параметром: прямі та непрямі;
- в) за мобільністю дослідження: стаціонарні і польові лабораторії.

Основою прямих методів є дослідження фізичних властивостей ґрунту шляхом безпосереднього визначення вологості. Під час використання непрямих методів, вологість матеріалу визначають за фізичними властивостями або величинами, які функціонально пов'язані з вологістю.

Кращими є прямі методи випробувань (термоваговий, дистиляційний, екстракційний, метод Фішера), оскільки дозволяють безпосередньо визначити вологість ґрунту. Проте в багатьох випадках, коли необхідно визначити вологість без руйнування конструкції, використовуються результати непрямих методів дослідження (тензометричний, оптичний, електричний та ін.).

Методи і засоби щодо визначення розрахункових параметрів ґрунтів регламентуються нормативними документами [22, 23, 107–110] та методиками щодо проведення робіт для визначення фізичних характеристик ґрунтів [109, 111]. Методи визначення вологості ґрунту повинні забезпечувати точність не менше 10 % [112].

Першими методами дослідження характеристик ґрунтів були методи руйнівної дії, які передбачають відбір зразків із шурфів та бурових свердловин [22, 111]. Відібрані зразки непорушеної структури досліджували на вміст вологості за допомогою прямих методів.

Найбільш розповсюдженим серед прямих методів є термоваговий. Визначення вологості ґрунту, під час застосуванні термовагового методу, базується на висушуванні і зважуванні відібраного зразка ґрунту до і після висушування [108].

Таблиця 1.2 – Класифікація методів визначення волості ґрунтів

Метод		Вимірювальний параметр	Характеристика методу			
група	принцип		за вимірювальним параметром	за характером дії на конструкцію	за характером мобільності дослідження	безперервність вимірювання
Механічні	термоваговий	маса, об'єм	прямі	руйнівні	стаціонарний	-
Тензометричні	гігроскопічний	поровий тиск	непрямі	неруйнівні	стаціонарний	-
Оптичні	інфрачервоний фотометричний	довжина хвилі або амплітуда, або поглинання	непрямі	руйнівні	польовий	+
Радіоізотопні	нейтронний	інтенсивність гамма-випромін., сповільнення нейронів	непрямі	неруйнівні	польовий	-
Електричні	електрична розвідка	електричний опір	непрямі	неруйнівні	польовий	-
Електромагнітні	ємнісний (вологомір)	діелектрична проникність	непрямі	неруйнівні	польовий	-
	георадіо-локаційний (георадар)	діелектрична проникність	непрямі	неруйнівні	польовий	+

Цей метод являється високоточним, тому він використовується для метрологічного забезпечення і калібрування нових типів вологомірів. Головним недоліком даного методу є використання його лише в лабораторних умовах у зв'язку з висушуванням ґрунту при температурі 105°C, що потребує тривалий період для дослідження (приблизно 4 – 8 год).

В 50-х роках ХХ сторіччя вологість почали визначати за значеннями змінення порового тиску для ґрунтів [113], у яких вже була відома залежність між всмоктуванням датчика із дрібнопористого скла і вологістю. Даний метод відноситься до групи тензометричних методів.

Поровий тиск обчислюється із залежності [113]:

$$U = \alpha P + S, \quad (1.4)$$

де P – зовнішній тиск від ваги земляного полотна і дорожнього одягу, МПа;

S – всмоктування, МПа.

Коефіцієнт α визначають із лабораторних досліджень. Він залежить від ступеню впливу прикладеного тиску на виміряне всмоктування ґрунту [114].

Проте простішими і більш розповсюдженими є методи визначення вологості за допомогою датчиків, що всмоктують воду із ґрунту, шляхом вимірювання електропровідності ґрунту, яка залежить від вологості.

До групи оптичних методів належить метод заснований на використанні інфрачервоних фотометричних вологомірів [115]. Основою згаданих методів є вимірювання довжини хвилі інфрачервоного випромінювання, що поглинається вологістю ґрунту або відбивається від поверхні ґрунту земляного полотна.

Характерними особливостями оптичних методів є висока чутливість, точність отримання значень вологості, непереривність отримання інформації та експрес оцінка. Обмеженість у використанні даного методу полягає у тому, що представлений метод дозволяє отримати інформацію про вологість лише на поверхні ґрунту земляного полотна, тобто контролювати вологість можливо лише в процесі будівництва дорожнього одягу.

Під час застосування радіоізотопних методів контролю можна визначити щільність і масову долю вологості [116, 117]. До групи радіоізотопних методів відносяться нейтронний [116–118], рентгенівський [119] і метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР) [118].

В дорожній практиці використовується нейтронний метод [116]. Він дозволяє визначити щільність ґрунту за зміненням інтенсивності гамма-випромінювання через середовище, а вологість за допомогою уповільнення швидких нейтронів вологістю в ґрунті з реєстрацією сповільнених нейтронів, щільність потоку яких зростає зі збільшенням вологості. Радіаційні методи не набули широкого застосування через шкідливий вплив гамма-випромінювання на навколишнє середовище і здоров'я людини, що потребує використання захисту від біологічної дії випромінювання [120].

До групи електричних методів відноситься електрична розвідка. Суть методу полягає у вимірюванні різниці електричного опору в ґрунті [113]. Струм пропускається між двома електродами, що занурені в ґрунт. Падіння напруги визначають іншими двома електродами, що розташовані між ними за допомогою містка Уйтсона. Вологі ґрунти, а також ґрунти, в яких міститься значна кількість глинистих і пилуватих частинок мають порівняно менший опір, а сухі і піщані ґрунти – більший опір. Проте ці засоби не могли дати правильні значення, адже незначне змінення щільності, структури ґрунту і хімічного складу води значно впливало на результати.

Щоб запобігти цьому, почали застосовувати пористі датчики із органічного скла, нейлону [121], капронової тканини, вугілля, гіпсу із щільно закріпленими в них електродами.

Згадані вологоміри дозволяють визначити значення вологості ґрунтів з точністю від 2 % до 4 % [113].

Недоліком даного методу є потреба у калібруванні. Для кожного типу ґрунту і при різній вологості потрібно знати значення електричного опору.

Крім вологомірів, в яких змінюється електричний опір в залежності від вологості ґрунту, велике розповсюдження отримали ємнісні датчики [122], що

відносяться до групи електромагнітних методів. Фізичні передумови для використання електромагнітного методу під час визначення вологості ґрунтів засновані на тому, що діелектрична проникність води ($\epsilon=81$) в рази більша за діелектричну проникність сухого ґрунту ($\epsilon=3 - 12$). При цьому на значення діелектричної проникності в значній мірі не впливають хімічний склад води і концентрація розчинених у ній електролітів.

Під час застосування цього методу спочатку вимірюють діелектричну проникність і кут діелектричних втрат електронного конденсатору і на основі цих вимірювань знаходять дійсну діелектричну проникність [113]. Даний метод дозволяє визначити вагову і об'ємну вологість з точністю до 0,1 %.

Згадані вище методи (таблиця 1.2), крім георадіолокаційного та оптичного, дозволяють визначати вологість ґрунтів лише у контрольних точках, що не дає повної картини про варіювання вологості в повздовжньому і поперечному напрямках. Це є головним недоліком проаналізованих методів для визначення вологості, адже вологість може значно змінюватися навіть на невеликій за довжиною ділянці автомобільної дороги.

Про це свідчать також обстеження автомобільних доріг, що виконані у різні роки із застосуванням георадарних технологій О.М. Куліжниковим [123], А.А. Білозеровим [123], А.Г. Батраковою [124] (рисунок 1.2).

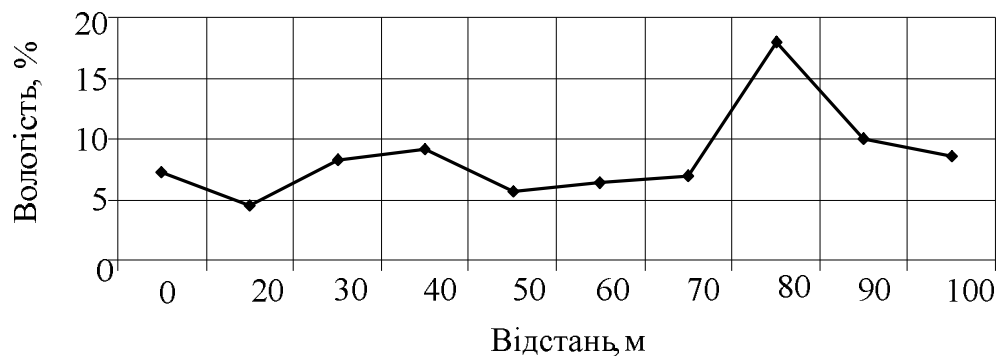


Рисунок 1.2 – Змінення вологості ґрунтів земляного полотна встановлена за результатами георадарних обстежень [124]

Помилки у визначенні вологості ґрунтів земляного полотна призводить до зниження надійності проектних рішень, невідповідності конструкції дорожнього одягу ґрунтово-гідрологічним умовам, занижуючи чи перевищуючи коефіцієнт запасу міцності за опором зсуву в ґрунтах земляного полотна.

Серед перелічених методів найбільший потенціал для визначення вологості ґрунтів земляного полотна мають електромагнітні методи до яких відноситься неруйнівний георадіолокаційний метод (георадіолокація) [125]. Як експрес-метод, він дозволяє отримувати інформацію про електрофізичні параметри ґрунтів швидко і в неперервному режимі [126], не порушуючи цілісності дорожнього одягу.

Розвитком та застосуванням цього методу у дорожньому та цивільному будівництві в останній час широко займаються, як в ближньому [127–130], так і в далекому зарубіжжі [131–135]. Значний внесок у розвиток георадарних технологій під час обстеження ґрунтів земляного полотна і конструкції дорожніх одягів зроблений А.Г. Батраковою [124, 136, 137], А.А. Білозеровим [123, 138], О.М. Куліжниковим [123, 138–140], М.О. Лушніковим [141, 142], І.В. Макеечевою [143], А.Р. Annan [144–146], J.L. Davis [144–146], G.C. Torp [131], T. Saarenketo [147–149], T. Scullion [149].

Провідними вітчизняними та закордонними фірмами по розробці георадарів і програмного забезпечення для інтерпретації даних є IPE ім. О.Я. Усікова НАН України, GSSI New Gemption (США), Sensor and Software Inc. (Канада), Era Technology (Великобританія), Mala (Швеція), Radar Systems (Латвія), OYO corporation (Японія) і Geozondas (Литва).

Наприкінці 90-х років XX сторіччя на початку XXI сторіччя в дорожній галузі спочатку в країнах ближнього зарубіжжя, а пізніше й в Україні почалося застосування георадарних технологій при діагностиці автомобільних доріг. Це стало поштовхом до узагальнення результатів георадарних досліджень, отримання досвіду застосування георадарів, розроблення технологічних документів в дорожній галузі із застосування георадарів під час вирішення різноманітних задач діагностики автомобільних доріг [150–153].

Під час георадарного обстеження автомобільних доріг рекомендується паралельно виконувати роботи по діагностиці і оцінюванні міцності, які представлені в технологічних документах [152, 154]. Однак існують обмеження щодо використання георадарних технологій, що пов'язано із недостатньою кількістю накопичених даних про електрофізичні параметри ґрунтів, зв'язок електрофізичних параметрів ґрунтів земляного полотна та матеріалів шарів конструкції дорожнього одягу з фізичними параметрами (вологість, щільність). Даний факт викликає складнощі під час інтерпретації даних георадарного зондування дорожнього одягу і ґрунтів земляного полотна. У сучасній практиці застосування георадарних технологій прийнято, в процесі зондування дорожнього одягу виконувати відбір кернів для отримання даних про тип та вологість ґрунту стандартними методами [137, 150], щоб здійснити відповідне калібрування переважно в тих місцях, де виникає ускладнення під час інтерпретації даних. Це дозволяє зменшити похибку у визначенні вологості під час інтерпретації даних. Контрольне буріння можна виконувати до зондування, в процесі і після зондування [150].

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що залучення георадарних технологій в діагностику автомобільних доріг під час визначення вологості ґрунтів земляного полотна обмежується недосконалістю математичних моделей, що пов'язують фізичні й електрофізичні параметри ґрунтів. Тому подальші дослідження повинні бути спрямовані на встановлення зв'язку між електрофізичними та фізичними параметрами, а також між електрофізичними та міцнісними і деформаційними параметрами ґрунтів земляного полотна.

Потребують розроблення алгоритми визначення вологості ґрунтів земляного полотна та обґрунтування міцнісних і деформаційних параметрів ґрунтів, що використовують дані георадарного зондування.

1.5 Застосування георадарів щодо визначення фізичних параметрів ґрунтів земляного полотна

1.5.1 Методи оцінювання вологості ґрунтів, що засновані на визначенні діелектричної проникності георадаром

Значний внесок у розвиток інженерних задач методів георадіолокації внесли такі вчені: А.Г. Батракова [124], Є.Ф. Богатирьов [155], М.Л. Владов [156–159], Л.Б. Волкомірська [159, 160], Д.А. Гензе [161], В.В. Глазунов [162, 163], Н.М. Єфімова [164], В.П. Золотарьов [165], О.Ю. Калашніков [158], А.В. Калінін [157], В.В. Капустін [166, 167], В.В. Копейкін [168, 169], О.М. Куліжніков [159], С.П. Луцянов [170], А.В. Морозов [171], В.В. Помозов [159, 172], Г.П. Почанін [159], М.П. Семейкін [172], А.В. Старовойтов [156–159], М.С. Судакова [173], М.І. Фінкельштейн [165, 174, 175], З.Б. Хакієв [176, 177], В.А. Явна [171, 178], М. Jol Harry [179], С. Maierhofer [180], R.R. Mardeni [181], T. Saarenketo [147–149] та інші.

Основними величинами, які вимірюються під час георадарних дослідженнях, є час проходження електромагнітної хвилі від джерела до границі середовищ (або об'єкту) і назад до приймальної антени георадару, а також амплітуда цього імпульсу. Найбільш важливими параметрами середовищ, що характеризують поширення електромагнітних хвиль в них, є швидкість поширення хвиль в середовищі і питоме загасання.

Швидкість поширення електромагнітної хвилі в різних матеріалах різна, тому, вимірюючи час проходження хвиль, і знаючи основні фізичні властивості матеріалу у досліджуваному середовищі, можна дізнатися про будову об'єкта. Швидкість поширення електромагнітних хвиль залежить від відносної діелектричної проникності і відносної магнітної проникності досліджуваного середовища, а також від частоти прикладеного поля і описується рівнянням [159]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\mu_{\text{відн.}} \cdot \epsilon_{\text{відн.}}}}, \quad (1.5)$$

де V – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі в середовищі, м/нс;

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

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

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

Проте для більшості середовищ, що зустрічаються на практиці, відносна магнітна проникність дорівнює одиниці ($\mu_{\text{відн.}}=1$), а впливом частоти можна знехтувати (враховуючи припущення про малі втрати у середовищі). Отже, отримаємо спрощену формулу для визначення швидкості поширення хвиль в середовищі [156]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1.6)$$

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

Питоме загасання в середовищі – це загасання електромагнітної хвилі на одиницю пройденого шляху. Для практичних розрахунків під час дослідження ґрунтового середовища питоме загасання електромагнітної хвилі визначається за формулою [156]:

$$A = 1637 / (\rho_{\omega} \cdot \sqrt{\epsilon'}), \quad (1.7)$$

де A – питоме загасання, дБ/м;

ρ_{ω} – питомий опір для центральної частоти спектру випромінювального імпульсу, Ом/м.

Питоме загасання суттєво впливає на глибину дослідження середовища і залежить від частоти електромагнітної хвилі. Тому для різних завдань дослідження необхідно використовувати хвилі потрібної частоти.

Серед методів оцінювання ступеню зволоження шарів дорожніх конструкцій, заснованих на визначенні діелектричної проникності з наступним перерахунком її розподілу в розподіл вологості можна виділити кілька груп.

Методи першої групи ґрунтуються на аналізі так званих поверхневих хвиль. Під час вирішення завдань геофондування такі хвилі прийнято називати «ґрунтовими хвилями». Сенс технологій такого типу полягає в аналізі сигналів, що поширюються уздовж поверхні дороги (рис. 1.3) [182]. Зокрема, в [148] використаний аналіз амплітуд сигналів для якісного оцінювання інфільтрації солоної води крізь покриття автобану. Автори [134] використовували амплітудні дані для кількісного оцінювання вмісту води в проміжних шарах конструкції дорожнього одягу в лабораторних умовах.

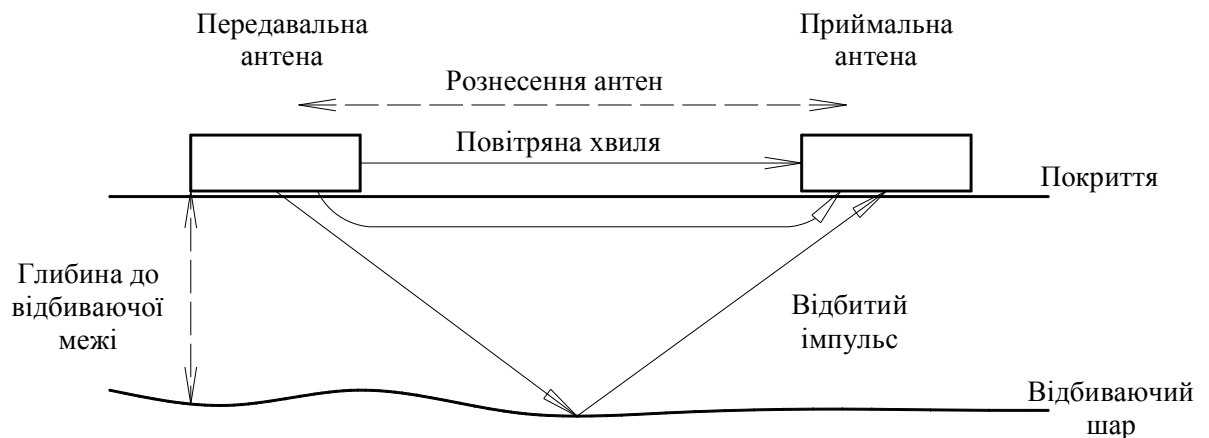


Рисунок 1.3 – Схема розташування антен радару і проходження ґрунтових, повітряних і відбитих хвиль

Методи другої групи ґрунтуються на аналізі хвиль, що пройшли через досліджувану структуру. При цьому використовують моностатичні (приймально-передавальні) антени (рис. 1.4).

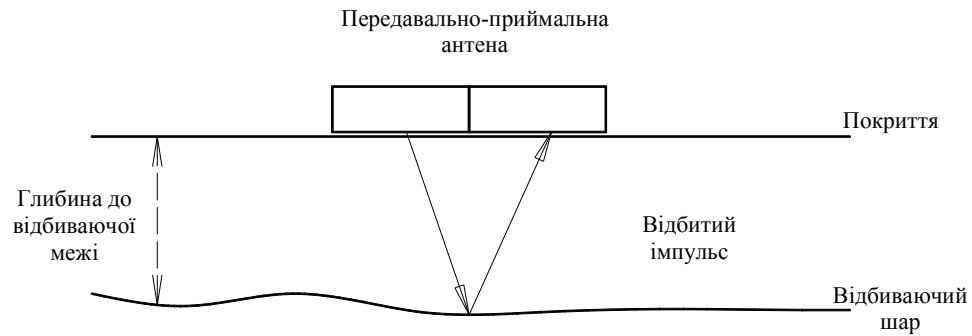


Рисунок 1.4 – Схема розташування антен радару і проходження ґрунтових, повітряних і відбитих хвиль

До цього часу розроблені методики обробки георадарних даних з метою побудови розподілу діелектричної проникності по глибині досліджуваної структури [166], засновані на обробці годографа дифрагованої хвилі. Дифрагована хвиля на радарограмі відображається у вигляді годографа, описуваного рівнянням [156]:

$$t(x) = \frac{2 \times L}{V} = \frac{2 \times \sqrt{x^2 + h^2}}{V}, \quad (1.8)$$

де L – шлях, пройдений хвилею, см;

V – швидкість поширення, см / нс;

h – глибина залягання об'єкта, см;

t – час проходження хвилі до об'єкта.

Однак такі методики можуть застосовуватися лише за умови наявності безлічі точкових локалізованих включень, що робить їх непридатними для обстеження дорожніх одягів.

Ранні роботи, присвячені проблемі визначення вологості [183, 184] припускали першочергове вимірювання швидкості поширення сигналу (електромагнітної хвилі) в середовищі і подальше використання відомої формули [146, 184], яка зв'язує швидкість сигналу із значенням діелектричної проникності:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}; \Rightarrow \varepsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2, \quad (1.9)$$

де c – швидкість світла у вільному просторі, м/нс.

У свою чергу, вимірювання швидкості передбачало вимірювання часу проходження сигналу через ділянку матеріалу відомої довжини (товщини). Такі методики припускають або переміщення вимірюваного зразка в металевий хвилевід з відомими параметрами (розмірами), або ж отримання інформації про геометричні розміри досліджуваної області (товщини шару) за допомогою додаткових заходів (відбору кернів, вирубок).

Для оцінювання електрофізичних параметрів матеріалів використовувався також і аналіз амплітуди сигналів, які пройшли крізь досліджуване середовище. Методи, засновані на використанні поверхневих (ground-coupled) хвиль, припускають обробку інформації про амплітуду сигналу, яка в свою чергу, є функцією потужності сигналу, що пройшов уздовж поверхні дороги між двома антенами, коефіцієнта зв'язку між антенами, властивостей матеріалу покриття і внутрішніх меж. Для отримання кількісних оцінок параметрів шарів конструкції в рамках такої методики вводять в розгляд коефіцієнти ослаблення (α) і проходження (β) [185]:

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon'}{2}} \cdot \sqrt{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right)}, \quad (1.10)$$

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon'}{2}} \cdot \sqrt{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right)}, \quad (1.11)$$

де $\omega = (2 \cdot \pi \cdot f)$ – кутова частота;

f – циклічна частота (в Гц), тобто частота сигналу;

ε' і ε'' – дійсна і уявна частини діелектричної проникності;

μ – магнітна проникність (практично для всіх матеріалів, що зустрічаються в будівництві вона $\mu \equiv 1$).

Якщо з експериментальних вимірювань визначена постійна ослаблення α , то за допомогою формули:

$$A_2 = A_1 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (1.12)$$

можна визначити зменшення амплітуди сигналу по глибині.

Очевидно, що амплітуда зменшується з ростом відстані між антенами і збільшенням поглинання в матеріалі конструкції. Тому сигнал може стати настільки слабким, що його важко буде зареєструвати, навіть для дуже невеликих відстаней (трас) в середовищах з великим поглинанням. Це створює серйозні труднощі для отримання достовірних даних і їх надійної інтерпретації. Траплялися також спроби використання спрощених формул, що пов'язують діелектричну проникність з провідністю (σ) і поглинанням (α), наприклад [146, 183]:

$$\sqrt{\varepsilon} \approx \frac{1.69 \cdot 10^3 \cdot \sigma}{\alpha}. \quad (1.13)$$

Однак, ця і подібні формули зважаючи на їх наближений характер виявилися притаманні лише для обмеженого числа конструкцій і матеріалів. Крім того, електропровідність матеріалів дорожніх конструкцій найчастіше невідома. Все це значно обмежує можливості застосування поверхневих хвиль під час обстежень дорожніх одягів.

Більш кращим в зв'язку з цим виглядає використання інформації, що міститься у відбитих від внутрішніх шарів конструкції сигналах за так званого однопозиційного зондування (за допомогою приймально-передавального антенного блоку). Амплітуди надширокосмугових (НДС) імпульсних сигналів,

відбитих як від внутрішніх границь шарів, так і від інших неоднорідностей, несуть достатню кількість інформації для визначення електрофізичних параметрів шарів дорожнього одягу. Завдання обробки і інтерпретації одержуваних даних, які під час цього виникають, можуть бути вирішені різними методами [186].

Запропоновано також і інші алгоритми оцінювання вмісту вологи в нижніх шарах конструкції, наприклад, за допомогою комбінованого зондування. Його сенс у тому, що, як вважають автори роботи [178], за допомогою однопозиційного зондування можливе визначення тільки діелектричної проникності верхнього шару покриття. Для оцінювання вмісту вологи в нижніх шарах вони використовували метод двохпозиційного зондування, де відстань між прийомною і передавальною антенами становила 17 см для блоку з центральною частотою 900 МГц і 7,5 см для блоку з частотою 1200 МГц. В основу методики визначення вологості при цьому було покладено ідею перерахунку амплітуди сигналів, що пройшли різні відстані крізь шари конструкції. Відповідно, для отримання вихідних даних потрібно розміщувати антени на певній відстані поблизу поверхні покриття та строго дотримуватися їх взаємної орієнтації, адаптованої до цієї відстані, що було досягнуто переміщенням георадарів на спеціальних траверсах. Це ускладнює створення систем діагностики на базі пересувних лабораторій з метою оперативного (на прийнятній швидкості руху) отримання первинних даних і їх обробки в режимі реального часу.

Ще одним відомим методом відновлення діелектричної проникності є метод, що полягає в аналізі поля із сукупності спостережених даних [168]. Це завдання може бути частково вирішене за допомогою стандартних засобів обробки – частотної і просторової фільтрації [188].

Алгоритм побудови розрізу діелектричної проникності складається з:

- а) виділення на радарограммі точок, через які з високою ймовірністю можуть проходити фрагменти дифракційних годографів;
- б) визначення кінематичних і динамічних характеристик сигналів в межах

виділених точок (швидкість хвилі по нахилу фрагментів лінії годографа, центральну частоту і т.п.);

в) відбраковування точок за швидкісним критерієм $V_B < V < V_H$. Надалі залишені точки будуть служити в якості опорних під час побудови розрізу;

г) перерахунок швидкостей хвиль в ефективні значення дійсної частини комплексної відносної діелектричної проникності;

д) коригування значень по частотному атрибуту або групі атрибутів;

е) побудова розрізу діелектричної проникності середовища в тимчасовій області методом інтерполяції значень по опорних точках;

є) перерахунок тимчасової шкали розрізу в шкалу глибинну відповідно до значень;

и) збереження розрізу діелектричної проникності в графічний файл у вигляді ізоліній із заданим кроком значень і колірною схемою.

Алгоритм базується, в тому числі, й на використанні дифрагованих хвиль, що утворюються при наявності окремих неоднорідностей у матеріалі. Під час використання однорідних матеріалів, або матеріалів, що містять досить багато включень, використання цього алгоритму ускладнюється.

Таким чином, аналіз досвіду використання георадарів в дорожньому будівництві дозволяє зробити висновок про високий потенціал георадарних технологій в діагностиці земляного полотна і конструкції дорожнього одягу. Застосування георадарів під час вирішення задач обґрунтування розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна стримується недосконалістю алгоритмів оброблення георадарних даних. Основу цих алгоритмів повинні скласти дослідження електрофізичних властивостей ґрунту.

Дисертаційне дослідження орієнтоване на застосування моностатичної приймально-передавальної антени георадарного комплексу «ОДЯГ-1», можливість застосування якого для вирішення завдань товщинометрії і оцінюванні фізичних параметрів матеріалів конструкції дорожнього одягу детально описана в роботі [189].

1.5.2 Моделі діелектричних властивостей ґрунту

Діелектричні властивості ґрунтів визначаються діелектричними властивостями компонент, що входять до його складу: мінеральної частини скелета ґрунту, води і повітря. Дійсні частини діелектричної проникності трьох фаз ґрунту суттєво різняться, маючи значення: для повітря – 1; для мінеральної частини скелета ґрунту – 3 – 4; для води – 81. Ці відмінності зумовлюють можливість вимірювання вологості ґрунтів.

Для обґрунтування моделі діелектричних властивостей ґрунтів, розглянемо діелектричні властивості компонент ґрунту, як трифазної системи.

Згідно з аналізом, проведеним в роботі проф. Д.А. Боярським [190], дійсна частина діелектричної проникності таких мінералів як кварц, польові шпати, монтморилоніт, каолініт і т. д. в діапазоні частот 1 – 50 ГГц має величину $\sim 3,6$ [191–193], а уявна частина в цьому ж діапазоні $\sim 0,05 - 0,25$ [193, 194]. При більш високих частотах (~ 500 ГГц) дійсна частина діелектричної проникності цих мінералів становить $\sim 2,5 - 5$, а уявна частина зменшується до значень $\sim 0,001$ [195].

Через значні експериментальні труднощі діелектричні властивості зв'язаної води досліджені недостатньо [196, 197]. Більшість дослідників дійшли до висновку, що ці властивості визначаються властивостями поверхні, з якою взаємодіє вода, і ступенем зв'язку води з цією поверхнею [195, 198]. Наявні дані про величину діелектричної проникності зв'язаної води, для позитивних температур, носять суперечливий характер. Проф. Корольов В.А. відзначає [199] аномальну властивість зв'язаної води – зниження її діелектричної проникності в кілька разів у порівнянні з вільною водою. Якщо для звичайної води діелектрична проникність дорівнює 81, то для зв'язаної води ця величина зменшується до 3 – 40, в залежності від товщини водяної плівки. За останніми даними, прошарки зв'язаної води завтовшки 0,5 – 0,6 нм мають діелектричну проникність, що дорівнює 3 – 4. Дійсна і уявна частини діелектричної проникності вільної води в діапазоні частот від 1 ГГц до 40 ГГц мають

виражену частотну і температурну залежність. Дійсна частина на частоті 1 ГГц змінюється від ~ 87 при 0°C до ~ 80 при 20°C і на частоті 40 ГГц від ~ 9 при 0°C до ~ 16 при 20°C [190, 200, 201]. Уявна частина змінюється при 0°C від ~ 9 (1 ГГц) до ~ 17 (40 ГГц).

Для правильної організації збору експериментальних даних і їх успішної та точної інтерпретації необхідно враховувати, що поняття діелектричної проникності має сенс тільки для монохроматичних сигналів і що значення діелектричної проникності залежить від частоти [202]. Найбільш сильно ці ефекти проявляються для вологих ґрунтів.

Для дійсної та уявної частини комплексної діелектричної проникності вільної та зв'язаної води як функцій від частоти використовують співвідношення на основі моделі Дебая [203]:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau)^2}, \quad \varepsilon'' = 2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau)^2} + \frac{\sigma}{2\pi \cdot \varepsilon_r \cdot f}, \quad (1.14)$$

де ε' , ε'' – дійсна і уявна частини комплексної діелектричної проникності;

ε_0 , ε_∞ – статична і високочастотна межа;

f – частота, Гц;

τ – час релаксації, с;

$\varepsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – діелектрична проникність вільного простору, Ф/м;

σ – провідність, сим/м.

Наявність дисперсії (залежно від частоти) призводить до так званого дисперсного розпливання сигналу, тобто зміни його форми – поширення. Цей факт необхідно враховувати під час розробки алгоритму визначення вологості ґрунтів земляного полотна. Однак, оскільки дорожній одяг над ґрунтом земляного полотна містить матеріали, які є композицією різних складових, то вирішити таке завдання аналітично, не маючи інформації про властивості кожної з компонент, не є можливим. Тому пропонується ввести в модель

коефіцієнт поправки, що враховує дисперсійні властивості матеріалів. В такому випадку діелектрична проникність буде визначатися як [129]:

$$\varepsilon = k_d \cdot \varepsilon_\omega, \quad (1.15)$$

де ε – значення діелектричної проникності, прийняте в розрахунках;

ε_ω – значення діелектричної проникності, яке визначене експериментально на частоті ω .

Залежності діелектричної проникності багатокomпонентних сумішей від діелектричної проникності компонент, а також від вмісту і розподілу компонент в суміші досить докладно вивчені теоретично, таблиця 1.3. У таблиці 1.3 прийнято такі позначення: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_i$ – діелектричні проникності компонент суміші; y_1, y_2, y_i – об'ємні концентрації відповідних компонент.

Авторами робіт [173, 204], а також автором дисертації були виконані розрахунки за вказаними моделями. В дослідженнях [204] приймалося, що дійсна частина діелектричної проникності в діапазоні надвисоких частот сухого ґрунту $\varepsilon_1=3$, а води – $\varepsilon=80$, уявну частину діелектричної проникності не враховували. Результати розрахунків наведено на рисунку 1.5. Експериментальні дані [205] позначені прямокутниками для піщаного ґрунту та трикутниками для суглинистого ґрунту (рис. 1.5). Цифрами позначені результати розрахунків за різними моделями.

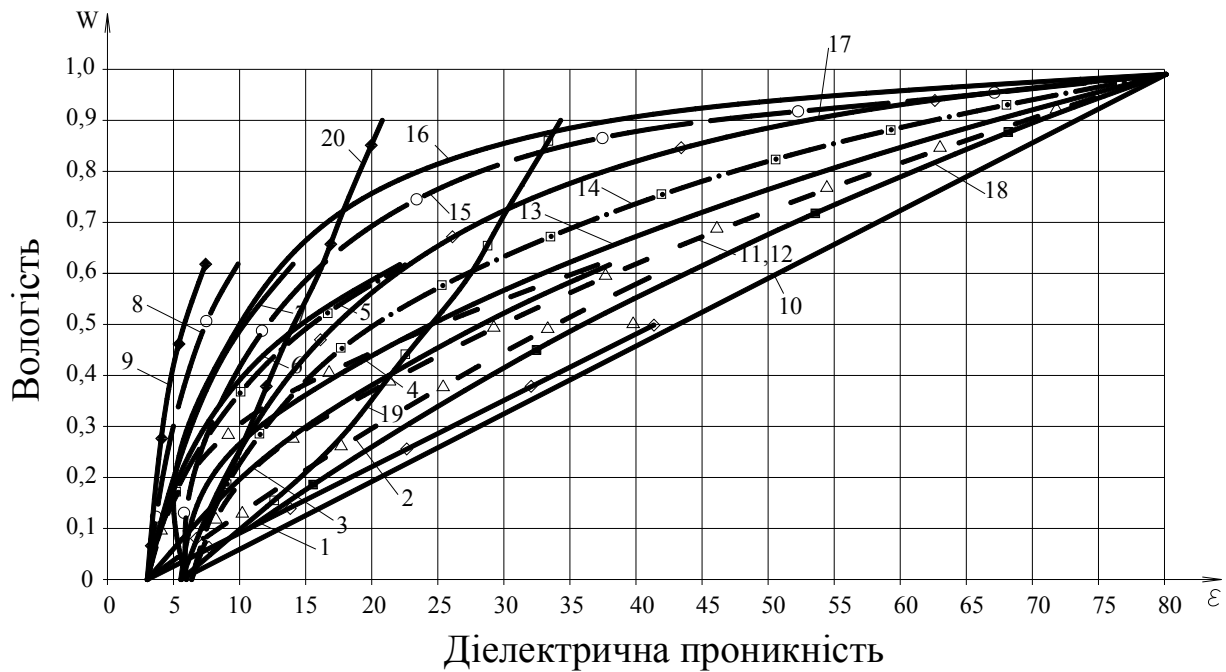
Як відзначають автори робіт [173, 204] жодна з формул не дає точного збігу з експериментальними даними. Найбільш узгоджується з експериментом для даних типів ДС моделі Дж. Бірчака та В.І. Оделевського. Формула Дж. Бірчака добре описує ґрунти з об'ємною вологістю менше за $0,3 \text{ см}^3/\text{см}^3$, а формула В.І. Оделевського – понад $0,3 \text{ см}^3/\text{см}^3$. До аналогічних висновків приходить А.М. Шутко [197].

Таблиця 1.3. – Теоретичні моделі оцінювання ε_{Σ} багатокомпонентних середовищ

Модель середовища	Рівняння, яке визначає ε_{Σ} ,	Автор
Однорозмірні сфери з ε_2 , розподілені в просторі. Між ними – компонент, що їх заповнює з ε_1 .	$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 2y_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2y_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} y_1$	М.А. Максвелл, 1892 [206]
Щільно упаковані сфери 2-х сортів з ε_2 . Між ними розташований компонент, що їх заповнює з ε_1 .	$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_{\Sigma} - \varepsilon_1}{3\varepsilon_{\Sigma}} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{\Sigma}} y_2$	К. Бетчер, 1952 [207]
Шари компонентів, розташовані уздовж ліній поля (паралельне з'єднання імпедансів).	$\varepsilon_{\Sigma} = \sum_i y_i \varepsilon_i$	В.В. Ржевский, Г.Я. Новик, 1978 [208]
Шари компонентів, розташовані поперек ліній поля (послідовне з'єднання імпедансів).	$\varepsilon_{\Sigma} = \sum_i \frac{y_i}{\varepsilon_i}$	В.В. Ржевский, Г.Я. Новик, 1978 [208]
Складові суміші розташовані в просторі хаотично. Незалежодіючі компоненти.	$\lg \varepsilon_{\Sigma} = \sum_i y_i \lg \varepsilon_i$	К. Ліхтенеккер, 1926 [209]
Невпорядкована суміш 2-х компонентів для невзаємодіючих компонентів.	$\varepsilon_{\Sigma} = a \sqrt{a^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}},$ $\text{де } a = \frac{(3y_1 - 1)\varepsilon_1 + (3y_2 - 1)\varepsilon_2}{4},$ $\varepsilon = \varepsilon_2 \left(1 + \frac{1 - W}{W / 3 + \varepsilon_2 / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \right)$	В.І. Оделевский, 1951 [210]
Невпорядкована суміш 2-х компонентів для невзаємодіючих компонентів.	$\frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon + 2\varepsilon_1} = W \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1}$	Л.В. Лоренц-Лоренц, 1909 [211]
Суміш 2-х компонентів.	$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_1 y_2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 + \frac{1 - y_2}{3} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}, \text{ м від 1 до 2}$	В.М. Дахнов, 1958 [207]

Кінець таблиці 1.3

Модель враховує розташування частинок дисперсійного середовища відносно напрямку електричного поля	$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + n} = (1 - W) \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 + n} + W \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2 + n}$	Вінер [211]
Модель Ландау	$\sqrt[3]{\varepsilon_e} = v_1 \sqrt[3]{\varepsilon_1} + v_2 \sqrt[3]{\varepsilon_2} + v_3 \sqrt[3]{\varepsilon_3} + \dots + v_N \sqrt[3]{\varepsilon_N}$	Ландау [211]
Модель Нельсона	$n_e = v_1 n_1 + v_2 n_2 + v_3 n_3 + \dots + v_N n_N$ $n_e = \sqrt{\varepsilon_e}$ – еквівалентний показник заломлення всього середовища $v_1, v_2, \dots, v_N$ – об'ємна частка кожної складової ($v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_N = 1$)	Нельсон [181]
Модель локально пористого середовища	$F(\tilde{\varepsilon}(\omega)) = \int \left\{ \frac{\varepsilon_C(\omega, \varphi) - \tilde{\varepsilon}(\omega)}{\varepsilon_C(\omega, \varphi) + 2\tilde{\varepsilon}(\omega)} \lambda(\varphi) \mu(\varphi) + \frac{\varepsilon_B(\omega, \varphi) - \tilde{\varepsilon}(\omega)}{\varepsilon_B(\omega, \varphi) + 2\tilde{\varepsilon}(\omega)} [1 - \lambda(\varphi)] \mu(\varphi) \right\} d\varphi = 0$	Hilfer R., 1991 [212]
Модель суміші кількох компонентів	$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_m \left[\left(1 + 2 \sum_{i=1}^n \frac{f_i \alpha_i}{4\pi r_i^3 \varepsilon_m} \right) / \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{f_i \alpha_i}{4\pi r_i^3 \varepsilon_m} \right) \right]$	Борен, 1986 [213]
Модель враховує форму дисперсних частинок за їх довільного розташування відносно поля	$\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}} = 1 - W, \quad \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = (1 - W) \frac{2\varepsilon_2 + \varepsilon}{2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}$	Бруггеман [214]



1 – формула Вінера (нижня межа), 2 – формула Оделевського, 3 – формула Бірчака, 4 – формула К. Боттчера, 5 – формула К. Ліхтенекера, 6 – формула Бруггемана, 7 – формула Максвелл-Гарнетта, 8 – формула Л.В. Лоренца-Лорентца, 9 – формула Вінера (верхня межа), 10, 16 – формула В.В. Ржевського і Г.Я. Новікова (шари розташовані відповідно паралельно і перпендикулярно до силовим ліній поля), 11, 12 – формула В.І. Оделевського і К. Боттчера, 13 – формула В.М. Дахновського ($m = 2$); 14 – формула К. Ліхтенекера, 15 – формула Л.В. Лоренца-Лорентца, 16 – формула Л.В. Лоренца-Лорентца, 17 – формула Оделевського, 18 – формула Нельсона, 19 – формула Ландау

Рисунок 1.5 – Зв'язок дійсної частини діелектричної проникності суміші з об'ємною часткою води

Провівши порівняльний аналіз більшості залежностей між діелектричною проникністю матеріалу та вмістом його компонент, автор [197] приходить до висновку, що всі формули (крім формул Ліхтенекера, Бруггеманахана і Брауна) зводяться до формул В.І. Оделевського для матричних сумішей, яка містить дві компоненти – діелектричну проникність сухого ґрунту і води.

Проте наведені математичні моделі оцінюють лише значення статичної діелектричної проникності середовище, що не є досить коректним, так як під час георадіолокації ми отримуємо значення комплексної діелектричної

проникності.

Теоретичні залежності, в яких розглядаються додаткові чинники, наприклад, глинистість і наявність зв'язаної води, досить обмежені. Це пов'язано з недостатньою вивченістю взаємодії між різними компонентами ґрунту [215]. Як зазначається в роботі [216] універсальна теорія СВЧ діелектричної проникності існує тільки для вологонасичених газів. З огляду на складність та багатокритеріальність, суворе рішення задачі розрахунку комплексної діелектричної проникності ґрунтів в надвисокочастотному діапазоні (СВЧ) не відомо. У зв'язку зі складністю теоретичних розрахунків зазвичай використовують дані лабораторних вимірювань, в яких визначають дійсну і уявну частини діелектричної проникності.

За результатами узагальнення наукових досліджень [173, 204] та дослідженнями автора дисертації було зроблено висновок, що з даними експериментальних досліджень діелектричних властивостей ґрунту задовільно збігаються результати розрахунків за моделлю Бірчака [217] і моделлю Шмугге [218]. Тому зазначені моделі можуть скласти основу узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунтів, що встановлює зв'язок між діелектричною проникністю ґрунту та його вологістю (п. 2.3.1).

1.6 Висновки за розділом. Мета і завдання дослідження

Узагальнюючи існуючі методи отримання інформації про фізичні, міцнісні і деформаційні параметри ґрунтів земляного полотна, а також їх розрахунок і прогнозування в річному циклі можна зробити наступні висновки:

1. Для забезпечення нормативного транспортно-експлуатаційного стану дорожніх одягів в умовах зростання інтенсивності, навантажень на вісь, збільшення багатоосьових транспортних засобів у складі потоку на автомобільних дорогах загального користування, а також в умовах недостатнього фінансування ремонтів та реконструкції автомобільних доріг необхідним є встановлення повної та достовірної інформації про розрахункові

параметри ґрунтів і матеріалів дорожнього одягу протягом його терміну експлуатації.

2. Розрахункові параметри ґрунтів земляного полотна, що містяться у сучасних нормативних документах, отримано за результатами узагальнення значного обсягу досліджень на обмеженій території, усереднено по дорожньо-кліматичних зонах для інших територій без детального врахування місцевих природних умов. Це призводить до помилок у розрахунках та зниження надійності прийнятих проектних рішень. Тому задача з визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна з урахуванням місцевих природно-кліматичних, ґрунтових, гідрологічних умов є надзвичайно актуальною для дорожньої галузі.

3. Вибіркове оцінювання параметрів ґрунтів земляного полотна, яке проводиться згідно з чинними нормативними документами, є обмеженим та має низьку достовірність. Помилки під час врахування типу та вологості ґрунту, пов'язаних з ними розрахункових параметрів ґрунту, що змінюються протягом життєвого циклу автомобільної дороги, призводять до зниження проектної надійності автомобільних доріг, і, як наслідок, надлишковим витратам на відновлення їх транспортно-експлуатаційних показників. Для запобігання помилок на стадії проектування та експлуатації, необхідно керуватися розрахунковими параметрами ґрунтів, що отримані за результатами польових та лабораторних досліджень у природних умовах району проектування.

4. Різноманіття ґрунтових, геологічних, гідрологічних, природно-кліматичних умов районів дослідження доводить, що експериментальні та теоретичні моделі з визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна, що розроблено на даний час, позбавлені такої властивості, як універсальність. Результати експериментальних досліджень істотно залежать від методів і способів оброблення отриманої інформації про розрахункові параметри ґрунтів, а використання переважної більшості моделей потребує апріорної інформації про тип та вологість ґрунту земляного полотна під конструкцією дорожнього одягу, яка може змінюватися навіть на незначних за

довжиною ділянках автомобільних доріг. Тому необхідно запропонувати ефективні моделі з визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна, що ґрунтуються на сучасних методах і технічних засобах діагностики автомобільних доріг.

5. Існуючі методи щодо визначення вологості ґрунтів земляного полотна мають певні недоліки, які пов'язані із руйнуванням існуючого дорожнього одягу, низькою продуктивністю та вимірюють вологість в окремих точках, що призводить до некоректного оцінювання фізичних параметрів ґрунтів. Найбільший потенціал для вирішення задачі визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна мають електромагнітні методи, які реалізовані у георадарах.

6. Залучення георадарних технологій в діагностику автомобільних доріг для вирішення задачі визначення розрахункової вологості та пов'язаних з нею міцнісних і деформаційних параметрів ґрунтів земляного полотна обмежується недосконалістю математичних моделей, що пов'язують фізичні та електрофізичні параметри ґрунтів. Тому подальші дослідження повинні бути спрямовані на встановлення зв'язку між електрофізичними параметрами та вологістю, щільністю ґрунтів земляного полотна, їх міцнісними і деформаційними параметрами. Потребують розроблення алгоритми визначення вологості ґрунтів земляного полотна та пов'язаних з нею міцнісних і деформаційних параметрів ґрунтів, що використовують дані георадарного зондування.

7. З даними експериментальних досліджень діелектричних властивостей ґрунту задовільно збігаються результати розрахунків за моделлю Бірчака [217] і моделлю Шмугге [218]. Зазначені моделі є основою для удосконалення математичної моделі щодо встановлення діелектричної проникності ґрунтів з урахуванням різних розрахункових станів ґрунту

Ґрунтуючись на викладеному, **метою дисертаційного дослідження є розроблення експрес-методу оцінювання вологості та пов'язаних з нею розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна під час георадарної**

діагностики дорожнього одягу нежорсткого типу.

Для вирішення досягнення означеної мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. 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.
2. Теоретично обґрунтувати модель діелектричних властивостей ґрунту, що встановлює зв'язок між електрофізичними параметрами ґрунту та його вологістю.
3. Експериментально дослідити закономірності змінення електрофізичних параметрів ґрунту від його вологості, щільності, міцнісних та деформаційних параметрів.
4. Розробити алгоритм та експрес-метод оцінювання вологості ґрунту земляного полотна, міцнісних і деформаційних параметрів ґрунту за результатами георадарної діагностики дорожнього одягу.
5. 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.
6. Розробити практичну методику оцінювання вологості ґрунту земляного полотна, міцнісних і деформаційних параметрів ґрунту за результатами георадарної діагностики дорожнього одягу нежорсткого типу.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТА РОЗРАХУНКОВИХ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ

2.1 Постановка задач оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування

На даний час існує ефективний інструмент одержання інформації про внутрішню будову конструкції дорожнього одягу та її параметри – георадар. Він дозволяє здійснювати, при відносно невеликих витратах, безперервний лінійний моніторинг стану шарів покриття, основи й ґрунтів. Тому основною метою даного розділу є об'єднання можливостей емпіричного [116] та механічного [116] підходів у рамках єдиного теоретико-експериментального методу оцінювання вологості та пов'язаних з нею розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування. Георадарне зондування [189], що проводиться з метою визначення вологості ґрунтів під конструкцією дорожнього одягу та пов'язаних з нею розрахункових параметрів ґрунтів, ґрунтується на рішенні основоположних задач:

а) розроблення електрофізичної моделі досліджуваного середовища (ґрунту земляного полотна під конструкцією дорожнього одягу);

б) обґрунтування моделі оцінювання вологості ґрунтів та фізичних параметрів ґрунту земляного полотна;

в) отримання часового розподілу сигналів георадару за результатами зйомки комплексом підповерхневого зондування. Під час виконання дисертаційного дослідження був застосований апаратний вимірювальний комплекс для георадарного дослідження дорожнього одягу «ОДЯГ-1», розроблений в ХНАДУ за безпосередньою участю автора дослідження;

г) оцінюванні електрофізичних і геометричних параметрів досліджуваних

об'єктів (дорожнього одягу і ґрунту земляного полотна) шляхом перерахунку швидкості поширення електромагнітних хвиль в значення діелектричної проникності;

д) розроблення алгоритмів з визначення вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування. У дисертаційному дослідженні застосовувалася програма візуалізації і інтерпретації одержуваних даних «Geovisuy». Основу інтерпретації результатів зондування становить алгоритм оцінювання вологості ґрунтів, що розроблений автором дисертації.

Вирішення перерахованих завдань дозволяє розробити алгоритм оцінювання вологості ґрунту земляного полотна, обґрунтувати розрахункові параметрів ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування, що, в свою чергу, дозволяє забезпечити точність розрахунку конструкції дорожнього одягу, розвиває і вдосконалює існуючі методи діагностики стану дорожнього одягу нежорсткого типу. Вирішенню розглянутих вище завдань присвячений другий розділ дисертаційного дослідження.

2.2 Модель взаємодії електромагнітних хвиль з дорожнім одягом і ґрунтами земляного полотна

Для вирішення задачі моделювання і інтерпретації результатів георадарного зондування будемо використовувати основне хвильове рівняння [202]:

$$\Delta \mathbf{E} + \text{grad} \left(\mathbf{E} \frac{\text{grad}(\varepsilon)}{\varepsilon} \right) - \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{E} - \frac{4\pi}{c^2} \sigma \frac{d}{dt} \mathbf{E} = 0, \quad (2.1)$$

де $E(x, y, z | t)$ – напруженість електричного поля;

ε, μ – відносні діелектрична і магнітна проникність;

σ – провідність, См/м;

c – швидкість поширення світла у вакуумі, см/нс.

Для більшості середовищ, які зустрічаються під час підповерхневого зондування, магнітна проникність $\mu \equiv 1$.

У (2.1) другий доданок відповідає за можливу просторову неоднорідність по глибині розподілу діелектричної проникності, що може бути пов'язано з безперервною зміною щільності (пористості) матеріалу. Останній доданок враховує можливу безперервну зміну провідності, пов'язану, наприклад, зі зміною вологості матеріалу по глибині.

У дисертаційному дослідженні зондування виконувалося за допомогою моностатичного приймально-передавального антенного блоку, можливість застосування якого для вирішення завдань товщинометрії та оцінювання фізичних параметрів матеріалів конструкції дорожнього одягу детально описана в роботі [189]. У моностатичному антенному блоці напрямок зонduючого сигналу (хвильовий вектор) ортогональний до поверхні досліджуваної структури. У цьому випадку (якщо напрямок поширення хвилі збігається з напрямком стратифікації (неоднорідності) середовища) другий доданок у (2.1) дорівнює нулю за рахунок ортогональності векторів E і $\text{grad}(\varepsilon)$ і рівняння приймає більш простий вигляд (для гармонійної залежності від часу):

$$\Delta \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \mu \vec{E} + i \frac{4\pi\omega}{c^2} \sigma \vec{E} = 0; \quad (\mu \equiv 1). \quad (2.2)$$

або

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0; \quad k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon + i \frac{4\pi\omega}{c^2} \sigma. \quad (2.3)$$

де k – хвильове число;

$$i = \sqrt{-1};$$

ω – кутова частота, пов'язана з циклічною частотою f співвідношенням $\omega = 2\pi f$.

У такому випадку розглянемо поняття комплексної діелектричної

проникності, визначивши:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_c, \quad (2.4)$$

де діелектрична проникність (ε_c) визначається в загальному вигляді:

$$\varepsilon_c = \varepsilon' + i \varepsilon''; \varepsilon' = \varepsilon; \varepsilon'' = \frac{4\pi}{\omega} \sigma. \quad (2.5)$$

Діелектрична проникність (ε) характеризує як внутрішні властивості середовища (взаємодія частинок), так і результат впливу на середовище (матеріал) зовнішніх зарядів або струмів, зокрема, зондуючих імпульсів. У найпростішому статичному випадку (нерухомі заряди) діелектрична проникність показує, у скільки разів зменшиться кулонівська взаємодія зарядів, що не відчують зворотного впливу середовища, під час перенесення їх з вакууму в це середовище.

Як доводять результати досліджень багатьох авторів [149, 179, 189, 219–223], діелектрична проникність та провідність змінюються в досить широких межах залежно від виду та вологості ґрунту (табл. 2.1). Результати, що отримані різними авторами, досить різняться між собою (табл. 2.1), що пояснюється такою важливішою властивістю діелектричної проникності, як дисперсія – залежність від частоти зондуючого сигналу георадару та від способу вимірювань. Вказаний факт обмежує можливість використання табличних (довідкових) даних щодо діелектричної проникності ґрунтів, а при їх застосуванні може призвести до суттєвих помилок під час оцінювання вологості ґрунту.

З другого боку, чутливість діелектричної проникності до вологості ґрунту земляного полотна дозволяє використовувати величину діелектричної проникності під час інтерпретації результатів георадарного зондування з метою визначення вологості ґрунту земляного полотна.

Таблиця 2.1 – Електрофізичні параметри природних середовищ та ґрунтів [149, 179, 189, 219–223]

Середовище	Діелектрична проникність, ϵ	Провідність, σ , См/м
Повітря	1	0
Вода	81	0,001- 0,002
Лід	4 - 8 (3 - 4)	0,001
Сухий пісок	3-5	0,00002- 0,0001
Мокрий пісок	20-30	0,0001- 0,007
Суглинок	2,5 - 19	0,00011- 0,021
Глина	5 - 40 (4 - 16)	0,0002 – 0,05
Сухий кам'янистий ґрунт	7 - 9	0,002 – 0,01
Вологий кам'янистий ґрунт	9 - 12	0,01 – 0,02
Піщаний сухий ґрунт	4 - 5	0,001
Вологий або замерлий ґрунт	9 - 16	0,02
Сильно зволожений ґрунт	16 - 20	0,03
Пластичний і перезволожений ґрунт	28 - 40	0,1
Мул	5 -30	
Морена	9 - 25	

Оскільки в більшості сучасних георадарів просторові розміри антен і зондуючих імпульсів малі у порівнянні з радіусом кривизни поверхні дороги, а характерний масштаб нерівностей (шорсткості) поверхні істотно менший за кривизну хвильового фронту, в якості моделі дорожнього одягу приймаємо плоскошарувате середовище (рис. 2.1).

У розглянутій моделі плоскошаруватого середовища (рис. 2.1) кожен шар характеризується трьома параметрами – діелектричною проникністю (ϵ_c), провідністю матеріалу (σ) і його товщиною (h), яка для нижнього шару – ґрунту земляного полотна вважається нескінченною.

Діелектричну проникність ґрунту за даною моделлю будемо визначати на межі «шари дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна». Розподіл діелектричної проникності за глибиною не враховується.

Оскільки діелектрична проникність ґрунту функціонально пов'язана з його вологістю, то за результатами інтерпретації георадарних даних пропонується визначати вологість ґрунту земляного полотна на межі «шари

дорожнього одягу – грунт земляного полотна». Для оцінювання розподілу вологості ґрунту по глибині досліджуваної конструкції пропонується залучити моделі водно-теплого режиму роботи земляного полотна [87].

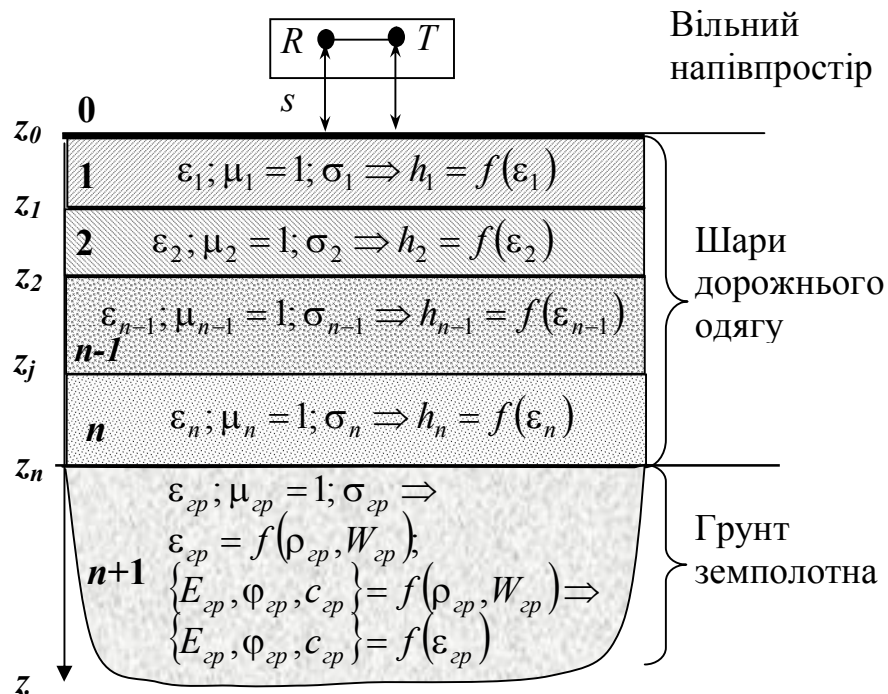


Рисунок 2.1 – Модель конструкції дорожнього одягу як плоскошаруватого середовища

2.3 Постановка задачі оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна за результатами електрофізичних вимірювань

Для оцінювання вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням моностатичної антенної системи пропонується:

а) використовувати рішення задач товщинометрії конструктивних шарів дорожнього одягу, що засноване на розрахунку коефіцієнтів відбиття і коефіцієнтів проходження електромагнітних хвиль через досліджувану конструкцію [189];

б) оцінити діелектричну проникність (ε) на межі «конструкція дорожнього одягу – грунт земляного полотна»;

в) оцінити вологість ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна», використовуючи зв'язок:

$$\varepsilon = f(W, \rho, \Gamma, B), \quad (2.6)$$

де W – об'ємна вологість ґрунту, %;

ρ – щільність ґрунту, кг/м^3 ;

Γ – гранулометричний склад ґрунту;

B – вид ґрунту (супісок, суглинок, глина).

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 апіорно відомими параметрами ґрунту, що не змінюються в процесі експлуатації, а саме, гранулометричний склад ґрунту (Γ) і вид ґрунту (B). Відзначимо також, що згідно з дослідженнями Н.Я. Хархути, Ю.М. Васильєва, І.А. Золотаря [59, 224, 225] доведено, що щільність ґрунту земляного полотна (ρ) з часом наближується до деякої величини – «побутової щільності», що відображує усі види впливів на ґрунт у процесі експлуатації та може вважатися постійною.

Результати численних досліджень, що відображені в роботах [124, 156, 183, 186, 189], дозволяють стверджувати, що рішення завдання оцінювання вологості за результатами електрофізичних вимірювань з достатньою точністю може бути отримано під час використання експериментально встановлених кореляційних залежностей [123, 156, 223], що відображають зв'язок вологості ґрунту з його діелектричною проникністю:

$$W = f(\varepsilon); \quad (2.7)$$

г) оцінити розподіл вологості ґрунту земляного полотна за глибиною (z) в залежності від типу місцевості за характером зволоження і водно-теплого режиму роботи земляного полотна під час обстеження, використовуючи [87].

2.3.1 Обґрунтування моделі ґрунту як багатокомпонентної системи

Згідно із основоположними уявленнями механіки ґрунтів, ґрунти є багатокомпонентними системами і складаються з [226]: твердих частинок; води в різних видах і станах (в тому числі льоду за нульової або від'ємної температури ґрунту); газів (в тому числі і повітря). З другого боку, шар ґрунту у насипі являє собою поліагрегатну систему, між агрегатами якої формуються міжагрегатні пори (макропори), які заповнені рідкою та газоподібною фазою [227].

Від співвідношення розглянутих фаз залежать фізичні, механічні та електрофізичні параметри ґрунтів, до яких в цьому дослідженні віднесені:

- а) об'ємна і вагова вологість;
- б) вологість на межі текучості;
- в) модуль пружності;
- г) коефіцієнт Пуассона;
- д) кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення частинок мінеральної частини ґрунту;
- е) граничний опір зсуву.

Властивості ґрунтів в значній мірі залежать від гранулометричного складу мінерального скелета ґрунту, а також від вмісту води і повітря.

Згідно із загальними уявленнями [228], будемо розрізняти в ґрунті фізично зв'язну або плівкову (характерна для пилювато-глинистих ґрунтів) і вільну воду. Плівкова вода в пилювато-глинистих ґрунтах в значній мірі визначає властивості ґрунту, які залежать в першу чергу від її відносного вмісту. Наявність між частинками глинистого ґрунту зв'язаної води визначає його пластичність. При цьому, чим товстіша плівка води, тим менша міцність ґрунту [228]. Вплив вільної води найістотніше позначається на міцності і деформаційних характеристиках ґрунтів, що призводить до зниження модуля пружності ґрунту, зменшення кута внутрішнього тертя і питомого зчеплення, рис. 2.2.

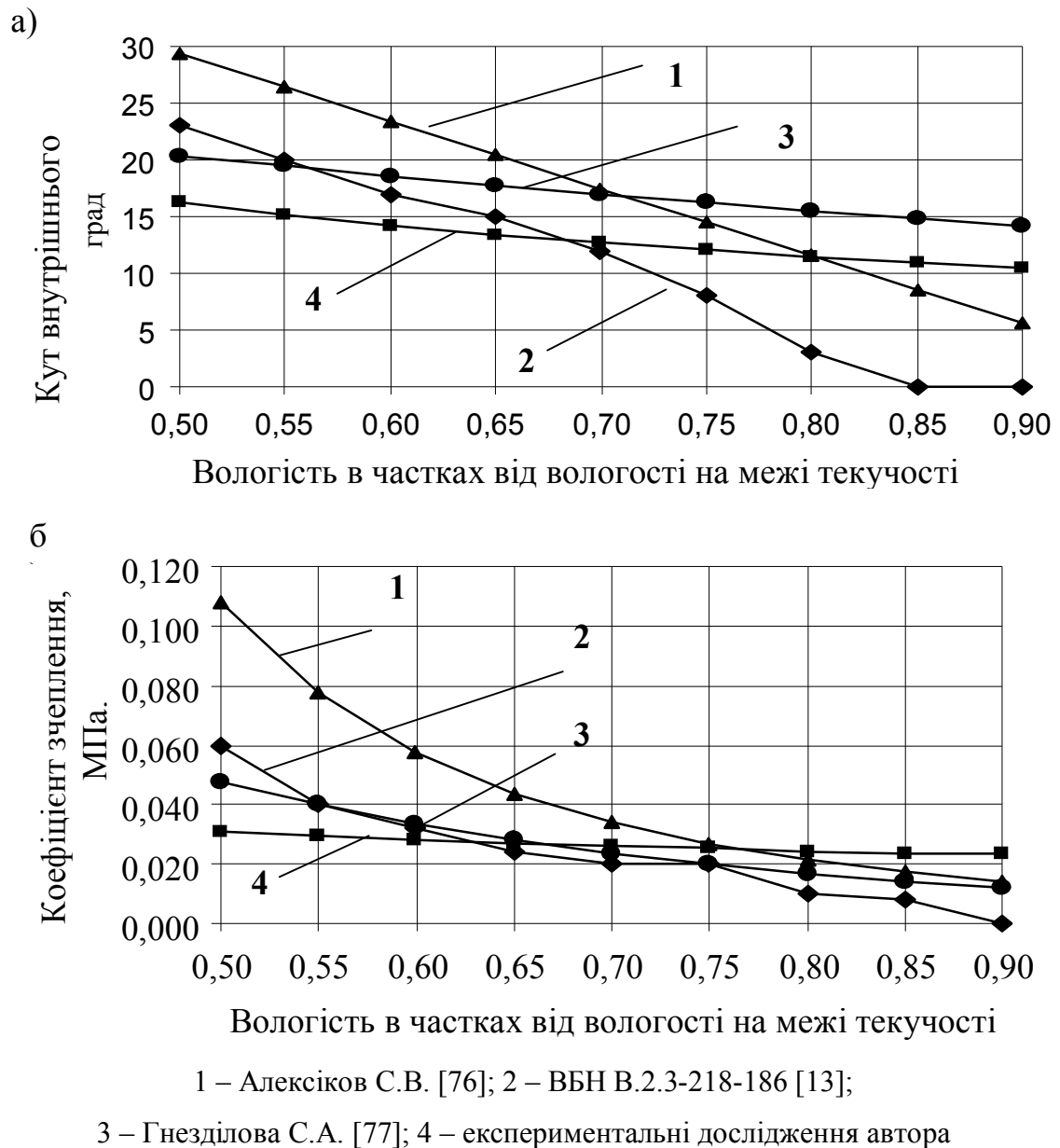


Рисунок 2.2 – Зв'язок кута внутрішнього тертя (а) і питомого зчеплення (б) з відносною вологістю ґрунту

В той же час, згідно з дослідженнями В.Д. Казарновського, питоме зчеплення ґрунту зростає зі збільшенням його щільності, досягаючи максимуму за максимальної щільності, тоді як кут внутрішнього тертя за постійної вологості фактично не залежить від щільності ґрунту [227].

Вміст води і газу в ґрунті залежить від об'єму його пор: чим більше пори заповнені водою, тим менше в них міститься газів. У верхніх шарах ґрунту газоподібна складова представлена атмосферним повітрям. У моделі ґрунту, що

прийнята у дослідженні, наявність газоподібної складової визначається щільністю ґрунту:

$$\rho = M / V = (m_1 + m_2) / (V_1 + V_2 + V_3) \quad (2.8)$$

де M – маса зразку ґрунту, г;

V – об'єм зразку ґрунту, см^3 ;

m_1 – маса мінеральних частинок ґрунту, г;

m_2 – маса вільної води у ґрунті, г;

V_1 – об'єм мінеральних частинок, см^3 ;

V_2 – об'єм вільної води, см^3 ;

V_3 – об'єм газоподібної складової, см^3 .

Гранулометричний склад мінеральної частини ґрунтів в дисертаційному дослідженні приймається відповідно до основних положень механіки ґрунтів [225, 228–230], досліджень проф. Н.А. Качинського [231], С.С. Морозова [232, 233], І.В. Попова [234]. Механізми, природа сил, що діють в зоні контактів частинок ґрунту і інші особливості контактів і контактних взаємодій описані в роботах П.О. Ребіндера [235], В.М. Соколова [236–238], В.І. Осипова [238, 239], Є.Д. Щукіна [240, 241], В.В. Ямінського [241] та ін. На ці уявлення спирався автор під час роботи над дисертаційним дослідженням.

Таким чином, в дисертаційному дослідженні фізична модель ґрунту для електрофізичних вимірювань являє собою чотирьох фазну систему, що складається з мінеральної фази сухого ґрунту, повітря, зв'язаної і вільної води.

2.3.2 Модель оцінювання діелектричної проникності ґрунтів

За результатами узагальнення наукових досліджень [173, 204] та досліджень автора дисертації (п. 1.5) було зроблено висновок, що з даними експериментальних досліджень діелектричних властивостей ґрунту задовільно збігаються результати розрахунків за моделлю Бірчака [217] і моделлю Шмугге [218]. Слід зазначити, що експериментальні дані, що підтверджують

адекватність моделей діелектричних властивостей ґрунтів, отримані шляхом вимірювання провідності зразків ґрунту в лабораторних умовах [239–244]. Питання про застосування даних моделей під час польових випробуваннях ґрунтів із застосуванням георадарів розглянуті в науковій літературі досить обмежено [161, 173, 245], тому зупинимося більш детально на зазначених моделях, об'єднавши їх можливості.

Модель Шмугге враховує наявність як вільної, так і зв'язаної води [246]. При цьому вважається, що перша з них має табличне значення діелектричної проникності (81), а друга має істотно менше значення, яке знаходиться в проміжку між значеннями діелектричної проникності льоду і води. Відповідно до цієї моделі, комплексна діелектрична проникність вологого ґрунту визначається за такими формулами [190, 205]:

– при виконанні умови: $W \leq W_t$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{zp} &= W \times \varepsilon_{3\theta} + (P-W) \times \varepsilon_a + (1-P) \times \varepsilon_m \\ \varepsilon_{3\theta} &= \varepsilon_l + (\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_l) \times \frac{W}{W_t} \times \gamma\end{aligned}\quad (2.9)$$

– при виконанні умови: $W > W_t$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{zp} &= W_t \times \varepsilon_{3\theta} + (W - W_t) \times \varepsilon_{\theta} + (P-W) \times \varepsilon_a + (1-P) \times \varepsilon_m, \\ \varepsilon_{3\theta} &= \varepsilon_l + (\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_l) \times \gamma\end{aligned}\quad (2.10)$$

де W – об'ємна вологість ґрунту, частки од.;

W_t – об'ємна перехідна вологість, частки од.;

$\varepsilon_{zp}, \varepsilon_{3\theta}, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_m, \varepsilon_a, \varepsilon_l$ – діелектрична проникність ґрунту, зв'язаної води, вільної води, мінеральної частини ґрунту, повітря і льоду відповідно;

P – пористість ґрунту, частки од.;

γ – параметр, що характеризує гранулометричний склад ґрунту.

Під перехідною вологістю ґрунту (W_t) розуміється граничне значення вологості, за якого в ґрунті присутня тільки зв'язана вода, яка утримується силами міжмолекулярної взаємодії.

Таким чином, рівняння (2.9) справедливе для ґрунтів, що не містять воду у вільному стані ($W \leq W_t$). Рівняння (2.10) може бути застосовано для ґрунтів, що містять вільну воду ($W > W_t$).

Перехідна вологість (W_t) і параметр (γ) визначаються [205]:

$$\begin{aligned} W_t &= 0,49 \times V + 0,165; \\ \gamma &= -0,57 \times V + 0,481, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де V – визначається з експериментально встановленого співвідношення:

$$V = 0,06774 - 0,00064 \times SAND + 0,00478 \times CLAY \quad (2.12)$$

де $SAND$, $CLAY$ – вагові частки гранулометричних фракцій ґрунту (піску і глини відповідно). При цьому до піщаної фракції автори роботи [205] відносять частки ґрунту діаметром $d_{SAND} > 0,005 \text{ см}$, до глинистої фракції – $d_{CLAY} < 0,0002 \text{ см}$.

Перевагою даної моделі є можливість врахування зв'язаної води, а також можливість врахування щільності і гранулометричного складу ґрунтів під час оцінювання діелектричної проникності ґрунту.

Як відзначають автори роботи [247], модель може бути використана в алгоритмах обробки даних радіолокаційного і радіометричного зондування ґрунтового покриву для ϵ' в діапазоні частот від 0,3 ГГц до 1,4 ГГц, для ґрунтів, вміст глинистої фракції в яких не перевищує 34 %.

З другого боку, модель Бірчака [217], так звана «рефракційна модель», для багатокомпонентних середовищ в загальному вигляді може бути представлена як:

$$\varepsilon^{\alpha} = \sum_{i=1}^4 V_i \times \varepsilon_i^{\alpha}, \quad (2.13)$$

де $\varepsilon, \varepsilon_i$ – діелектрична проникність середовища і i -ої компоненти середовища відповідно;

V_i – об'ємна частка i -ої компоненти середовища;

α – експериментально підібраний параметр, що приймається $\alpha=0,5$.

Записавши вираз (2.13) для ґрунтів, до складу яких входить: мінеральна частина ґрунту, вільна вода, зв'язана вода і повітря, отримаємо:

$$\varepsilon_{gp}^{\alpha} = V_m \times \varepsilon_m^{\alpha} + V_a \times \varepsilon_a^{\alpha} + V_{36} \times \varepsilon_{36}^{\alpha} + V_v \times \varepsilon_v^{\alpha}, \quad (2.14)$$

де V_m, V_a, V_{36}, V_v – об'ємна частка мінеральної частини ґрунту, повітря, зв'язаної і вільної води відповідно, частки од.

Виразимо об'ємні частки компонент ґрунту через пористість ґрунту, визначену як:

$$P = 1 - \frac{P_{cgp}}{P_m}, \quad (2.15)$$

де P – пористість ґрунту, частки од.;

P_{cgp}, P_m – щільність сухого ґрунту і частинок ґрунту відповідно, кг/м^3 .

Тоді

– об'ємна частка мінеральних частинок ґрунту:

$$V_m = 1 - P = \frac{P_{cgp}}{P_m}; \quad (2.16)$$

– об'ємна частка повітря:

$$V_a = P - V_{\epsilon} - V_{3\epsilon} = 1 - \frac{P_{csp}}{P_m} - V_{\epsilon} - V_{3\epsilon}. \quad (2.17)$$

– об'ємна частка зв'язаної води може бути прийнята рівною ваговій перехідній вологості:

$$V_{3\epsilon} = W_t, \quad (2.18)$$

– об'ємна частка вільної води визначається:

$$V_{\epsilon} = W - W_t. \quad (2.19)$$

В результаті підстановки (2.15-2.19) в (2.14) і виконання відповідних перетворень отримаємо:

– без урахування зв'язаної води:

$$\varepsilon_{csp}^{\alpha} = V_{\epsilon} \times \varepsilon_{\epsilon}^{\alpha} + (1 - P) \times \varepsilon_m^{\alpha} + (P - V_{\epsilon}) \times \varepsilon_a^{\alpha}; \quad (2.20)$$

– з урахуванням зв'язаної води:

а) для $W \leq W_t$ – вільна вода відсутня з (2.9) маємо:

$$\varepsilon_{csp}^{\alpha} = W \times \varepsilon_{3\epsilon}^{\alpha} + (P - W) \times \varepsilon_a^{\alpha} + (1 - P) \times \varepsilon_m^{\alpha}; \quad (2.21)$$

б) для $W > W_t$ – за наявності вільної води отримаємо з (2.17):

$$\varepsilon_{csp}^{\alpha} = W_t \times \varepsilon_{3\epsilon}^{\alpha} + (W - W_t) \times \varepsilon_{\epsilon}^{\alpha} + (P - W) \times \varepsilon_a^{\alpha} + (1 - P) \times \varepsilon_m^{\alpha} \quad (2.22)$$

Для можливості подальшого оцінювання зв'язку вологості і щільності ґрунту з діелектричною проникністю перетворимо рівняння (2.20-2.22) шляхом підстановки (2.15), приймаючи діелектричну проникність повітря рівною

одиниці ($\varepsilon^{\alpha}_a=1$), а параметр $\alpha=0,5$.

Правомірність такого підходу під час використання польового георадара детально обґрунтована в роботі [247], в якій запропоновано використовувати наступну трикомпонентну модель:

$$\sqrt{\varepsilon_s} = \sqrt{\varepsilon_m} \times W_m + \sqrt{\varepsilon_a} \times W_a + \sqrt{\varepsilon_W} \times W_W, \quad (2.23)$$

де s, m, a і w – індекси відповідають параметрам загальної маси зволоженого ґрунту, мінеральних часток, повітря і води відповідно;

W – об'ємна частка відповідного компонента.

Подальші нескладні перетворення дозволяють отримати такий вигляд залежностей:

– без урахування зв'язаної води:

$$\sqrt{\varepsilon_{ep}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_e} - 1) + \frac{P_{c2}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (2.24)$$

– з урахуванням зв'язаної води:

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

$$\sqrt{\varepsilon_{ep}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_{3e}} - 1) + \frac{P_{c2}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (2.25)$$

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

$$\sqrt{\varepsilon_{ep}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_e} - 1) - W_t \times (\sqrt{\varepsilon_e} - \sqrt{\varepsilon_{3e}}) + \frac{P_{c2}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (2.26)$$

Слід зазначити, що моделі (2.24) і (2.25) тотожні для $W \leq W_t$, оскільки за відсутності вільної води в ґрунтах вологість ґрунту W визначається зв'язаною

водою. Тоді ε_g в (2.24) відповідає ε_{zg} в (2.25).

Модель (2.24-2.26) узгоджується з результатами досліджень, наведених в роботах [248, 249]. Тому для подальших досліджень приймемо моделі (2.24) і (2.26).

Під час використання узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунтів:

а) перехідна вологість визначається за формулою (2.11) в залежності від гранулометричного складу ґрунту;

б) діелектрична проникність зв'язної води визначається за (2.9, 2.10). Для розрахунку за центральної частоти зонduючого імпульсу 1,2 ГГц приймаємо діелектричну проникність: льоду $\varepsilon_l = 3,13$; вільної води $\varepsilon_g = 81$; повітря $\varepsilon_a = 1$;

в) щільність мінеральних частинок ґрунту коливається в незначних межах, тому для розрахунків приймаємо питому вагу піску рівною $2,65 \text{ г/см}^3$, суглинків – $2,70 \text{ г/см}^3$, глин – $2,75 \text{ г/см}^3$ [250];

г) діелектрична проникність мінеральної частини ґрунту може бути прийнята за довідковими даними. Дійсна частина діелектричної проникності таких мінералів як кварц, польові шпати, монтморилоніт, каолініт і т.д. в діапазоні частот 1-50 ГГц має величину від 3 до 6 [192]. Діелектрична проникність основних породоутворюючих мінералів коливається від 3-4 до 10-12 (наприклад, у кварцу від 4,3 до 5,6; у польових шпатів від 4,5 до 7,2; у слюди від 5,4 до 11,5). Мінеральний склад ґрунту земляного полотна представлений, переважно, кварцом, вміст якого змінюється від 60 % до 80 %, польовими шпатами (вміст від 5 % до 30 %) та слюдою (вміст від 5 % до 15 %).

Використання рішення, що отримано (2.23-2.25), дозволяє встановити розрахункові параметри узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту, що залежать від його гранулометричного складу, та об'ємної вологості (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Розрахункові параметри узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту

Тип ґрунту	Параметри гранулометричного складу, %		Розрахункові параметри моделі			
	піщана фракція $d_{SAND} > 0,005 \text{ см}$	глиниста фракція $d_{CLAY} < 0,0002 \text{ см}$	перехідна вологість W_t , частки од.	об'ємна вологість, W , частки од.	параметр, (2.11) γ	діелектрична проникність вологого ґрунту, ϵ_{zp}
Супісок	80,7	1,2	0,1757	0,214	0,4686	12,02
				0,236		13,74
				0,257		15,45
				0,278		17,16
				0,300		18,18
				0,321		20,59
				0,343		22,30
				0,364		24,02
				0,386		25,73
Суглинок	44,1	3,2	0,1919	0,297	0,4498	17,66
				0,326		20,03
				0,356		22,41
				0,386		24,78
				0,416		27,15
				0,445		29,53
				0,475		31,90
				0,505		34,28
				0,534		36,65
Глина	24,4	5,8	0,2041	0,309	0,4355	17,86
				0,340		20,33
				0,371		22,80
				0,402		25,28
				0,433		27,75
				0,464		30,23
				0,495		32,70
				0,526		37,65

Аналіз моделі доводить, що вміст глинистої фракції істотно впливає на діелектричну проникність ґрунту:

а) зі збільшенням вмісту глинистої фракції, за однакової вологості, діелектрична проникність ґрунту збільшується (рис. 2.3);

б) швидкість зростання діелектричної проникності, що залежить від вологості ґрунту, зі збільшенням вмісту глинистої фракції збільшується (рис. 2.4);

в) зменшення щільності ґрунту призводить до зменшення його діелектричної проникності (рис. 2.5). Вклад щільності ґрунту (у реальному

діапазоні значень щільності ґрунту у земляному полотні) у діелектричну проникність становить від 3 % до 10 %, зменшуючись по мірі зменшення вологості ґрунту, тоді як збільшення вологості призводить до зростання діелектричної проникності понад 200 %;

г) мінеральний склад ґрунту незначно впливає на величину діелектричної проникності (рис. 2.6). 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 (рис. 2.6).

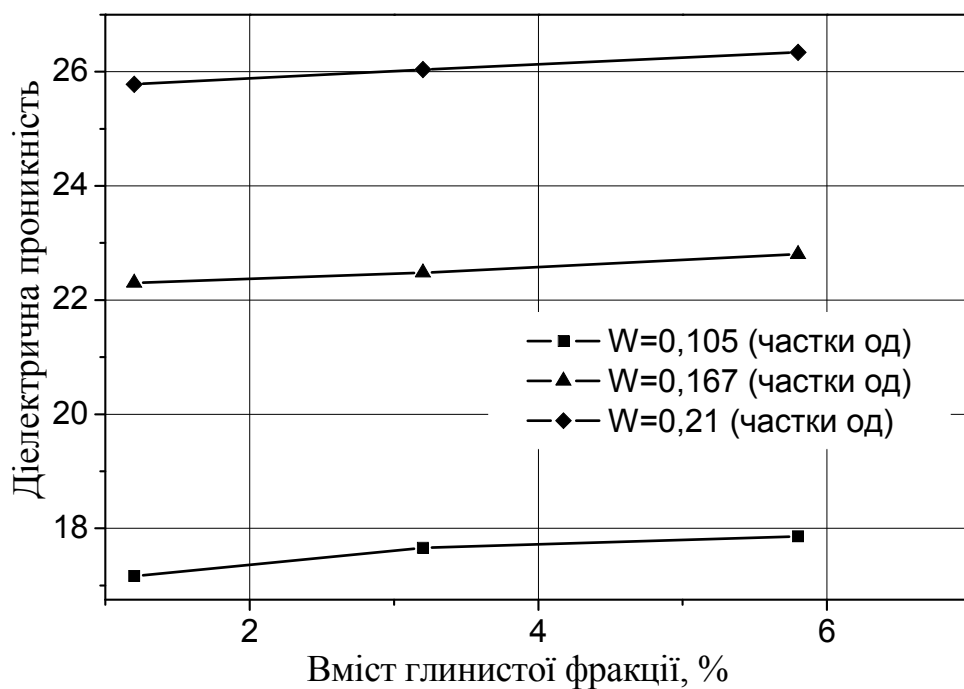


Рисунок 2.3 – Вплив вмісту глинистої фракції на діелектричну проникність ґрунту

Результати аналізу моделі не суперечать загально прийнятим уявленням про вплив вологості на діелектричну проникність ґрунту та можуть бути використані під час розроблення алгоритмів визначення фізичних параметрів ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування. Більш детально питання практичного застосування цієї моделі будуть розглянуті у наступних розділах.

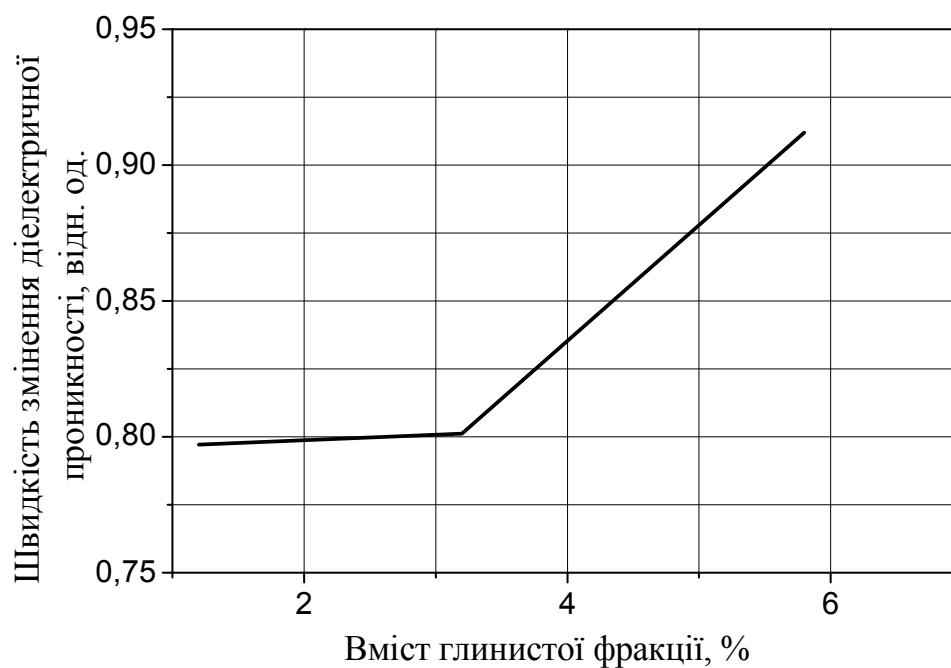


Рисунок 2.4 – Вплив вмісту глинистої фракції ґрунту на швидкість зростання діелектричної проникності при збільшенні частки вологості ґрунту

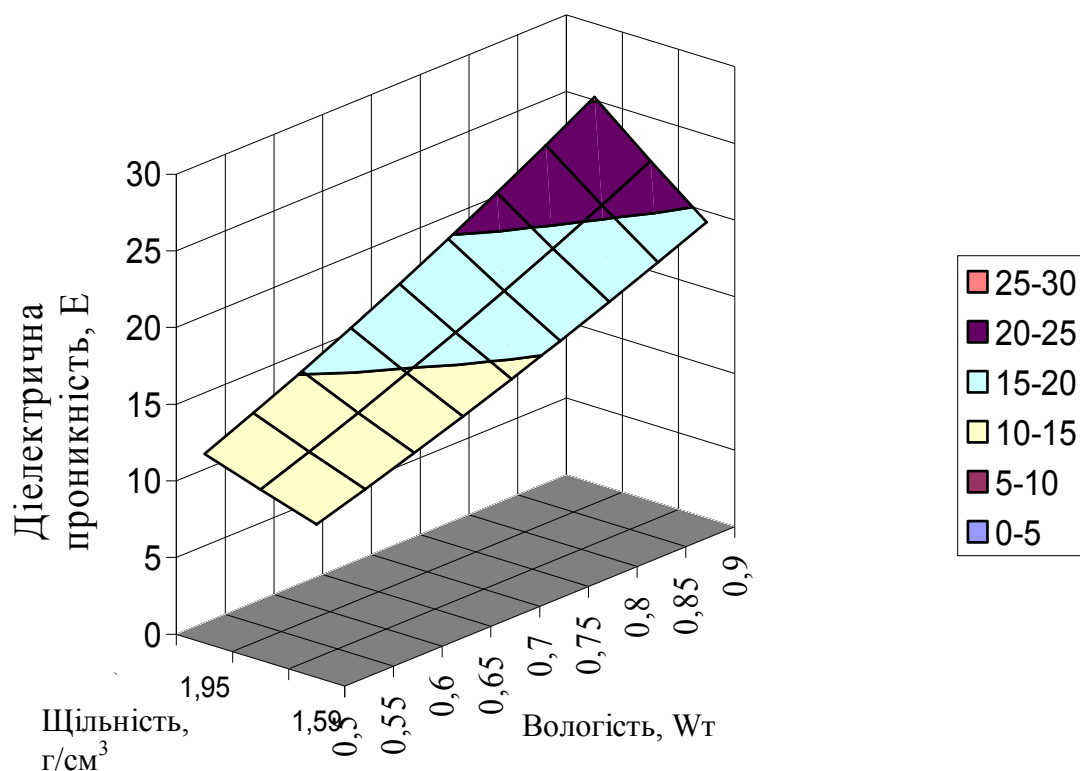
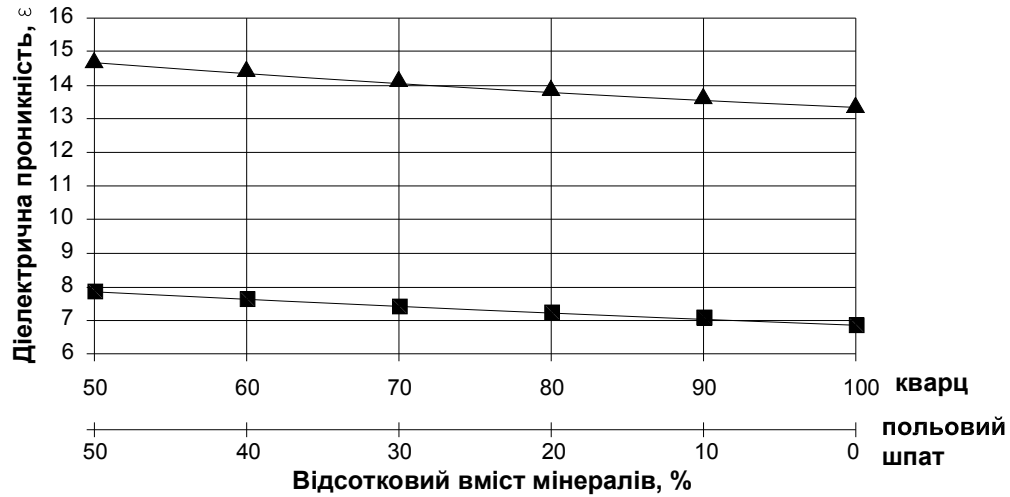


Рисунок 2.5 – Залежність ε'_{ef} ґрунту від його щільності P і вологості в частках на межі текучості W . Ґрунт – супісок

а)



б)

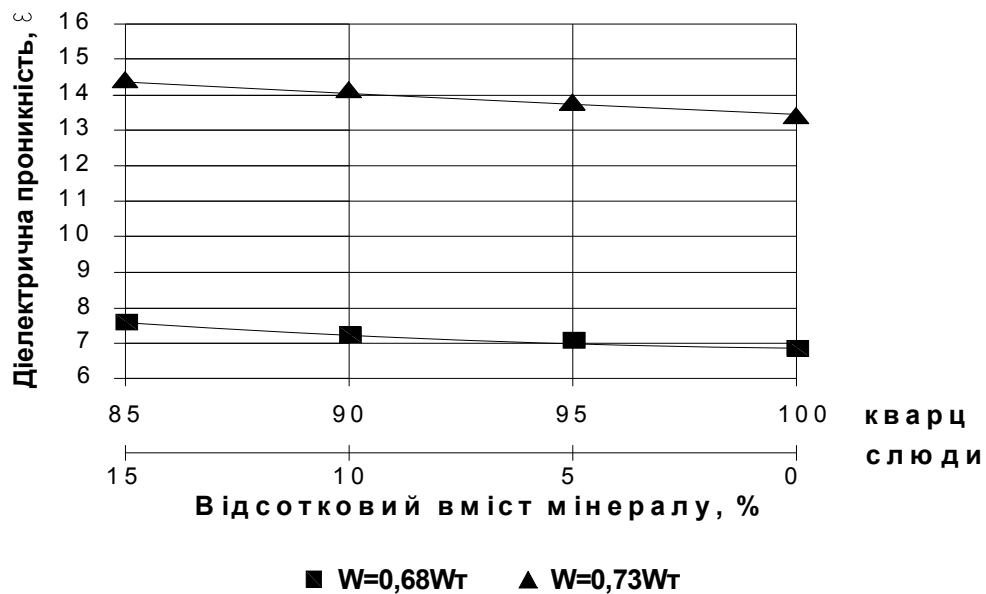


Рисунок 2.6 – Вплив мінерального складу ґрунту на діелектричну проникність:

а) мінеральний склад ґрунту представлений кварцом та польовими шпатами;

б) мінеральний склад ґрунту представлений кварцом та слюдою

2.3.3 Оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за величиною діелектричної проникності

Згідно з дослідженнями Болтінцева В.Б [251] зі збільшенням вологості ґрунтів відбувається:

а) збільшення площі питомої поверхні;

- б) зростання концентрації релаксуючих частинок;
- в) збільшення активності релаксуючих частинок.

Характерною особливістю релаксаційної поляризації є її значна залежність від температури. Змінення температури визначає енергетичний стан:

- а) диполів ґрунтової вологи;
- б) гідратованих частинок твердої фази;
- в) поглинених катіонів;
- г) іонів ґрунтового розчину.

Збільшення температури тягне за собою зменшення потенційної енергії, збільшення рухливості і величини електропровідності, збільшення ϵ . Такий ланцюжок справедливий для всіх досліджуваних форм вологи.

У глинистих ґрунтах значний вплив на структуру і енергетичний стан порового розчину надають властивості поверхонь частинок і складу мінеральної матриці, а також гетеропористість середовища [88, 90].

Залежно від мінерального складу за інших однакових умов найбільша поверхнева провідність визначається вихідною концентрацією порового розчину, зростанням ступеня заповнення ґрунту рідиною, аж до повного насичення, має зростати і вплив молекулярної поляризації. Це буде відбуватися як за рахунок збільшення відсоткового вмісту поляризованого компонента, так і за рахунок зростання його молекулярної сприйнятливості, отже, збільшення вологості призводить до зростання поляризації і на більш високих частотах.

При збільшенні «вільної» частини порової вологи діелектрична проникність зростає. При цьому в радіочастотному діапазоні можна очікувати більш сильну її залежність від вологості, ніж на частотах ≤ 1 МГц, але за менших значень ϵ . У більш тонко дисперсному середовищі і за великої адсорбційної активності її твердої частини може виникнути значно більша її здатність до поляризації на більш високих частотах в порівнянні з грубо дисперсійними (піщаними) ґрунтами. Тому в глинах (в порівнянні з пісками) слід очікувати меншу здатність до поляризації на низьких частотах і велику – на високих при завжди значно менших термінах релаксації [252].

Таким чином, діелектрична проникність ґрунту є функцією відгуку на змінення 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, та час проходження сигналу через досліджувану конструкцію.

Обробка результатів георадарного зондування дозволяє оцінити діелектричну проникність досліджуваного ґрунту, що, в свою чергу, дозволяє оцінити його вологість.

Для теоретичного розрахунку вологості ґрунту, припускаючи, що діелектрична проникність ґрунту визначена, скористуємося моделями (2.24-2.26), виразивши об'ємну вологість:

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

$$W = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - \sqrt{\varepsilon_m})}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} + P \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} - \frac{P_{c2}}{P_m} \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)}; \quad (2.27)$$

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

$$\begin{aligned} W &= \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - \sqrt{\varepsilon_m})}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} + W_t \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_g} - \sqrt{\varepsilon_{3g}})}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} + P \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} = \\ &= \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} + W_t \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_g} - \sqrt{\varepsilon_{3g}})}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)} - \frac{P_{c2}}{P_m} \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_g} - 1)}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Таким чином, алгоритм оцінювання вологості ґрунту за величиною діелектричної проникності (рис. 2.7) містить в собі такі основні етапи:

а) визначення діелектричної проникності ґрунту за результатами георадарного зондування;

б) розрахунок основних параметрів розрахункової моделі за рішеннями моделі Шмугте;

в) оцінювання вологості ґрунтів за запропонованою моделлю (2.27-2.28).

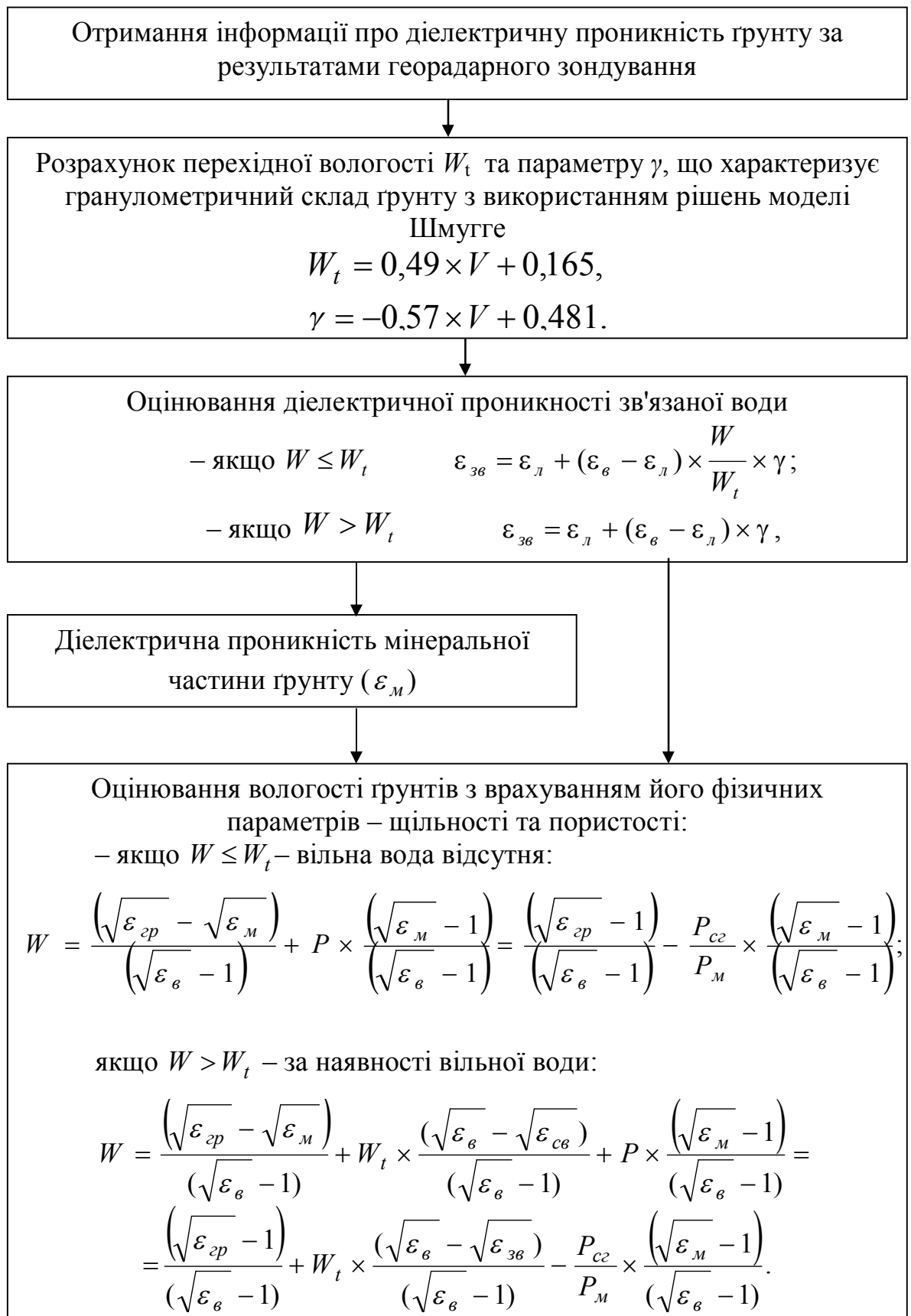


Рисунок 2.7 – Схема алгоритму розрахунку вологості ґрунтів за результатами георадарного зондування

2.4 Постановка задачі оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару

Задача оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування містить в собі:

- а) визначення діелектричної проникності ґрунту за результатами георадарного зондування;
- б) оцінювання вологості ґрунту за величиною діелектричної проникності на підставі експериментально встановленого зв'язку між діелектричною проникністю та вологістю ґрунту;
- в) оцінювання розрахункових (міцнісних та деформаційних) параметрів ґрунтів, що ґрунтується на зв'язку діелектричної проникності з міцнісними й деформаційними параметрами ґрунтів;
- г) розроблення алгоритму оцінювання розрахункових (міцнісних та деформаційних) параметрів ґрунтів за допомогою польового георадару.

2.4.1 Визначення діелектричної проникності та оцінювання вологості ґрунту польовим георадаром

Як обґрунтовано у п. 2.3.3, величина діелектричної проникності (ϵ') і швидкість поширення хвиль (V) істотно залежать від вологості W матеріалу шару. Значення діелектричної проникності можуть в одних випадках бути індикатором кількості води в ґрунтах, а в інших – кількісного складу компонентів у досліджуваній суміші.

Питанням використання польових георадарів для оцінювання діелектричної проникності ґрунту як функції щільності і вологості присвячено безліч робіт [156, 161, 173, 184, 187]. Як правило, залежності встановлюються в лабораторних умовах для конкретних типів ґрунтів і матеріалів, таблиця 2.3.

Таблиця 2.3 – Експериментальні моделі оцінювання вологості ґрунту польовим георадаром

Ґрунт (шари дорожнього одягу), що досліджуються	Експериментальна модель	Джерело інформації
Шари основи з ущільнених зернистих матеріалів (гравійних сумішей, ущільнених до 100 % щільності за модифікованим критерієм Проктора)	$\theta_v = -1,98 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^3 + 2,39 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 1,95 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 2,08 \cdot 10^{-2}$ де θ_v – об'ємний вміст води, ε – діелектрична постійна зразка матеріалу	[184, 187]
Шари основи з гравійних матеріалів з незначним вмістом дрібних фракцій і менш ущільнені	$\theta_v = -1,04 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^3 + 2,47 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 4,52 \cdot 10^{-2}$	
Дренажний шар товщиною 7,5 см., укладений безпосередньо поверх основи з пористістю близько 30 %	$\theta_v = -4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2 + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon - 5,3 \cdot 10^{-2}$	
Піски і суглинки	$\varepsilon' = 3,2 + 1,1 \cdot W$	[156]
Осадкові породи у широкому діапазоні зміни вологості від 3 % до 45 %	$\varepsilon' = 3,03 + 9,6 \cdot W_{об} + 146 \cdot W_{об}^2 - 76,7 \cdot W_{об}^3$ де $W_{об}$ – об'ємна вологість ґрунту, частки од.	
Ґрунти з високою об'ємною вологістю (понад 45 %)	$\varepsilon' = \frac{720}{(180 - W)}$	
Піщані ґрунти	$\varepsilon = -3,63 - 3,93 \cdot W + 0,15 \cdot W^2 + 16,98 \ln W$	[173]
Глинисті та суглинисті ґрунти	$W_0 = \log \left(\frac{(k_2 \varepsilon'_g)}{(k_1 \varepsilon'_m)} \right) \frac{\varepsilon'_{gp}}{k_1 \varepsilon'_m}$	[161]

Співвідношення [184, 187] отримані для випадку рівномірного розподілу вологості за об'ємом, в той час як для ґрунту земляного полотна характерний неоднорідний розподіл. Проте, ці співвідношення виявляються придатними для наближених порівняльних оцінок. Відзначимо, що для визначення в лабораторних умовах необхідно знати товщину кожного шару, тобто для теоретичних розрахунків необхідно володіти як апіорними відомостями про вологість ґрунтів, так і про геометричні параметри конструкції дорожнього одягу. Однак, під час проведення польових обстежень товщини шарів невідомі, а тому також підлягають визначенню, що значно ускладнює використання даної методики зважаючи на необхідність отримання додаткової інформації, наприклад, за допомогою відбору кернів на близьких відстанях.

Дослідження, що проведені авторами робіт [187, 253], дозволяють зробити висновок не тільки про принципову можливість оцінювання вмісту води в шарах дорожньої конструкції за допомогою георадарних даних, але і про високу точність такої методики.

У процесі георадарного зондування після первинної обробки даних зондування дорожніх одягів вихідними параметрами є тимчасові затримки сигналів, відбитих від границь конструктивних шарів дорожнього одягу, зон зміни вологості ґрунту. Для практичного застосування одержуваних результатів під час вирішення завдання визначення діелектричної проникності ґрунту необхідно:

а) використати методи пошарового перерахування тимчасових затримок і амплітуд сигналів, відбитих від границь шарів конструкції, у значення товщини конструктивних шарів і їх ефективної діелектричної проникності [189];

б) оцінити вологість ґрунту за величиною діелектричної проникності з метою їх подальшого використання під час рішення завдань оцінювання та прогнозування стану дорожнього одягу. В результаті узагальнення експериментальних досліджень автора дисертації, проведених із застосуванням польового георадара [223], сформульовано висновок, що зв'язок діелектричної проникності ґрунтів з їх вологістю з достатнім ступенем точності

характеризується степеневими залежностями, що дозволяє записати функцію вологості у вигляді:

$$F\{W_{об}, P_{зр}\} = A + B \times \varepsilon' + C \times \varepsilon'^2 + D \times \varepsilon'^3. \quad (2.29)$$

Значення коефіцієнтів (A, B, C, D) для кожного типу ґрунту визначаються експериментально.

Для вирішення перелічених завдань в дисертаційному дослідженні був використаний польовий георадар «ОДЯГ-1» з центральною частотою зонduючого імпульсу 1,2 ГГц. Алгоритм з оцінювання вологості під час застосування польового георадару складається з:

- а) запису калібрувальних сигналів;
- б) георадарного зондування дорожнього одягу;
- в) оброблення отриманих даних в програмі «GeoVizu» з метою оцінювання діелектричної проникності (ε) на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»;
- г) оцінювання вологості ґрунтів за значеннями діелектричної проникності на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна».

Перший етап містить в собі відбір зразків ґрунту на початковій ділянці для встановлення типу ґрунту, його вологості термоваговим методом [109], а також запис калібрувальних сигналів з метою визначення часової затримки сигналів, що надходять від границь конструкції дорожнього одягу, та їх амплітуди. Зразки ґрунту також необхідно відбирати на ділянках, де ускладнюється інтерпретація даних георадарного зондування.

На другому етапі проводиться зондування дорожнього одягу георадаром «ОДЯГ-1» в повздовжньому та в поперечному напрямках.

Третій етап передбачає використання алгоритму визначення діелектричної проникності ґрунту, а саме:

- а) реєстрація сигналу прямого проходження, що надходить у прийомний тракт під час випромінюванні антени у вільний простір;

б) одержання каліброваного сигналу, відбитого від листа металу, з метою визначення амплітуди зондувального імпульсу (коефіцієнт відбиття від металу дорівнює мінус одиниці, то амплітуда відбитого сигналу чисельно дорівнює амплітуді зондувального імпульсу $A_{0,1} = A_{мет}$);

в) одержання калібрувального сигналу від поверхні конструкції дорожнього одягу (визначення амплітуди відбитого сигналу від поверхні конструкції $A_{1,0} = A_{відб}$);

г) зондування дорожнього одягу з реєстрацією тимчасової затримки сигналів від внутрішніх границь конструкції дорожнього одягу, а також амплітуди цих сигналів з метою визначення коефіцієнтів відбиття сигналів від границь конструкції ($R_{n-1,n}$) та коефіцієнтів проходження сигналів через границі конструкції дорожнього одягу [189];

д) обчислення коефіцієнтів відбиття та проходження електромагнітних хвиль через границі конструктивних шарів дорожнього одягу з визначенням їх діелектричної проникності та визначенням діелектричної проникності на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» [189]:

$$\sqrt{\varepsilon_n} = \sqrt{\varepsilon_{n-1}} \times \frac{1 - R_{n-1,n}}{1 + R_{n-1,n}}, \quad (2.30)$$

де $n-1, n, n+1$ – номер шару;

$R_{n,n-1}$ – коефіцієнт відбиття від границі між $(n-1)$ -м і n -м шарами в $(n-1)$ -й шар, який визначається як [223]:

$$R_{n-1,n} = A_{0,1}^{-1} \times C_n / \prod_{j=1}^n P_j, \quad (2.31)$$

де $A_{n-1,n}, A_{n,n-1}$ – амплітуди падаючого на границю між середовищем з ε_{n-1} і середовищем з ε_n і відбитого в $n-1$ -ше середовище сигналів (для першої

границі $A_{n-1,n} = A_0$);

C_n – сигнал, що реєструється антенним блоком після проходження n -го шару конструкції;

P_j – передаточна функція проходження через границю конструктивних шарів і відбиття від границі шару [189]:

$$P_n = 4 \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_n} \times \sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{(\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n})^2}. \quad (2.32)$$

Результатом четвертого етапу є визначення фактичної вологості ґрунту на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за алгоритмом, що запропоновано в п. 2.3.3 за (2.27-2.28) або за (2.29).

Розподіл вологості за глибиною та в часі пропонується визначати за рішеннями проф. В.М. Сіденка [87] для другого та третього типу місцевості за характером зволоження, де початковій вологості відповідає вологість на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»:

- для другого типу місцевості за зволоженням [87]:

$$W(z, T) = W_{ПВ} - [W_{ПВ} - (W_{П} + m_1 T)] \frac{z}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 a T_1}{l^2} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[W_{П} - W_{ПВ} - \frac{(-1)^n m l^2}{\pi^2 n^2 a_1} \right] + \frac{(-1)^n m l^2}{\pi^2 n^3 a_1} \right\} \sin \frac{n \pi z}{l} \quad ; \quad (2.33)$$

- для третього типу місцевості за зволоженням [87]:

$$W(z, T) = W_n + m T_B + \frac{1}{h_{Г.Б.}} (W_{ПВ} - W_n - m T_B) \cdot z - \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 m h_{Г.Б.}^2}{\pi^3 a_1 n^3} \left[1 - \exp \left(- \frac{\pi^2 n^2 a_1 T_B}{h_{Г.Б.}^2} \right) \right] \cdot \sin \frac{n \pi z}{h_{Г.Б.}} \quad (2.34)$$

де $W(z, T)$ – розрахункова вологість, %;

$W_{ПВ}$ – повна вологоємність ґрунту, %;

$W_{П}$ – початкова вологість, %;

m – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність наростання вологості ґрунту, 1/год;

z – глибина на якій проводиться розрахунок вологості, м;

T – довготривалість вологонакопичення, год;

l – відстань до джерела зволоження, м;

n – розрахунковий шар;

a_l – коефіцієнт вологопровідності, $\text{м}^2 \cdot \text{год}$;

Схему алгоритму наведено на рисунку 2.8.

Вологість ґрунту на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» використовується для оцінювання міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів земляного полотна.

Схему алгоритму наведено на рисунку 2.8.

2.4.2 Визначення розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування

До основних розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна, що використовуються під час проектування дорожнього одягу, відносяться його міцнісні та деформаційні параметри. До деформаційних параметрів ґрунтів, в свою чергу, відносяться коефіцієнт Пуассона і модуль пружності ґрунту, до міцнісних – кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення ґрунту. Міцнісні та деформаційні параметри ґрунту істотно залежать від його вологості.

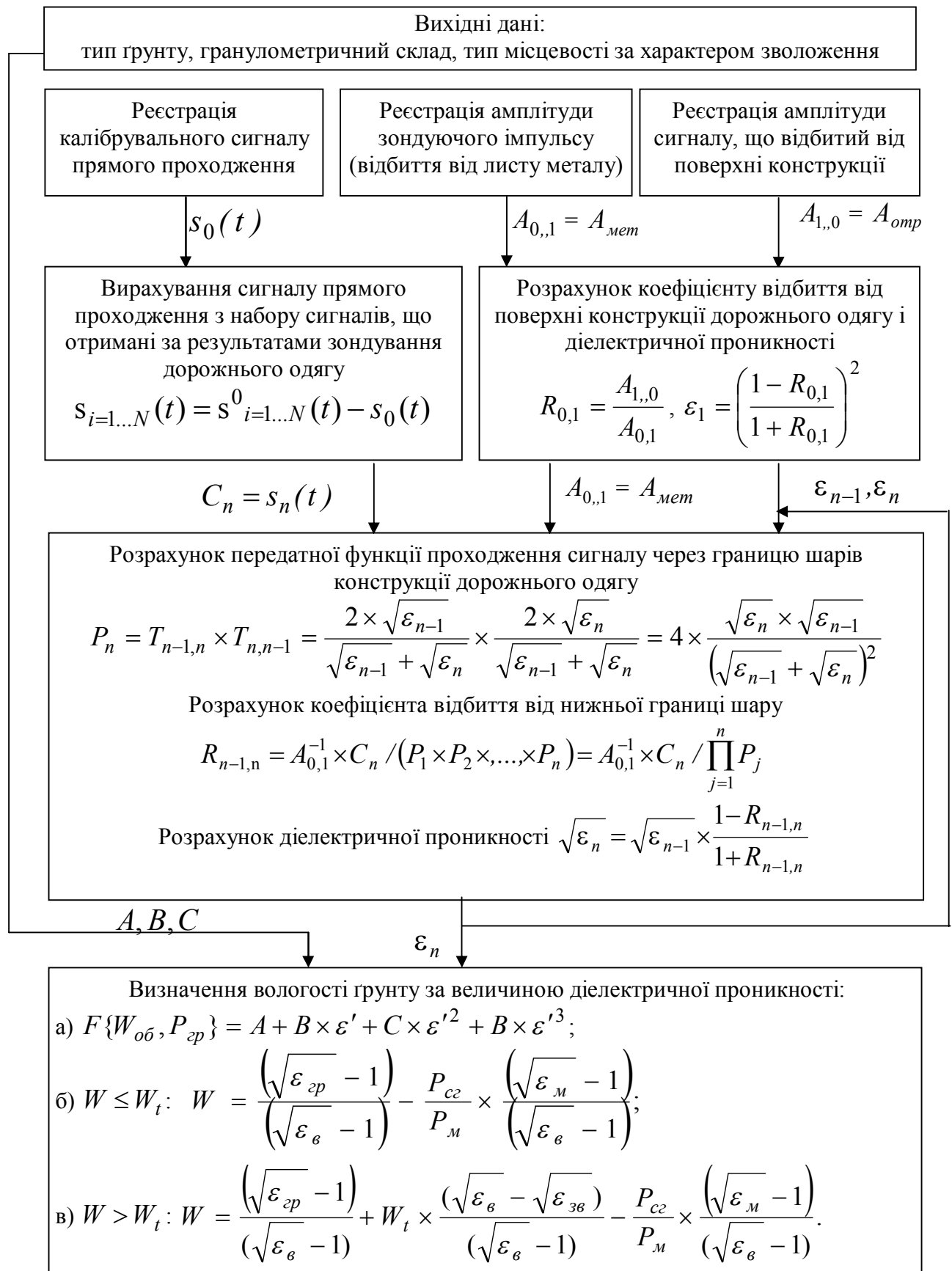


Рисунок 2.8 – Схема алгоритму оцінювання вологості ґрунту на межі
«конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна»

Зазначимо також, що, як було визначено раніше (п. 1.4), фактична вологість ґрунту може істотно змінюватися навіть на незначних за довжиною ділянках автомобільних доріг. Тому визначення розрахункових параметрів ґрунту проводиться у два етапи:

- а) визначення розрахункової вологості ґрунту (W_p);
- б) визначення міцнісних та деформаційних параметрів ґрунту за розрахункової вологості.

Для визначення розрахункової вологості ґрунту приймемо, що середня фактична вологість ґрунту має нормальний закон розподілу згідно з дослідженнями [99]. Тоді, для підвищення надійності проектних рішень, розрахункову вологість ґрунту визначимо у межах довірчого інтервалу, що відповідає заданому рівню надійності [254]:

$$W_p = \overline{W} \cdot (1 + t \cdot C_v), \quad (2.35)$$

де $\overline{W}$ – середня фактична вологість ґрунту на ділянці, що досліджується, частки одиниць від W_T ;

t – коефіцієнт нормованого відхилення, що приймається залежно від заданого рівня проектної надійності конструкції дорожнього одягу [254];

C_v – коефіцієнт варіації вологості ґрунту.

В цьому випадку під розрахунковою вологістю (W_p) ґрунту будемо розуміти максимальне значення середньої вологості ґрунту, що спостерігається на ділянці обстеження.

Згідно з [254] коефіцієнт варіації вологості дорівнює 0,1. Однак, численними дослідженнями [10–12, 99] встановлено, що зі збільшенням вологості ґрунту коефіцієнт варіації відносної вологості знижується. Тому пропонується визначати коефіцієнт варіації відносної вологості ґрунту за результатами георадарного зондування:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \overline{W}_{cp})^2}{(n-1)}} / \overline{W}_{cp}, \quad (2.36)$$

де W_i – значення відносної вологості при i -му вимірюванні на ділянці, частки одиниць;

$\overline{W}_{cp}$ – середнє значення відносної вологості за результатами вимірювань на ділянці, частки одиниць;

n – загальна кількість вимірювань на ділянці.

Отримані значення відносної розрахункової вологості ґрунту (2.35) дозволяють визначити його розрахункові параметри: коефіцієнт Пуассона, модуль пружності, кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення.

Раніше найбільш поширеним було використання постійного значення коефіцієнта Пуассона. Однак, більш детальні дослідження даного питання з урахуванням специфіки експлуатаційних параметрів дорожніх матеріалів показали, що коефіцієнт Пуассона може зростати зі збільшенням напружень, досягаючи значень, більших, ніж теоретична границя, що в рамках лінійної теорії дорівнює 0,5 [255]. Це пов'язано з нелінійними ефектами, що виникають за певних умов під час роботи матеріалів дорожніх конструкцій. Таким чином, під час визначення властивостей матеріалів необхідно враховувати залежність коефіцієнта Пуассона ґрунту як від величини навантаження, що передається на ґрунт, так і від його вологості.

Як зазначено в роботі [256], наявність в глинистих ґрунтах між частинками структурованих шарів зв'язаної води, яка володіє аномальними властивостями, або води перехідного стану, істотно впливає на їх стиснення [257, 258], таблиця 2.4.

В дослідженнях [256] експериментально отримані рівняння множинної регресії, що відображають зв'язок коефіцієнта Пуассона з показником вологості – ступенем зволоження [256]:

Таблиця 2.4 – Коефіцієнт Пуассона ґрунтів [257, 258]

Ґрунт	Коефіцієнт Пуассона	
	[257]	[259]
Гравій і галька	-	0,12-0,17
Піски	-	0,25-0,30
Супіски		
тверді	0,24-0,28	0,21-0,29
пластичні	0,24-0,31	0,21-0,29
Суглинки		
тверді	0,25-0,37	0,33-0,37
напівтверді	0,26-0,30	0,33-0,37
тугопластичні	0,26-0,37	0,33-0,37
м'якопластичні	0,26-0,40	0,33-0,37
текучопластичні	0,26-0,37	0,33-0,37
лесовидні	0,26-0,35	0,33-0,37
Глини		
тверді	0,27-0,41	0,20-0,30
напівтверді	0,28-0,40	0,20-0,30
тугопластичні	0,27-0,41	0,38-0,45
м'якопластичні	0,28-0,39	0,38-0,45
текучопластичні	0,29-0,48	0,38-0,45

а) для суглинків важких:

$$\mu = 0,2S_r + 0,32, \quad (r=0,85); \quad (2.37)$$

б) для суглинків легких:

$$\mu = 0,63S_r - 0,42\rho + 0,86, \quad (r=0,82); \quad (2.38)$$

в) для супісків:

$$\mu = 0,188S_r - 0,11\rho + 0,54, \quad (r=0,81); \quad (2.39)$$

$$\mu = 0,17S_r - 0,11\rho + 0,59, \quad (r=0,84); \quad (2.40)$$

де S_r – показник вологості, що визначається як відношення природної вологості ґрунту до вологості ґрунту під час його повного водонасичення:

$$S_r = \frac{W \times P_m}{e \times P_w}, \quad (2.41)$$

де W – природна вологість ґрунту, %

P_m – щільність мінерального скелету ґрунту, г/см³;

e – коефіцієнт пористості ґрунту, %

P_w – щільність води, г/см³.

З огляду на тісноту зв'язків рівнянь множинної регресії ($0,80 < r < 0,90$), для розрахунків дорожнього одягу доцільно скористатися зазначеними співвідношеннями (2.37 – 2.40), що відображають зв'язок коефіцієнта Пуассона зі ступенем зволоження і щільністю ґрунтів.

З другого боку, дослідження ХАДІ [260] дозволили встановити залежність модуля пружності ґрунту E_y від щільності K_y і відносної вологості W_p , яка має наступний вигляд:

$$E_y = a \cdot K_y^{1,5} \exp[b \cdot W_p + d \cdot W_p^2], \quad (2.42)$$

де W_p – розрахункова вологість ґрунту в активній зоні;

a, b, d – коефіцієнти, що залежать від типу ґрунту (для суглинку та глин $a = 35046$; $b = -15,78$; $d = 8,36$);

K_y – коефіцієнт ущільнення ґрунту в земляному полотні;

m – коефіцієнт, що враховує кліматичні особливості району будівництва.

Збільшення щільності в цілому сприяє підвищенню міцності і зниженню деформованості ґрунту до певної межі, що відповідає даній вологості.

Більш досконала модель оцінювання модуля пружності ґрунтів отримана у роботах [261], де встановлений зв'язок між деформаційними параметрами

грунтів та їх вологістю, навантаженням та іншими фізичними параметрами.

Інша група розрахункових параметрів, що характеризує властивості ґрунтів – міцнісні параметри. До них відносяться питоме зчеплення (C) та кут внутрішнього тертя (ϕ). Як і у випадку з деформаційними параметрами, вони істотним чином залежать від вологості ґрунтів [13, 64].

Згідно з (2.42), модуль пружності ґрунту пов'язаний степеневою залежністю із щільністю ґрунту і його вологістю. Враховуючи зв'язок діелектричної проникності із зазначеними фізичними параметрами (п. 2.3), будемо розглядати міцнісні та деформаційні параметри ґрунту як функцію від діелектричної проникності, що визначається шляхом експериментальних досліджень:

$$\{E, \phi, c\} = F\{P_{zp} = f(\varepsilon); W_p = f(\varepsilon)\}, \quad (2.43)$$

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

Результати (2.43) є основою оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів за результатами оцінки їх вологості (2.27, 2.28).

Вихідні дані для оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування поділяються на дві групи. До першої групи віднесено вихідні дані, які не потребують залучення результатів георадарного зондування:

а) тип ґрунту земляного полотна та пов'язані з ним гранулометричний склад і число пластичності;

б) тип місцевості за характером зволоження.

До другої групи віднесено вихідні дані, що отримані за результатами георадарного зондування:

а) товщина конструктивних шарів дорожнього одягу, що визначається під час оцінювання вологості на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» [189];

б) фактична вологість ґрунту певного типу на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» (п.2.4.3).

Використовуючи результати георадарного зондування (вихідні дані другої групи) та вихідні дані першої групи визначаються розрахункові параметри ґрунту:

а) визначення розподілу вологості ґрунту земляного полотна за глибиною та прогнозування її в часі (період максимального волого накопичення) для другого та третього типу місцевості за характером зволоження, де визначення початкової вологості здійснюється за п. 2.4.3:

б) визначення міцнісних (φ , C) та деформаційних ($E_{гр.}$) параметрів ґрунту за (2.43).



Рисунок 2.9 – Схема алгоритму оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів у розрахунковий період та під час максимального вологонакопичення

2.5 Висновки за розділом

1. На підставі положень механіки ґрунтів 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 фактичної 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 – ґрунт земляного полотна»;

б) оцінити вологість ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» шляхом застосування моделей, що зв'язують об'ємні частки води (вологість) та повітря (пористість), гранулометричний склад та тип ґрунту з виміряним значенням діелектричної проникності.

2. За результатами узагальнення даних наукової літератури та попередніх експериментальних досліджень автора розроблено узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунту, яка поєднує у собі модель Шмугге та модель Бірчака – «рефракційну модель» для багатокомпонентних середовищ. Перевагою запропонованої моделі є можливість врахування вільної та зв'язаної води, щільності і гранулометричного складу ґрунтів під час оцінювання діелектричної проникності ґрунту. Використання рішення, що отримано, дозволяє встановити значення діелектричної проникності ґрунту в залежності від його гранулометричного складу та об'ємної вологості.

Аналіз моделі доводить, що вміст глинистої фракції істотно впливає на діелектричну проникність ґрунту:

а) зі збільшенням вмісту глинистої фракції, за однакової 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. 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 %;

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.

3. Запропоновано рішення задачі оцінювання фактичної вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування. Рішення спирається на метод пошарового перерахування тимчасових затримок і амплітуд сигналів, відбитих від границь шарів конструкції, у значення товщини конструктивних шарів і їх ефективної діелектричної проникності, узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунтів та зв'язок діелектричної проникності ґрунтів з їх вологістю, що характеризується степеневими залежностями.

4. Розроблено 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 ($E_{\text{гр.}}$) параметрами.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ, ФІЗИЧНИХ, МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Моделі визначення вологості ґрунтів земляного полотна, що розроблені в розділі 2, ґрунтуються на аналізі імпульсних сигналів георадару. В свою чергу точність та відтворюваність результатів оцінювання вологості та деформаційних і міцнісних параметрів залежить від діелектричної проникності ґрунтів, що досліджуються. Тому метою експериментальних досліджень було встановлення основних параметрів моделей та підтвердження адекватності теоретичних положень експериментальним даним.

Експериментальні дослідження щодо визначення фізичних, міцнісних, деформаційних та електрофізичних параметрів ґрунтів виконувалися як в лабораторних так й в польових умовах на автомобільних дорогах загального користування безпосередньо автором та за його участю.

Виходячи з поставленої мети, задачами лабораторних досліджень є:

а) обґрунтування параметрів теоретичних моделей щодо оцінювання електрофізичних, фізичних параметрів ґрунту земляного полотна за допомогою георадару:

1) встановлення зв'язку між електрофізичними параметрами та вологістю і типом ґрунту;

2) встановлення залежності деформаційних і міцнісних параметрів ґрунтів від вологості та гранулометричного складу;

3) визначення зв'язку електрофізичних характеристик (ϵ) з модулем пружності (E), питомим зчепленням (C) та кутом внутрішнього тертя (φ) ґрунтів;

б) перевірка адекватності теоретичних моделей, алгоритмів і практичних методик застосування георадару для оцінювання електрофізичних, фізичних

параметрів ґрунту земляного полотна.

До задач експериментальних досліджень в польових умовах належать:

- а) розроблення практичної методики щодо проведення георадарного зондування дорожнього одягу з метою визначення вологості ґрунту земляного полотна;
- б) перевірка адекватності методу визначення деформаційних та міцнісних параметрів ґрунту земляного полотна за допомогою польового георадару.

3.1 Обґрунтування параметрів моделей. Прилади та устаткування

3.1.1 Прилади та устаткування для проведення експериментальних досліджень

Для виконання програми експериментальних досліджень в дисертаційній роботі крім стандартних методів [23, 108, 109, 262, 263] досліджень були прийняті спеціальні методи і обладнання.

Для експериментальних досліджень був відібраний ґрунт із земляного полотна автомобільної дороги. Відповідно до проектних даних був відібраний піщанистий ґрунт на ділянці автомобільної дороги М-03 Київ – Харків – Довжанський км 481+500 (зразок № 1), суглинистий ґрунт на ділянці західної об'їзної автомобільної дороги м. Харків на км 7+600 (зразок № 2) та глинистий ґрунт на ділянці автомобільної дороги М-18 Харків – Сімферополь км 18+800 (зразок № 3). Для проб ґрунту визначався гранулометричний склад, число пластичності ґрунту, вологість на межі пластичності та текучості.

Визначення гранулометричного складу ґрунту виконувалося за методикою згідно з ДСТУ Б В.2.1-19:2009 [262].

Вологість ґрунту на межі текучості визначалася балансірним конусом Васильєва, який відповідає вимогам [108] за методикою згідно з [108].

Для визначення максимальної щільності за оптимальної вологості використовували прилад СоюздорНДІ для стандартного ущільнення відповідно

до [85] та проводили визначення за [263].

Для визначення міцнісних параметрів (питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя) ґрунтів використовували прилад Литвинова (рис. 3.1), який працює за принципом одноплощинного зрізу.

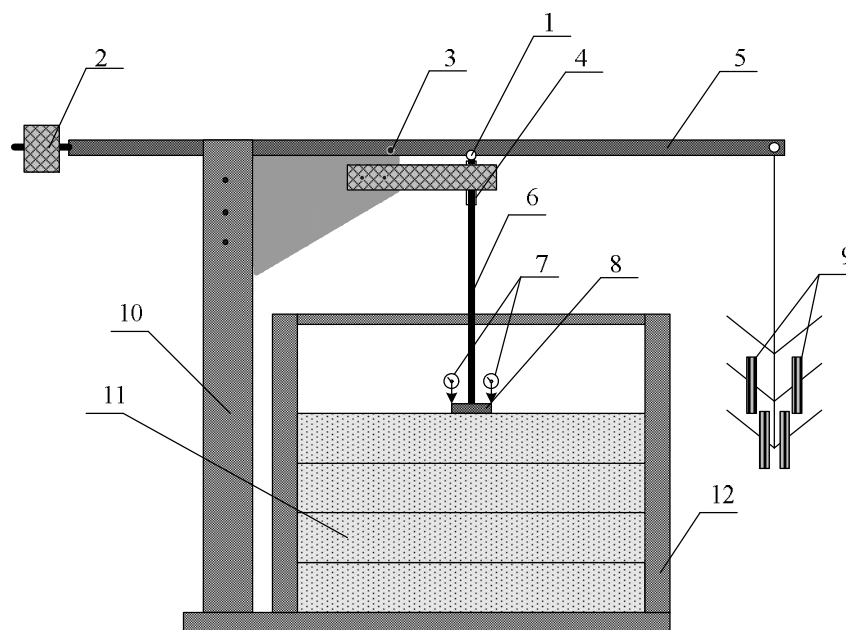


Рисунок 3.1 – Прилад конструкції І.М. Литвинова для визначення міцнісних параметрів за принципом одноплощинного зрізу

Модуль пружності ґрунту в лабораторії визначали важільним пресом (рис. 3.2) відповідно до методики ВБН В.2.3-218-186 [13].

Визначення діелектричної проникності ґрунту проводили георадарним комплексом «ОДЯГ-1» (рис. 3.3). До його складу входить приймально-передавальний антенний блок з центральною частотою 1,2 ГГц, георадар, ноутбук, пересувний візок. Візуалізація та первинна обробка георадарних даних здійснювалася за допомогою програмного комплексу «GPR Proview». Для інтерпретації результатів зондування дорожніх одягів використовувалася модернізована програма «Geovisu», яка реалізує в тому числі й алгоритми обробки, що розроблені безпосередньо автором дисертації.

а)



б)



1 – опора важеля, 2 – контрвантаж, 3 – шарнір важеля, 4 – направляюча для штоку, 5 – важіль, 6 – шток, який передає навантаження, 7 – індикатори, 8 – штамп, 9 – вантаж, 10 – стійка, 11 – дерев'яна форма, 12 – підставка для форми.

Рисунок 3.2 – Важільний прес для вимірювання модуля пружності: схема (а) та фото (б) устаткування



Рисунок 3.3 – Георадарний комплекс «ОДЯГ-1» під час проведення лабораторних досліджень

3.1.2 Обґрунтування параметрів лабораторних моделей для проведення георадарних вимірювань

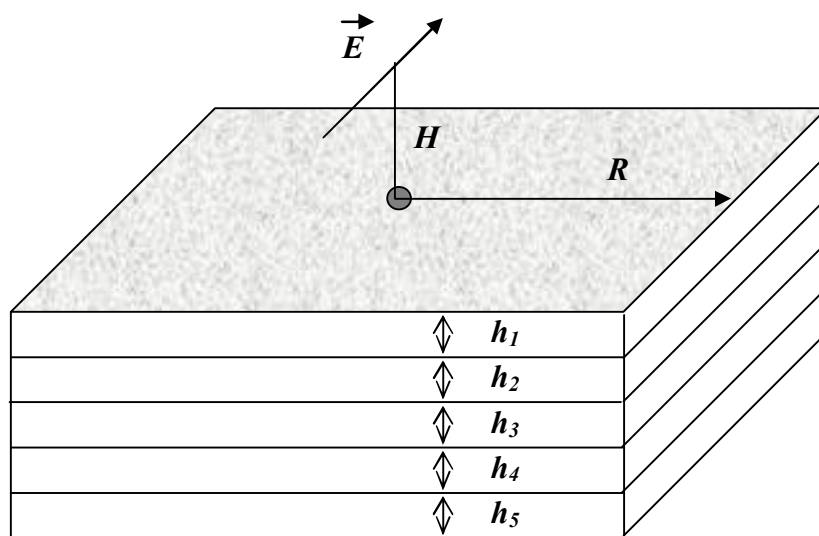
Для обґрунтування параметрів моделі для проведення георадарних вимірювань слід виконати теоретичні розрахунки щодо узгодження геометричних розмірів зразків із просторово-часовими характеристиками зондувальних сигналів. Тому основними завданнями даного параграфа є:

а) узгодження мінімальних розмірів і необхідних співвідношень лінійних розмірів зразків з урахуванням розмірів передавальної і прийомних антен, розміру майданчика, що відбиває, і особливостей хвильової картини, характерної для георадара;

б) узгодження глибини (товщини шарів зразка) і його розмірів з параметрами імпульсного сигналу - у першу чергу, не тільки із крутістю фронтів сигналу, але й з формою часового розподілу його перетворення Гільберта.

Під час проведення експериментів використовувався георадар «ОДЯГ-1» із центральною частотою антени 1,2 ГГц у повітрі. Розміри передавальної антени типу «Метелик» антенного блоку АБ у напрямку вектора електричного поля становлять 20 см. Блок прийомних антен (також типу «Метелик»)

складається із двох однакових антен, розташованих строго симетрично щодо площини передавальної антени. Цим досягається компенсація сигналу прямого проходження й підвищується чутливість вимірювань і точність результатів [264]. Тому для оцінювання мінімальних розмірів зразків з урахуванням відстані до зовнішньої поверхні досліджуваного зразка можна скористатися наближенням геометричної оптики [210]. У такій постановці геометрія завдання зображена на рисунку 3.4



H – висота антенного блоку над поверхнею конструкції; h_1, h_2 – товщина верхнього й нижнього шарів покриття (асфальтобетон); h_3 – товщина шару щебеню; h_4 – товщина шару піску; h_5 – товщина шару ґрунту;
 R – найменший поперечний розмір зразка

Рисунок 3.4 – Геометрія завдання зондування плоскошаруватого середовища

Для визначення затримки сигналу від найближчої бічної грані зразка можна скористатися наближеною формулою:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \sqrt{H^2 + R^2} - \frac{H}{c}, \quad (3.1)$$

де Δt – час проходження сигналу, нс;

c – швидкість світла у вакуумі, см/нс.

За умови, що тривалість розгорнення становить 10 нс, а загальна кількість відліків дорівнює 1024, одержуємо, що на один відлік доводиться $10/1024 = 9,7$ пікосекунд. Таким чином, за мінімальний інтервал з урахуванням тривалості фронтів імпульсу й вимог надійної роздільної здатності приймемо 0,5 нс. Підкреслимо, що мова йде про мінімальний інтервал і тільки стосовно завдання визначення діелектричної проникності верхнього шару.

Для надійного визначення діелектричної проникності необхідний поділ імпульсів на часовій осі. У цьому випадку з урахуванням реальних характеристик імпульсів (тривалість перших двох осциляцій $\approx 1,2$ нс) можна згідно з (3.1) розрахувати граничні розміри:

$$R = \sqrt{\left(0,5 \cdot (0,6 + \sqrt{(0,36 + 4 \cdot (0,09 + (1,2 \cdot 0,3)^2 - 0,18)}))\right)^2 - 0,09} = 0,5878$$

$$R = \sqrt{(\Delta t \cdot c + H)^2 - H^2} = 0,5878 \text{ м} \quad (3.2)$$

Таким чином, за умови поперечного розміру зразка 1,18 м інтерференція сигналів, відбитих від верхньої площини й від бічних граней не буде виявляти значного впливу на роботу алгоритму поділу сигналів.

Відзначимо, що рішення (3.2) ставиться до завдання визначення діелектричної проникності верхнього шару згідно з алгоритмом [264]. У випадку зондування багатошарового середовища для моделювання крайових ефектів необхідно використовувати більш універсальні й точні методи, наприклад метод кінцевих різниць у тимчасовій області або метод скінченних елементів. Однак рішення таких завдань пов'язане з більшими витратами обчислювальних ресурсів і в цьому випадку не зовсім виправдане, оскільки в реальних вимірах у польових умовах крайові ефекти відсутні. Крім того, після проходження додаткових (нижніх) границь електромагнітні хвилі будуть зазнавати переломлення й ослаблення. Тому пропонується оцінювати

адекватність використовуваних алгоритмів за даними каліброваних вимірів, тобто вимірів зразків з відомими параметрами і при необхідності використовувати коригувальні коефіцієнти.

3.2 Лабораторні дослідження з визначення фізичних, міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів

3.2.1 Визначення типу ґрунту та його основних фізичних характеристик

3.2.1.1 Визначення гранулометричного складу

Вміст твердих частинок різного розміру характеризує гранулометричний склад, який є одним із важливих показників під час оцінювання фізичних властивостей ґрунту.

Гранулометричний склад визначався методом гранулометричного аналізу. Для цього ґрунт поділили на гранулометричні фракції, які представляють групи частинок різного походження, але взяті в умовних границях по їх розміру. Підготовка проби до аналізу виконувалася відповідно до ДСТУ Б В.2.1-19:2009 [262].

Вміст піщанистої фракції визначали методом відмучування в мірному циліндрі пилюватих і глинистих частинок. Для розкладання по крупності піщанистої фракції використали ситовий метод [262].

Фракцію від 0,1 мм до 0,05 мм знаходять як різницю: із 100 % віднімають суму всіх фракцій, визначених за допомогою піпетки і ситовим методом [262].

Визначення гранулометричного (зернового) складу глинистих ґрунтів піпеточним методом проводили у Науково-дослідній будівельній лабораторії Луцького НТУ.

Результати розсіву наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізичні характеристики ґрунтів, що прийняті для досліджень

Фізичні характеристики ґрунту		Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3
Гранулометричний склад, %				
Діаметр частинок, мм	2-1	0,05	0,7	0
	1-0,5	1,05	2,4	0,15
	0,5-0,25	26,3	14,2	2,85
	0,25-0,1	44,1	17,3	13,3
	0,1-0,05	9,1	3,1	8,1
	0,05-0,01	12	40,3	46,9
	0,01-0,005	48	16,8	17,7
	<0,005	2,6	5,2	11
Вологість на границі текучості, %		24,2	33,5	35,0
Вологість на границі розкочування, %		22	18,7	17,2
Число пластичності		2,2	14,8	17,8
Оптимальна вологість при максимальній щільності, %		15,2	15,7	16,3
Максимальна щільність при оптимальній вологості, г/см ³		1,77	1,772	1,767
Тип ґрунту		Супісок	Суглинок	Глина

3.2.1.2 Визначення числа пластичності ґрунту

За числом пластичності встановлюється тип пилувато-глинистого ґрунту. Число пластичності ґрунту визначається, як різниця між вологістю на границі текучості та вологістю на границі пластичності:

$$I_p = W_T - W_p \quad (3.3)$$

де W_T – вологість ґрунту на границі текучості, що визначається за [108], %;

W_p – вологість ґрунту на границі пластичності, що визначається за [108] методом розкачування кульки зволоженого ґрунту діаметром 10 мм в джгутик до діаметра 3 мм за якої він почав розпадатися на куски довжиною 7 – 10 мм.

За дорожньою класифікацією ґрунтів [230, 265], відповідно до гранулометричного складу, а також вологості на границі текучості W_T і числа пластичності I_p , встановили до якої категорії відноситься досліджуваний ґрунт і визначили найменування ґрунту.

3.2.1.3 Визначення максимальної щільності ґрунту за оптимальної вологості.

Для формування «малої» моделі випробування деформаційних параметрів необхідно задатися оптимальною вологістю ґрунту за якої досягається максимальне ущільнення ґрунту, для того щоб запобігти виникненню осідання ґрунту під штампом від навантаження під час випробування. Для визначення максимальної щільності ґрунту і оптимальної вологості, за якої досягається найбільша щільність, використовували прилад СоюздорНДІ. Визначення максимальної щільності за оптимальної вологості проводилося згідно з ДСТУ Б В.2.1-12:2009 [263]. Результати щодо визначення типу ґрунту та його основних фізичних характеристик наведені у таблиці 3.1.

Ґрунт, який відібраний із земляного полотна автомобільної дороги М-03 Київ – Харків – Довжанський км 481+500, відноситься до супіску піщанистого дрібного, із західної об’їзної а/д м. Харкова на км 7+600 – суглинку важкого пілуватого і з а/д М-18 Харків – Сімферополь км 18+800 – до глини легкої пілуватої.

3.2.2 Визначення деформаційних параметрів ґрунтів

3.2.2.1 Підготовка моделі та приладу для випробування

Модуль деформації і модуль пружності являються параметрами деформування ґрунтів при стиску в умовах обмеженого бокового розширення. Ці параметри зазвичай визначають за результатами компресійних випробувань або шляхом вдавлювання в ґрунт жорсткого штамп.

Модуль пружності ґрунту не є сталою величиною, а залежить від вологості, величини тиску, швидкості прикладання навантаження, розміру штамп та щільності ґрунту.

Для визначення модуля пружності E_{np} ґрунтів різних типів (супісок, суглинки, глина) були заформовані 3 двошарові «малі» моделі ґрунту в дерев’яній формі розміром 60×60×45 см (рис. 3.5). На дно форми була

закладена гумова прокладка товщиною 4 см для моделювання пружної основи і запобігання виникненню крайових ефектів. На гумовій основі був влаштований шар із глинистого ґрунту товщиною 20 см (характеристики ґрунту приведені в табл. 3.1). Даний шар виконував роль ґрунтового напівпростору. Влаштування основи з ґрунту проводилося з пошаровим трамбуванням ручною трамбівкою з однаковою кількістю ударів по одному сліду (рис. 3.6). Під час формування моделі, щільність ґрунту перевірялася приладом Ковальова (рис. 3.7). Для досягнення максимального ущільнення ґрунту, його попередньо подрібнили і зволожили до оптимальної вологості, яка була визначена у п. 3.2.1, і що становить 16,3%.

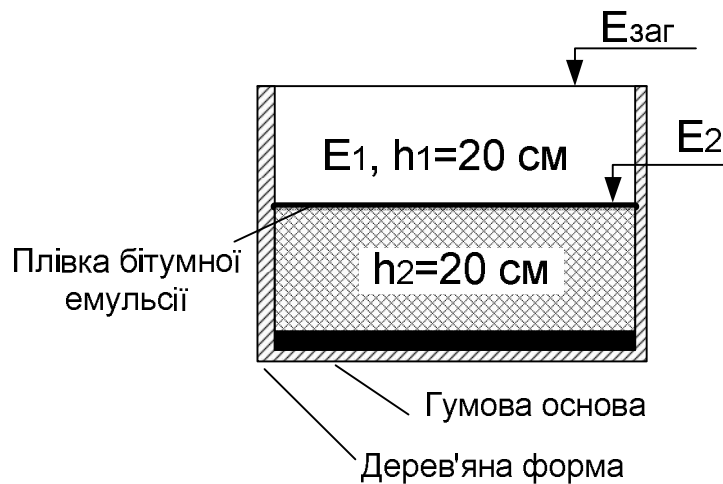


Рисунок 3.5 – «Мала» модель ґрунту для визначення модуля пружності



Рисунок 3.6 – Формування нижнього шару ґрунтової моделі



Рисунок 3.7 – Перевірка щільності ґрунту під час трамбування

Заформована модель з ґрунту була оброблена бітумною емульсією (поверх нижнього шару) і обгорнута в поліетиленову плівку, для збереження необхідної вологості, а відповідно і для збереження постійного значення модуля пружності нижньої основи.

Верхній шар досліджуваного ґрунту був заформований аналогічно. Максимальна щільність ґрунтів досягалася при їх оптимальних вологостях, які були визначенні у п. 3.2.1 (для супіску – 15,2% (або 0,63 W_t), суглинку – 15,7% (0,47 W_t), глини – 16,3% (0,47 W_t)). Після формування, готову модель ґрунту доводили до вологості, яка відповідає 0,5 W_t . Випробування деформаційних параметрів ґрунту проводили на важільному пресі, що був сконструйований для проведення випробувань. Важільний прес дозволяє отримати плавне статичне «навантаження – розвантаження» конструкції. Результати тарування і коефіцієнт важеля наведено у додатку А.

3.2.2.2 Проведення експерименту щодо визначення деформаційних параметрів ґрунтів

Основу методики проведення експерименту склали методи експериментального визначення деформаційних параметрів матеріалів і ґрунтів за різної вологості відповідно до [13, 266].

Для рівномірного зволоження ґрунту по глибині вода подавалася через мідні трубки з отворами, які були закладені в ґрунт під час формування моделі (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Закладання мідних трубок в ґрунтову модель

Потрібний об'єм води, що необхідний для збільшення вологості ґрунту до конкретного значення, визначається за формулою [110, 266]:

$$Q = \frac{m}{1 + 0,01 \cdot W_0} \cdot 0,01 \cdot (W_1 - W_0), \quad (3.4)$$

де Q – необхідна кількість води, кг;

m – вага ґрунту, що зволожується, кг;

W_0 – існуюча вологість ґрунту, %;

W_1 – вологість ґрунту для проведення експерименту, %.

В процесі зволоження вологість ґрунту перевірялася термоважовим методом [108] та вологоміром (рис. 3.9).

Навантаження на ґрунт передавали через жорсткі круглі штампи діаметром 75 мм та 100 мм. Навантаження на штамп прикладали чотирма ступенями: 0,05 МПа, 0,01 МПа, 0,15 МПа та 0,20 МПа до загасання деформації (вертикальне переміщення штампів не більше ніж на 0,01 мм за 300 с) з почерговим розвантаженням після кожного прикладення навантаження до загасання деформації. Вертикальне переміщення штампів вимірювалося двома датчиками електронного типу DIGICO 10 з ціною поділки 0,001 мм. Датчики розташовувалися на кромках штампів по лінії діаметру (рис. 3.10). Значення

переміщення приймалося, як середнє арифметичне двох датчиків.



Рисунок 3.9 – Вимірювання вологості ґрунту



Рисунок 3.10 – Вимірювання вертикального переміщення штампу датчиками електронного типу DIGICO 10

За отриманими значеннями повних і зворотних деформацій за різної вологості ґрунту (від 0,51 до 0,76 W_T) визначено загальні модулі деформацій і модулі пружності на поверхні ґрунтової моделі за формулами [13]:

$$E_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p \cdot (1 - \mu^2) \cdot D}{l_0}, \quad (3.5)$$

$$E_{np} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{p \cdot (1 - \mu^2) \cdot D}{l}, \quad (3.6)$$

де E_0 – модуль деформації ґрунтової моделі, МПа;

E_{np} – модуль пружності ґрунтової моделі, МПа;

p – тиск, який передається на ґрунтову модель через штамп, МПа;

μ – коефіцієнт Пуассона (для супіску $\mu=0,31$ [266], суглинку $\mu=0,37$ [266], глини $\mu=0,41$ [266]);

D – діаметр штамп, м;

l_0 – повна деформація ґрунтової моделі, м;

l – пружна деформація ґрунтової моделі, м.

За результатами випробувань встановлено зв'язок між вологістю та загальним модулем пружності (рис. 3.11 – 3.13).

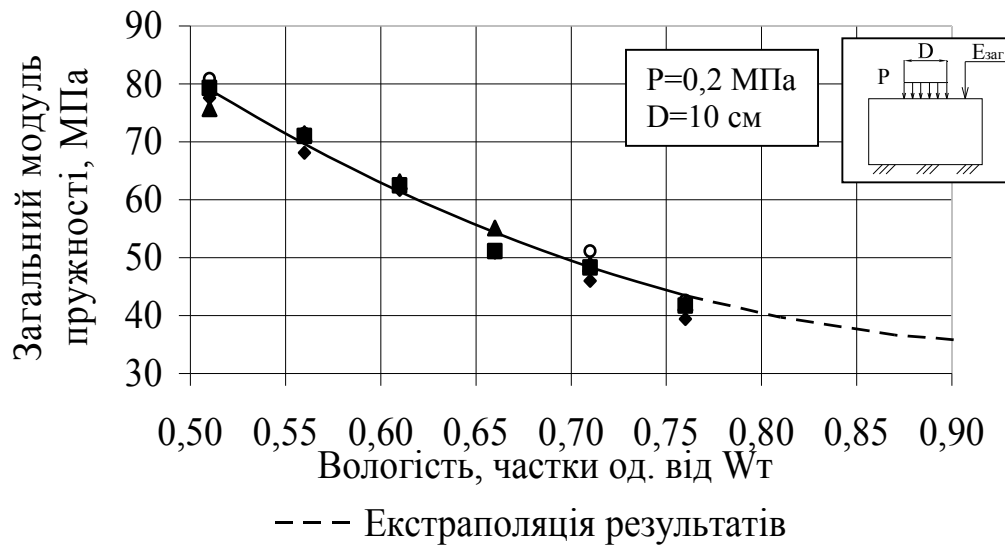


Рисунок 3.11 – Графік залежності загального модуля пружності ґрунтової моделі від вологості (супісок)

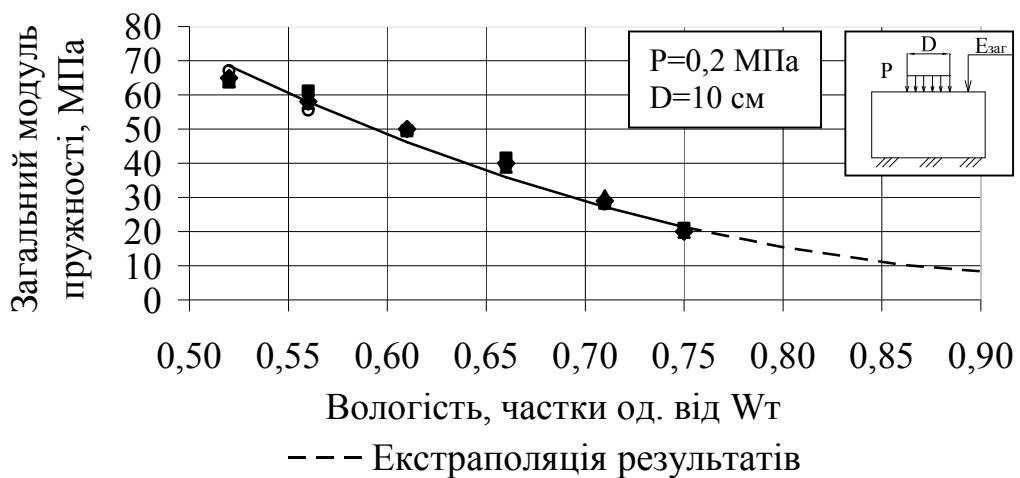


Рисунок 3.12 – Графік залежності загального модуля пружності ґрунтової моделі від вологості (суглинок)

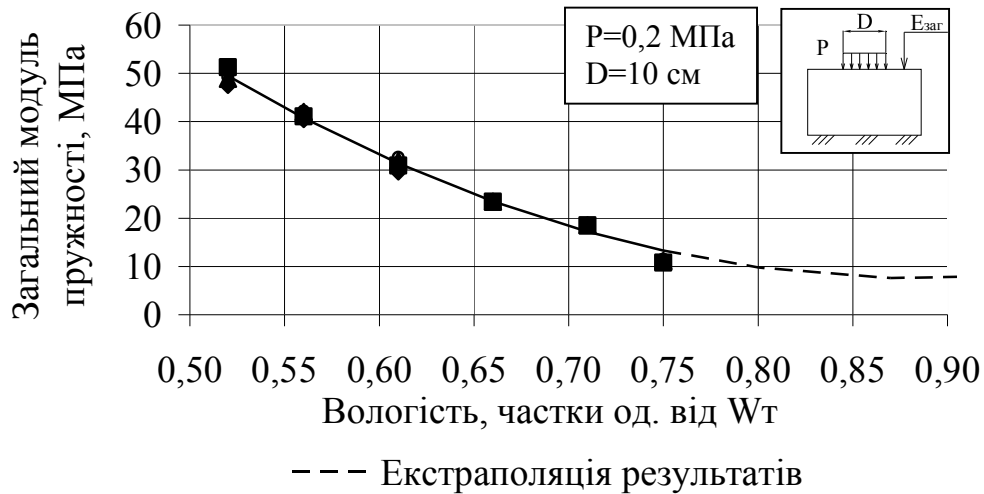


Рисунок 3.13 – Графік залежності загального модуля пружності ґрунтової моделі від вологості (глина)

За результатами апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів отримано залежності між вологістю та загальним модулем пружності ґрунтової моделі та коефіцієнт кореляції (R^2):

– для супіску:

$$E_{заг} = 223W^2 - 426W + 238; \quad R^2=0,9943; \quad (3.7)$$

– для суглинку:

$$E_{заг} = 303W^2 - 596W + 295; \quad R^2=0,9884; \quad (3.8)$$

– для глини:

$$E_{заг} = 315W^2 - 557W + 254; \quad R^2=0,9943; \quad (3.9)$$

де E – модуль пружності ґрунтової моделі, МПа;

W – вологість ґрунту в частка одиниць від W_t .

R^2 – коефіцієнт кореляції.

В процесі експериментальних досліджень, під час обробки і аналізу результатів, проведена перевірка достовірності отриманих даних. Під час розрахунку загального модуля пружності ґрунтової моделі були застосовані методи статистичної обробки отриманих значень. Для заданої довірчої ймовірності $P_d = 0,95$, коли значення виміряного модуля пружності попадає в даний довірчий інтервал, були визначені дійсні значення досліджуваного модулю пружності і співставленні з експериментальними (додаток Б).

Під час оцінювання вимірювань для малої вибірки ($n=4<30$) використовували коефіцієнт Стюдента [267]. Було розраховане середньоарифметичне значення середньоквадратичного відхилення (σ_0) та довірчий інтервал значень ($\mu_{ст}$) для вимірювальних значень модуля пружності ґрунтової моделі за різної вологості (додаток Б). Отримані результати статистичної обробки доводять, що виміряні експериментальних шляхом значення модуля пружності ґрунтової моделі із супіску, суглинку і глини знаходяться в межах довірчого інтервалу встановленого з 95 % довірчою ймовірністю, тобто є достовірними.

За формулою (3.6), при виміряних деформаціях нижнього шару основи із глинистого ґрунту, був обрахований E_{np} нижнього шару.

За отриманими значеннями загального модулю на поверхні і модулю шару підстильного ґрунту за допомогою комп'ютерної програми, написаної в середовищі MathCad, були обчислені значення модуля пружності (E_1) верхнього шару ґрунту за відомими значеннями модулів пружності нижньої основи (E_2) і загального модуля пружності на поверхні моделі ($E_{заг}$, див. рис. 3.5).

Результати розрахунку наведені в таблицях 3.2 – 3.4 та на рис. 3.14 – 3.16.

Таблиця 3.2 – Результати випробування ґрунтової моделі із супіску

Вологість ґрунту на межі текучості, W_T	Модуль пружності на поверхні нижнього шару, МПа	Загальний модуль пружності конструкції, МПа	Модуль пружності верхнього шару, МПа	Діелектрична проникність, ϵ
0,51 W_T	42	78	106	4,4
0,56 W_T		70	92	4,8
0,61 W_T		62	78	7,3
0,66 W_T		52	61	7,7
0,71 W_T		49	57	8,1
0,76 W_T		42	47	9,3

Таблиця 3.3 – Результати випробування ґрунтової моделі із суглинку

Вологість ґрунту на межі текучості, W_T	Модуль пружності на поверхні нижнього шару, МПа	Загальний модуль пружності конструкції, МПа	Модуль пружності верхнього шару, МПа	Діелектрична проникність, ϵ
0,52 W_T	42	65	83	13,3
0,56 W_T		58	71	16,0
0,61 W_T		50	59	19,1
0,66 W_T		40	44	22,9
0,71 W_T		29	30	27,6
0,75 W_T		20	20	29,0

Таблиця 3.4 – Результати випробування ґрунтової моделі із глини

Вологість ґрунту на межі текучості, W_T	Модуль пружності на поверхні нижнього шару, МПа	Загальний модуль пружності конструкції, МПа	Модуль пружності верхнього шару, МПа	Діелектрична проникність, ϵ
0,52 W_T	42	49	58	15,0
0,56 W_T		41	46	17,8
0,61 W_T		31	33	21,2
0,66 W_T		23	23	24,2
0,71 W_T		18	17	29,0
0,75 W_T		11	10	30,5

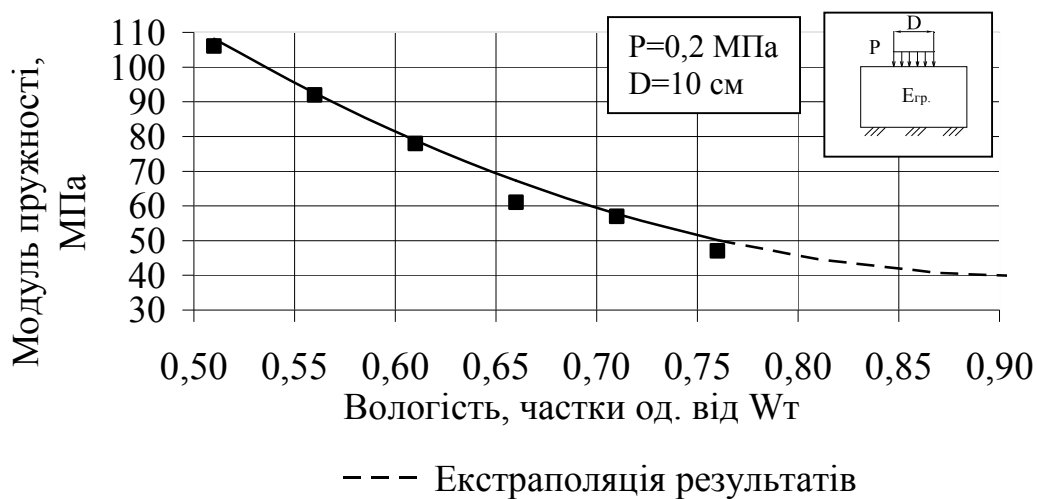


Рисунок 3.14 – Графік залежності модулю пружності шару супіску від вологості

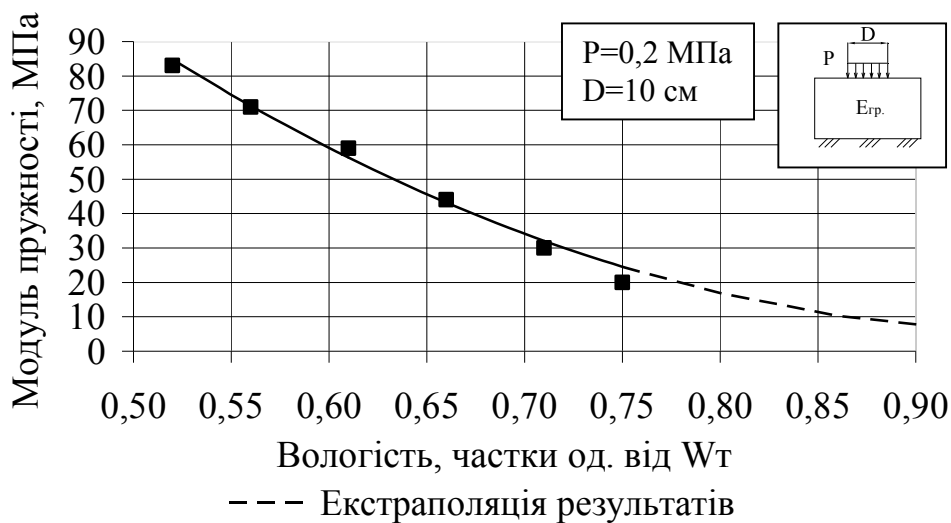


Рисунок 3.15– Графік залежності модулю пружності шару суглинку від вологості

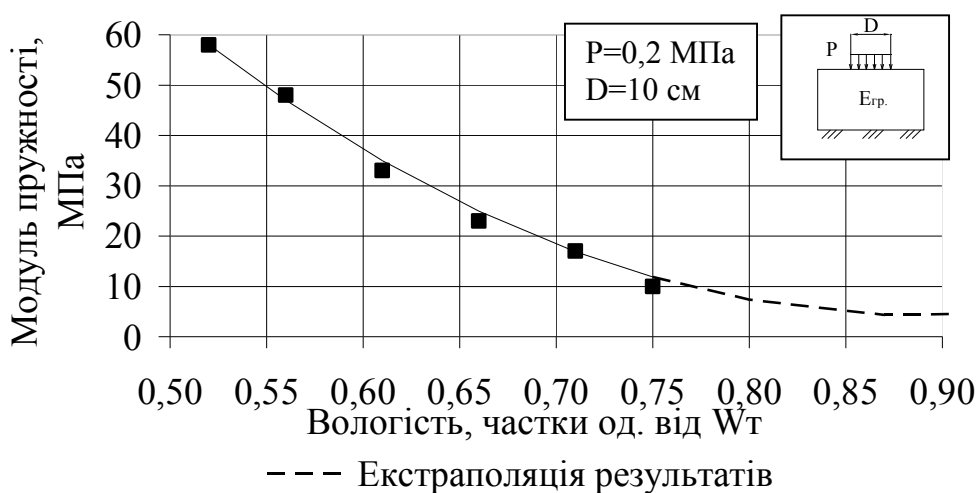


Рисунок 3.16 – Графік залежності модулю пружності шару глини від вологості

За результатами апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів отримано залежності між вологістю та модулем пружності ґрунтів та коефіцієнт кореляції (R^2):

– для супіску:

$$E_{zp} = 404W^2 - 745W + 383; \quad R^2 = 0,9936; \quad (3.10)$$

– для суглинку:

$$E_{zp} = 392W^2 - 760W + 374; \quad R^2 = 0,993; \quad (3.11)$$

– для глини:

$$E_{zp} = 394W^2 - 701W + 316; \quad R^2 = 0,9906; \quad (3.12)$$

де E_{zp} – модуль пружності ґрунту, що досліджувався, МПа;

W – вологість ґрунту в частка одиниць від W_T .

R^2 – коефіцієнт кореляції.

Модуль пружності ґрунтів змінюється в широких діапазонах значень в залежності від вмісту води:

а) супіску з 106 МПа, за вологості 0,51 W_T , до 47 МПа, за вологості 0,76 W_T . Модуль пружності ґрунту знижується більш ніж вдвічі. Це пояснюється збільшенням осідання штампів при навантаженні, за рахунок збільшення водяних оболонок навколо частинок твердої фази ґрунту;

б) модуль пружності глини змінюється в діапазонах значень від 58 МПа (за вологості 0,52 W_T) до 10 МПа (0,75 W_T);

в) суглинку з 83 МПа до 20 МПа за відповідних значень вологості, як для глини. Можна зробити висновок, що за високих значень вологості, глини та суглинку мають низький модуль пружності.

Єдиним для всіх типів ґрунтів є те, що зі зростанням вологості зменшується загальний еквівалентний модуль пружності ґрунтової основи за рахунок збільшення товщини водяних оболонок навколо твердої фази ґрунту, які витискуються під час навантаження.

Залежності, що отримані під час проведення даної серії експериментів є основою для встановлення зв'язку між деформаційними та електрофізичними параметрами ґрунтів.

3.2.3 Визначення міцнісних параметрів ґрунтів

Основним критерієм міцності ґрунтів є їхній опір зсуву, який істотно залежить від типу і вологості ґрунту. Тому завданням серії експериментів було встановлення залежності між вологістю та міцнісними параметрами ґрунту, що є основою для встановлення зв'язку між їхніми електрофізичними і міцнісними параметрами. Опір зсуву залежить від сил тертя і зчеплення, що присутні між частинками, які складають ґрунт. Під дією зовнішнього навантаження у визначених зонах ґрунту зв'язки між частинками порушуються і виникає зсув одних частинок ґрунту відносно інших – ґрунт починає деформуватися при даному навантаженні. Опір ґрунтів зсуву визначається за рівнянням Кулона [9, 230]:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (3.13)$$

де τ – напруження зсуву, МПа;

σ – нормальне стискуjące напруження, яке діє в площині зсуву, МПа;

$\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя;

φ – кут внутрішнього тертя;

$\sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$ – сила тертя, МПа;

C – питоме зчеплення, МПа.

Визначення міцнісних параметрів ґрунтів проводили в лабораторії

методом одноплощинного зрізу на приладі конструкції І.М. Литвинова (рис. 3.1), згідно чинних нормативних документів [23].

Для випробування були взяті проби ґрунту непорушеного стану ріжучими кільцями з моделей, які були заформовані для дослідження деформаційних параметрів ґрунтів.

Визначення міцнісних параметрів ґрунтів за різних значень вологості проводилося в стабілізованому стані за консолідовано-дренованою схемою. За граничне навантаження приймали навантаження за якого відбувався миттєвий зрив однієї частини зразка по відношенню до іншої або загальна деформація зрізу перевищувала 5 мм. Горизонтальну і вертикальну деформації вимірювали датчиками електронного типу DIGICO 10. Зразки ґрунту, в яких під час дослідження відбувся зріз представлені на рис. 3.17.



Рисунок 3.17 – Зразки ґрунту супіску (ліворуч) та суглинку (праворуч) на яких відбувся зсув від прикладеного граничного навантаження зсуву

Для супіску характерне крихке руйнування, а для глини і суглинку деформаційне руйнування від граничного навантаження. Це пояснюється значним збільшенням сили зчеплення між частинками глинистого ґрунту. В момент досягнення зрізу у зразках із супіску, в ґрунті проходив процес переупакування структури частинок. Це підтверджує значення датчиків вертикального переміщення – до досягнення моменту зрізу вертикальна деформація збільшувалася, а в момент зрізу деформація зменшується (рис. 3.18).

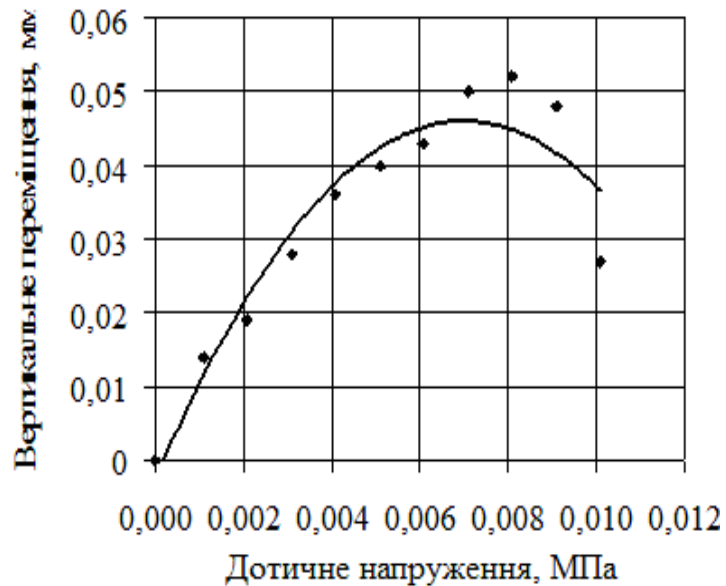


Рисунок 3.18 – Графік змінення вертикального переміщення від дотичного навантаження за якого досягається зріз супіску

В зразках із суглинку і глини цього процесу не спостерігається, адже кількість піщанистих частинок менше 50 %.

Питоме зчеплення та кут внутрішнього тертя ґрунту визначали за формулами [23, 268]:

$$tg\varphi = \frac{n\sum\tau_i\sigma_i - \sum\tau_i\sum\sigma_i}{n\sum(\sigma_i)^2 - (\sum\sigma_i)^2}, \quad (3.14)$$

$$C = \frac{\sum\tau_i\sum\sigma_i^2 - \sum\tau_i\sigma_i\sum\sigma_i}{n\sum(\sigma_i)^2 - (\sum\sigma_i)^2}, \quad (3.15)$$

де $tg\varphi$ – тангенс кута внутрішнього тертя, од.;

n – число випробувань, шт.;

σ_i – нормальне напруження, МПа;

τ_i – дослідні значення опору зрізу, МПа.

У додатку В на рис. В.1 – В.3 наведено порівняння визначених в дослідженні значень модуля пружності, питомого зчеплення і кута

внутрішнього тертя з даними різних авторів [18, 65, 76, 77]. Відмінності в абсолютних значеннях міцнісних параметрів є результатом відмінностей гранулометричного і мінерального складу вихідних матеріалів. Але загальні закономірності залежностей міцнісних параметрів ґрунтів від вологості ґрунту співпадають.

Результати отримані під час проведення експерименту наведені на графіках (рис. 3.19, 3.20).

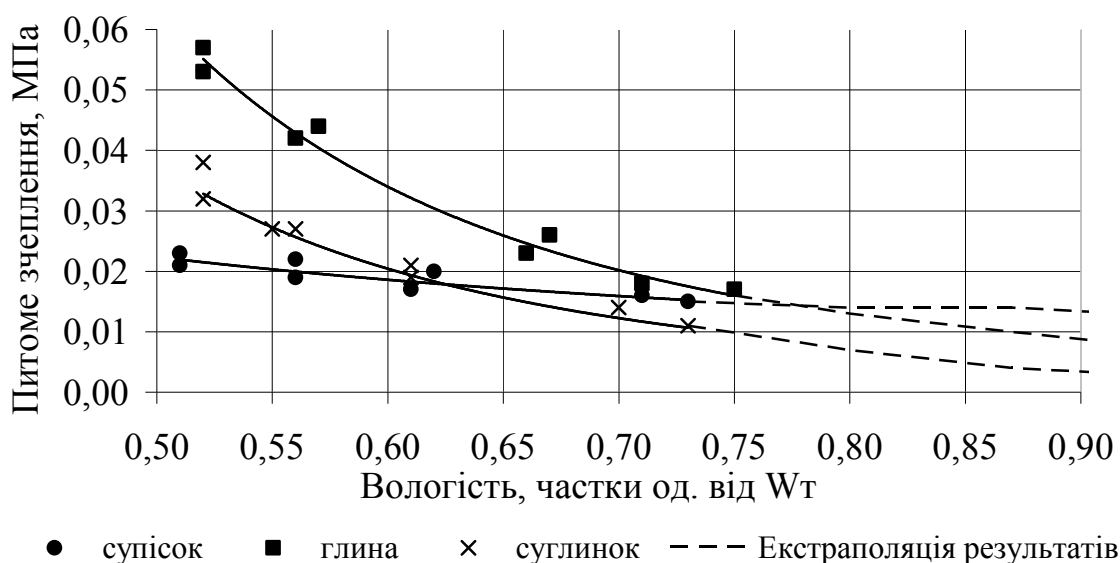


Рисунок 3.19 – Графіки залежностей питомого зчеплення від вологості ґрунту

За результатами апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів отримано залежності між вологістю та питомим зчепленням ґрунтів та коефіцієнт кореляції (R^2):

– для супіску:

$$C = 0,0112W^{-0,9711}; \quad R^2=0,9595; \quad (3.16)$$

– для суглинку:

$$C = 0,0026W^{-3,9797}; \quad R^2=0,9691; \quad (3.17)$$

— для глини:

$$C = 0,0059W^{-3,3991}; \quad R^2=0,997; \quad (3.18)$$

де C – питоме зчеплення ґрунту, що досліджується, МПа;

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

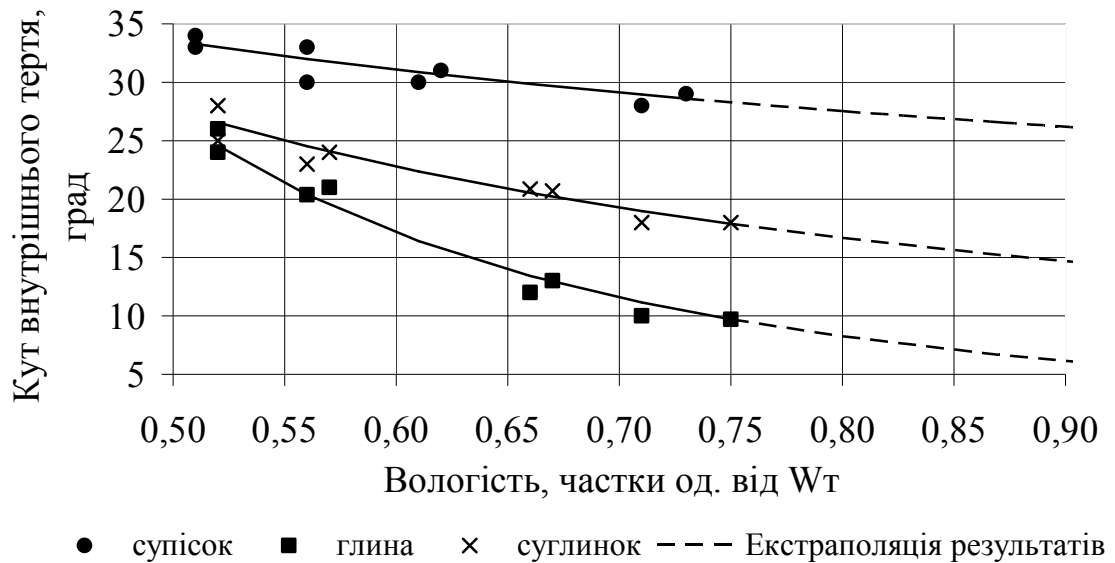


Рисунок 3.20 – Графіки залежностей кута внутрішнього тертя від вологості ґрунту

За результатами апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів отримано залежності між вологістю та кутом внутрішнього тертя ґрунтів та коефіцієнт кореляції (R^2):

— для супіску:

$$\varphi = 25,05W^{-0,422}; \quad R^2=0,9858; \quad (3.19)$$

— для суглинка:

$$\varphi = 13,111W^{-1,0795}; \quad R^2=0,9811 \quad (3.20)$$

— для глини:

$$\varphi = 4,687W^{-2,5336}; \quad R^2=0,9646; \quad (3.21)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, що досліджується, град;

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

R^2 – коефіцієнт кореляції.

Аналіз проведених експериментальних досліджень щодо встановлення питомого зчеплення та кута внутрішнього тертя свідчить, що зі збільшенням вологості ґрунту значення питомого зчеплення та кута внутрішнього тертя зменшується. Це призводить до зниження опору зсуву у ґрунті, а отже і втрати загальної несучої здатності ґрунту, що є причиною накопичення залишкових (пластичних) деформацій у земляному полотні автомобільної дороги в період надмірного зволоження ґрунту.

3.3 Лабораторні дослідження з визначення електрофізичних параметрів ґрунтів

Для дослідження параметрів моделі оцінювання вологості ґрунтів за величиною діелектричної проникності (2.29, 2.43) та перевірки адекватності запропонованої узагальненої моделі електрофізичних параметрів ґрунтів (2.24-2.26) були проведенні серії лабораторних експериментів.

Експериментальні дослідження електрофізичних параметрів ґрунтів ґрунтувалися на загально прийнятих уявленнях:

а) електрофізичні параметри матеріалу значною мірою залежать від їх вологості [131, 156, 223]. Із збільшенням вологості діелектрична проникність (ϵ) матеріалу зростає, так як ϵ води рівний 81, а ϵ повітря – 1.

б) ґрунт є складною дисперсною системою, до якої належить три фази – тверда, газоподібна та рідка, тому від співвідношення цих фаз у ґрунті залежить діелектрична проникність (ϵ).

Серія експериментальних досліджень була проведена з метою:

а) оцінювання параметрів моделі (2.29), що встановлює зв'язок між

діелектричною проникністю та вологістю ґрунту;

б) оцінювання параметрів моделі (2.43), що встановлює зв'язок «діелектрична проникність – вологість – міцнісні та деформаційні параметри ґрунту»;

в) перевірки адекватності запропонованої узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту (2.24-2.26).

Під час визначення діелектричної проникності ґрунту застосовувався георадар «ОДЯГ-1» (п.3.1.1).

Для проведення дослідження використовувалися моделі, які були заформовані для визначення модуля пружності ґрунту розміром в плані 60 см × 60 см і товщиною 40 см. Розміри моделей визначалися за умови запобігання виникненню крайових ефектів згідно [173] та п.3.1.2.

В процесі експерименту були записані: калібрувальні сигнали, які випромінювалися передавальною антеною в простір без перешкоджання сигналу та були прийняті приймальною антеною; сигнали відбитті від абсолютного відбивача (лист металу); сигнали, які відбитті від ґрунтової моделі. Аналіз сигналів та подальше оброблення в програмі GeoVizu (рис. 3.21) дозволили визначити діелектричну проникність ґрунтів з різною вологістю.

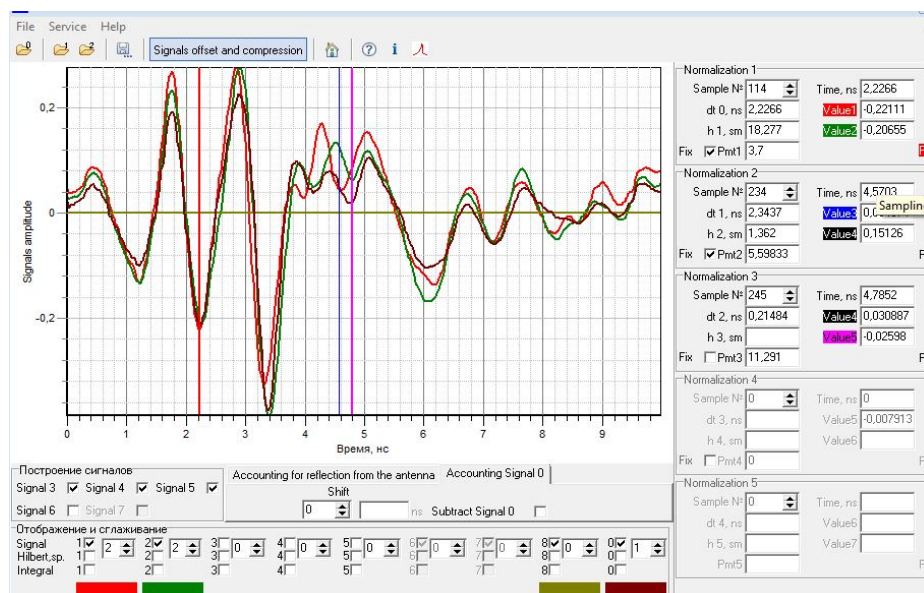


Рисунок 3.21 – Вікно програми розрахунку діелектричної проникності шару ґрунту

3.3.1 Оцінювання параметрів моделі щодо визначення вологості ґрунтів за величиною діелектричної проникності

У розділі 2 було запропоновано модель, що встановлює зв'язок між вологістю та діелектричною проникністю (2.29), що визначається за допомогою польового георадару, а також обґрунтовано, що зв'язок між діелектричною проникністю та вологістю ґрунту з достатнім ступенем точності виражається степеневими залежностями. Для оцінювання коефіцієнтів моделі (2.29) були проведені експерименти з визначення діелектричної проникності на моделях ґрунту з відомою вологістю. В процесі експериментальних досліджень вологість ґрунту збільшували таким чином, щоб досягти максимально рівномірного розподілу вологості за глибиною моделі (п. 3.2.2.2).

Отриманні значення діелектричної проникності (див. табл. 3.2 – 3.4), дозволили встановити зв'язок між діелектричною проникністю (ϵ) ґрунту та вологістю (рис. 3.22 – 3.24) та обґрунтувати параметри моделі (2.29), що в свою чергу надає змогу за величиною ϵ (визначеної експериментально), встановити вологість ґрунтів та їх міцнісні та деформаційні параметри.

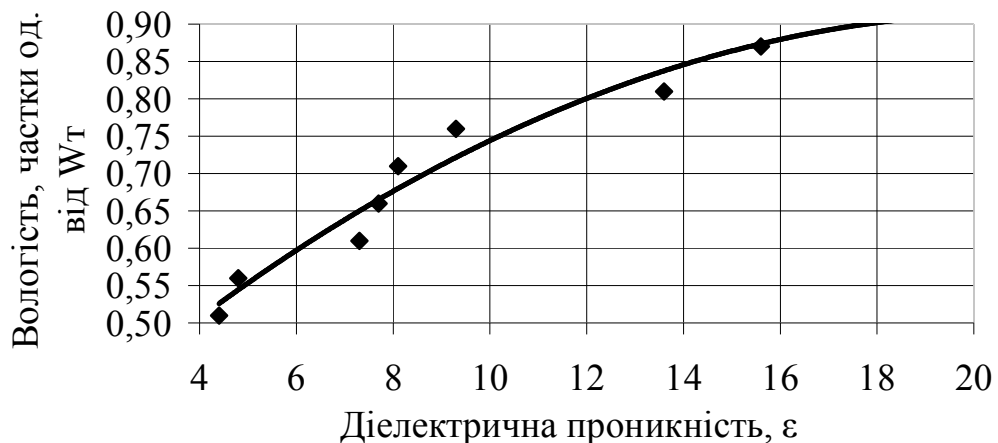


Рисунок 3.22 – Графік зв'язку діелектричної проникності з вологістю ґрунту. Ґрунт - супісок

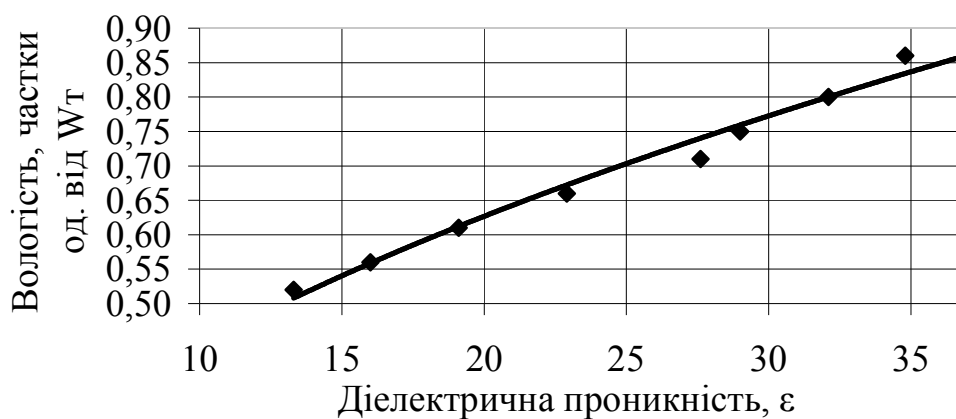


Рисунок 3.23 – Графік зв'язку діелектричної проникності з вологістю ґрунту. Ґрунт – суглинок

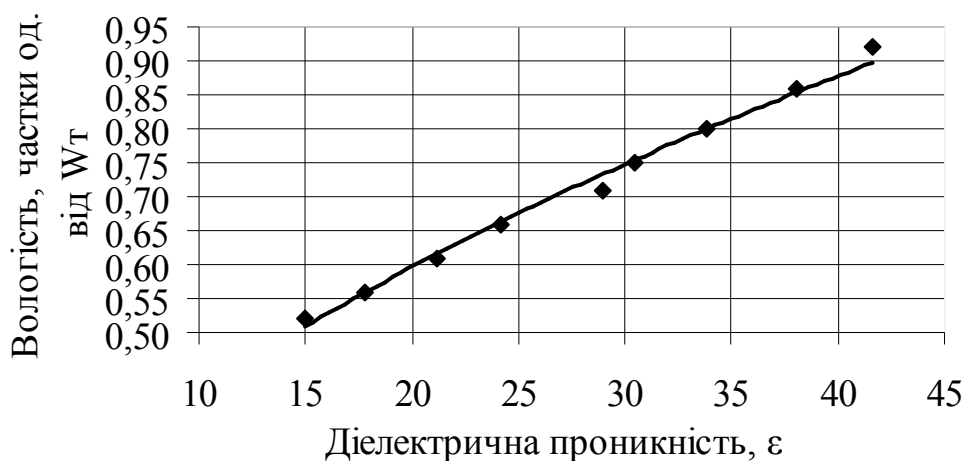


Рисунок 3.24 – Графік зв'язку діелектричної проникності з вологістю ґрунту. Ґрунт – глина

За результатами апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів отримано зв'язок між діелектричною проникністю та вологістю ґрунтів та коефіцієнт кореляції (R^2):

– для супіску:

$$W = -0,0014\epsilon^2 + 0,06\epsilon + 0,29; \quad R^2 = 0,9661; \quad (3.22)$$

– для суглинку:

$$W = 0,0003\epsilon^2 + 0,0133\epsilon + 0,34; \quad R^2 = 0,9937; \quad (3.23)$$

– для глини:

$$W = 0,00004\varepsilon^2 + 0,0127\varepsilon + 0,32; \quad R^2 = 0,9981; \quad (3.24)$$

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

ε – діелектрична проникність ґрунту, од;

R^2 – коефіцієнт кореляції.

Експериментальні дані діелектричної проникності ґрунту, що отриманні за допомогою георадару, не потребують застосування методів статистичної обробки, так як імпульс приймально-передавальної антени є стабільним.

Результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні положення та доводять:

а) зі збільшенням вологості ґрунту збільшується значення діелектричної проникності;

б) величина діелектричної проникності залежить від типу ґрунту та частки пилюватих частинок;

в) правомірність гіпотези, що зв'язок між діелектричною проникністю та вологістю з високою точністю характеризується степеневими моделями третього порядку.

Результати експериментальних досліджень (див. рис. 3.22 – 3.24) узгоджуються з результатами досліджень інших авторів [156, 184, 204].

3.3.2 Встановлення зв'язку між діелектричною проникністю та фізичними, міцнісними та деформаційними параметрами ґрунтів

Залежності, що були отримані в п. 3.2.2, п. 3.2.3 та результати експериментальних досліджень (див. рис. 3.22 – 3.24) дозволили встановити зв'язок між діелектричною проникністю та модулем пружності (рис. 3.25 – 3.27), питомим зчепленням (рис. 3.28 – 3.30) і кутом внутрішнього тертя (рис. 3.31 – 3.33) та обґрунтувати параметри моделі (2.43).

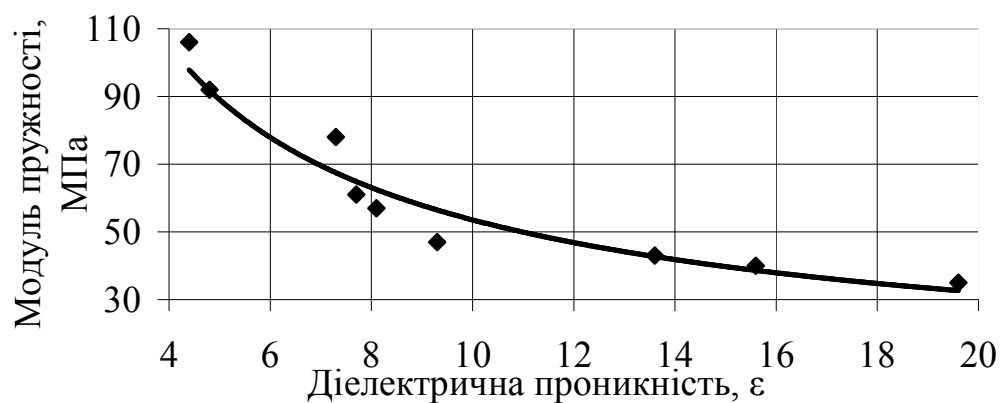


Рисунок 3.25 – Графік зв'язку діелектричної проникності з модулем пружності ґрунту. Ґрунт – супісок

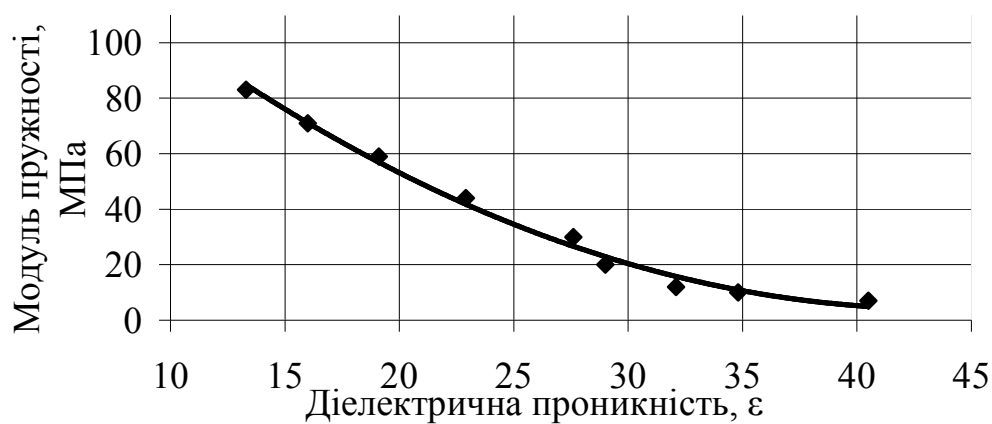


Рисунок 3.26 – Графік зв'язку діелектричної проникності з модулем пружності ґрунту. Ґрунт – суглинок

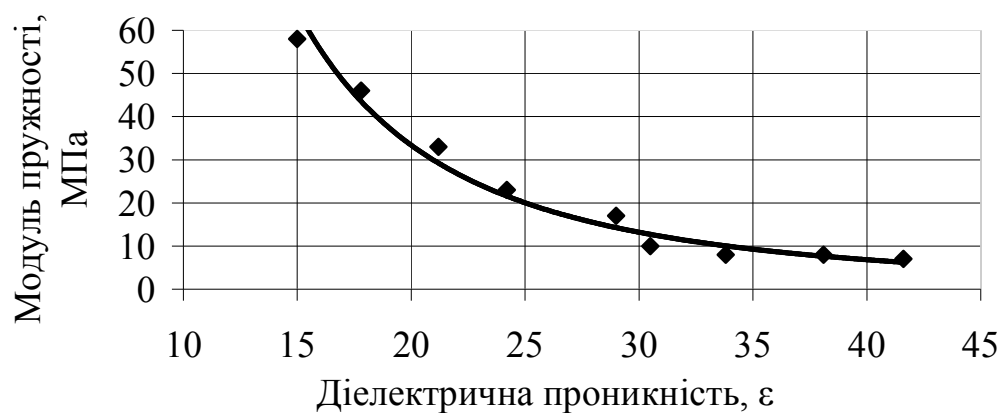


Рисунок 3.27 – Графік зв'язку діелектричної проникності з модулем пружності ґрунту. Ґрунт – глина

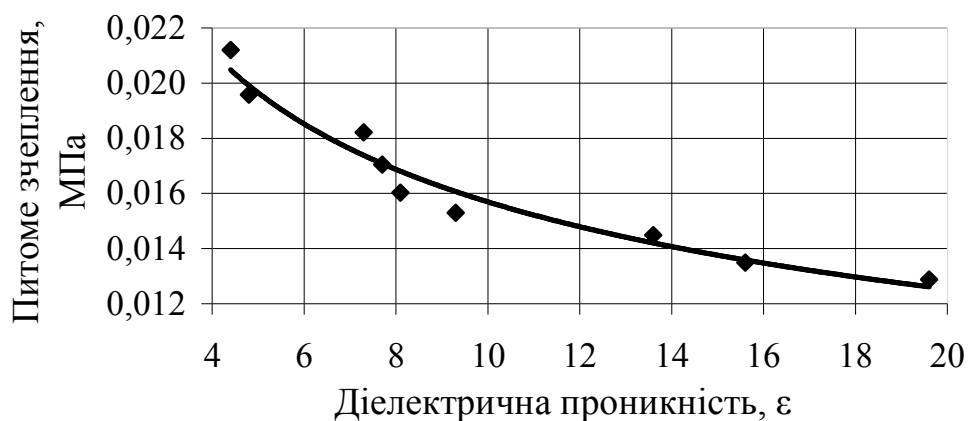


Рисунок 3.28 – Графік зв'язку діелектричної проникності з питомим зчепленням ґрунту. Ґрунт – супісок

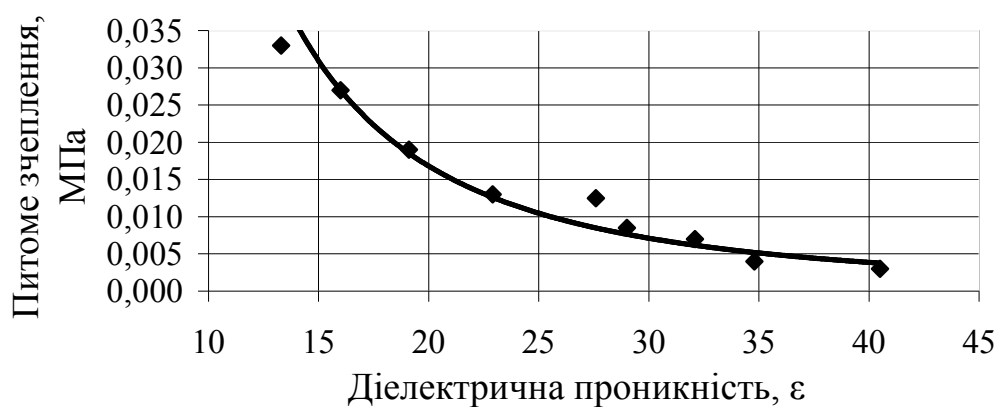


Рисунок 3.29 – Графік зв'язку діелектричної проникності з питомим зчепленням ґрунту. Ґрунт – суглинок

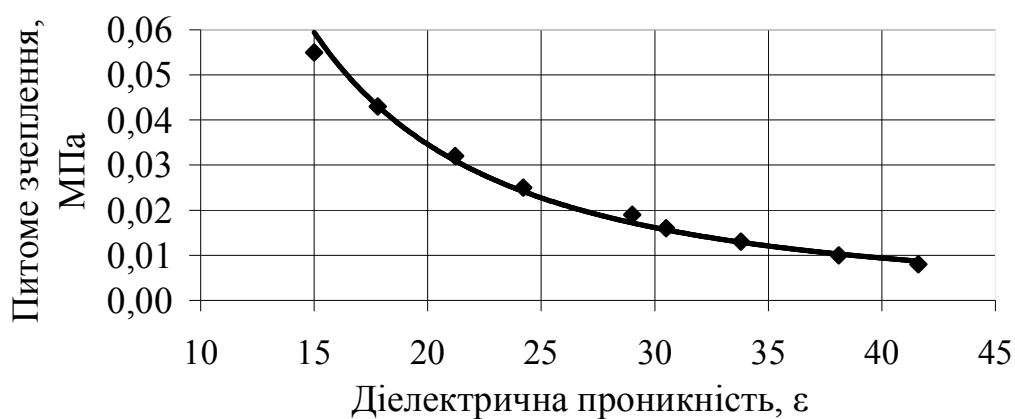


Рисунок 3.30 – Графік зв'язку діелектричної проникності з питомим зчепленням ґрунту. Ґрунт – глина

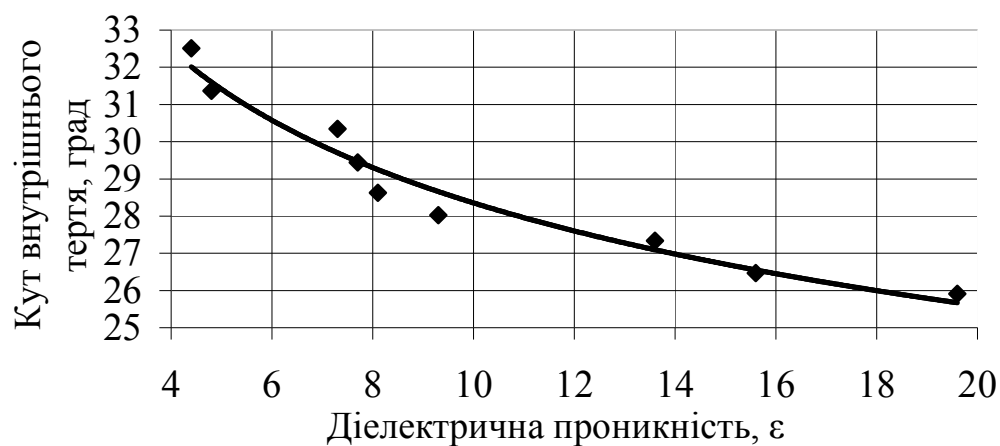


Рисунок 3.31 – Графік зв'язку діелектричної проникності з кутом внутрішнього тертя ґрунту. Ґрунт – супісок

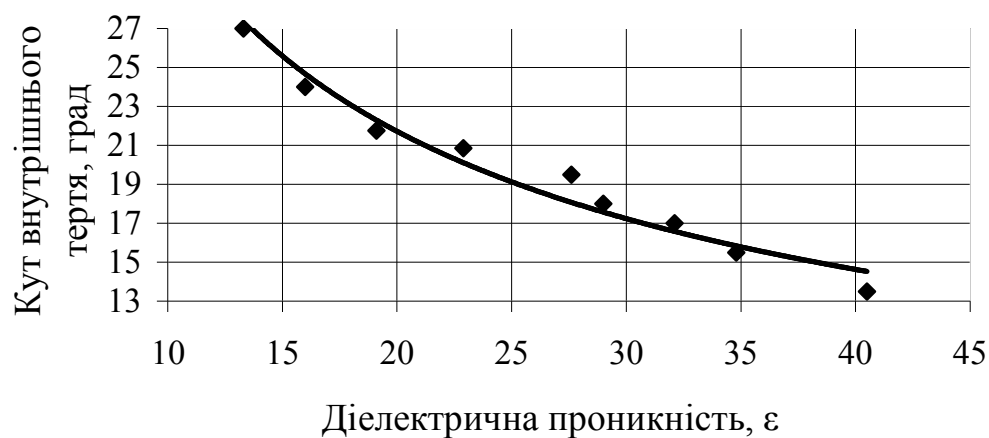


Рисунок 3.32 – Графік зв'язку діелектричної проникності з кутом внутрішнього тертя ґрунту. Ґрунт – суглинок

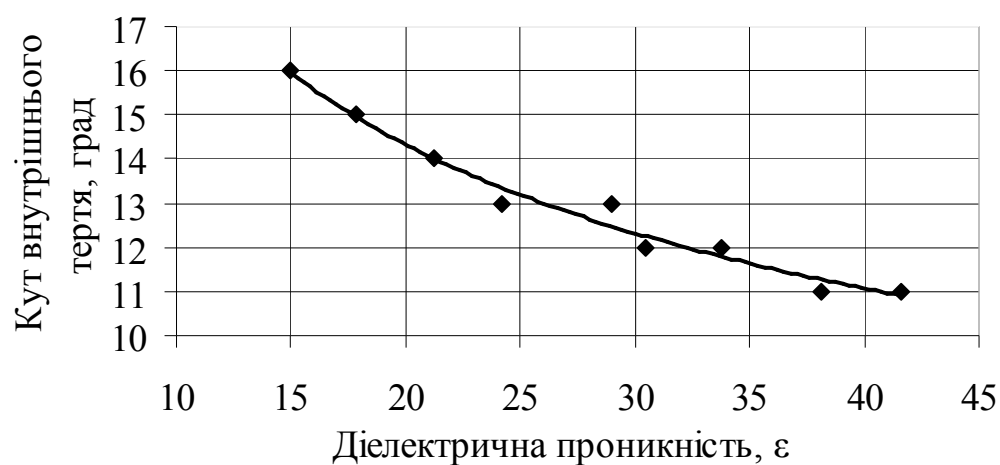


Рисунок 3.33 – Графік зв'язку діелектричної проникності з кутом внутрішнього тертя ґрунту. Ґрунт – глина

Узагальнення результатів експериментальних досліджень дозволило визначити параметри моделі (2.43), що встановлює зв'язок між діелектричною проникністю та міцнісними і деформаційними параметрами ґрунту земляного полотна (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти зв'язку між діелектричною проникністю та міцнісними 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	0,9260	0,9373	0,9584
Глина	31615	-2,2877	9,7135	1,8818	43,71	0,3723	0,9640	0,9921	0,9723

3.3.3 Перевірка адекватності узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту («Бірчака-Шмугге»)

Для перевірки адекватності теоретичної моделі діелектричних властивостей ґрунту були використані результати лабораторних вимірювань вологості ґрунту за допомогою георадару «ОДЯГ-1».

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалися ґрунти, фізичні характеристики яких відповідають вказаним в таблиці 3.1.

В процесі лабораторних вимірювань визначалася діелектрична проникність ґрунтів з різною вологістю. Результати зіставлялися з розрахунковими значеннями діелектричної проникності, що визначена за запропонованою узагальненою моделлю діелектричних властивостей ґрунту (2.24-2.26). Результати наведено на рисунку 3.34.

Для перевірки тісноти зв'язку між теоретичною моделлю та експериментальними даними був проведений парний кореляційний аналіз. Як свідчать результати аналізу, коефіцієнт кореляції між теоретичною залежністю та експериментальними даними становить: для супіску $R=0,976$; для суглинку $R=0,91$; для глини $R=0,97$. Даний зв'язок характеризується як тісний.

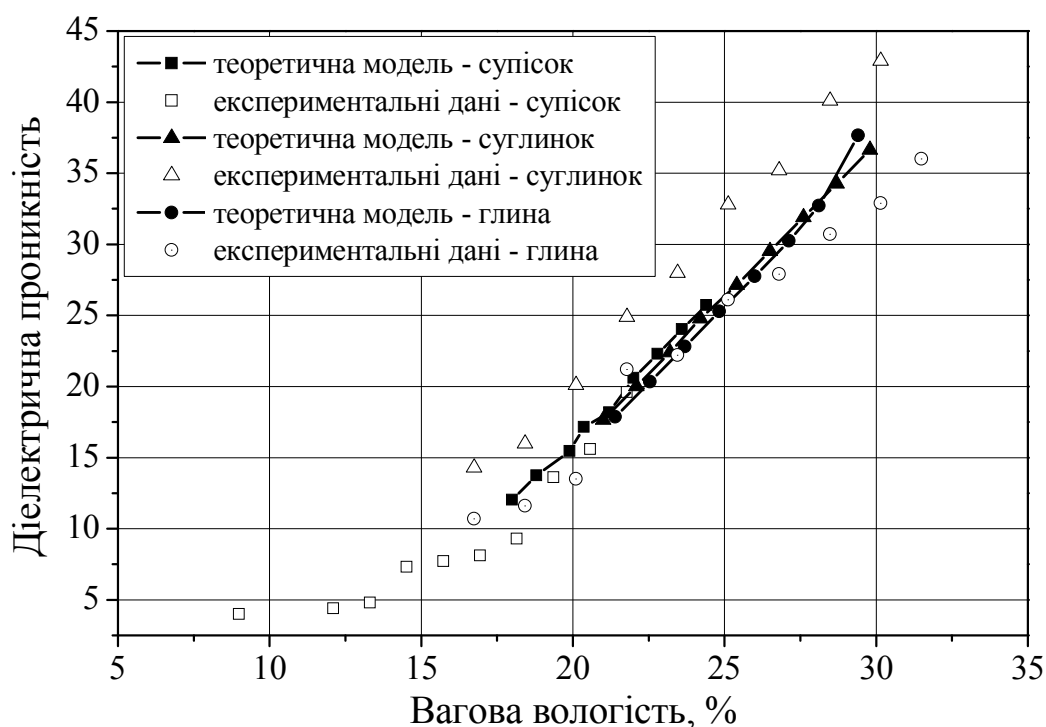


Рисунок 3.34 – Теоретичні та експериментальні дані щодо зв'язку діелектричної проникності з ваговою вологістю ґрунтів

Таким чином, теоретична модель адекватна експериментальним даним та може використовуватися в моделях оцінювання вологості ґрунтів за результатами георадарного зондування.

3.3.4 Перевірка адекватності моделі визначення вологості ґрунтів

Перевірка адекватності моделі визначення вологості ґрунту земляного полотна проводилася в два етапи.

На першому використовувалися результати георадарного зондування, що були отримані на одношарових моделях ґрунту (п. 3.2.2.1). Для перевірки адекватності запропонованої моделі з оцінювання вологості ґрунту земляного полотна була проведена статистична обробка результатів зондування відповідно до [267]. Вона полягала у визначенні довірчого інтервалу і дійсних значень досліджуваної величини. Дійсне значення досліджуваної величини визначалося із відношення:

$$R_{\partial} = \bar{R} \pm \mu_{cm}, \quad (3.25)$$

де $\bar{R}$ – середнє значення виміряної величини:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (3.26)$$

μ_{cm} – довірчий інтервал:

$$\mu_{cm} = \frac{\delta \cdot \bar{R}}{100}, \quad (3.27)$$

де, R_i – значення виміряної величини i - того вимірювання серії;

n – кількість вимірювань в серії;

δ – відносна похибка вимірювань, $\delta = 5 \%$.

Розрахунки проведені для трьох типів ґрунтів (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Статистичне оброблення результатів першої серії експериментальних досліджень

Вологість за термоваговим методом, %	Тип ґрунту	Середнє значення розрахункової вологості, %	Довірчий інтервал μ_{cm} , %	Абсолютне відхилення розрахункової від фактичної вологості, %
12,3 (0,51 W_T)	Супісок	12,10	0,61	0,20
14,8 (0,61 W_T)		14,98	0,75	0,18
17,2 (0,71 W_T)		16,96	0,85	0,24
18,4 (0,76 W_T)		18,28	0,96	0,88
17,4 (0,52 W_T)	Суглинок	17,30	0,87	0,10
20,4 (0,61 W_T)		20,42	1,02	0,02
23,8 (0,71 W_T)		23,90	1,20	0,10
25,1 (0,75 W_T)		25,08	1,25	0,02
18,2 (0,52 W_T)	Глина	18,02	0,90	0,18
21,4 (0,61 W_T)		21,28	1,06	0,12
24,9 (0,71 W_T)		24,52	1,23	0,38
26,3 (0,75 W_T)		26,34	1,32	0,04

Абсолютне відхилення розрахункової вологості ґрунту, яку визначено за результатами георадарного зондування, що відповідає 95 % довірчої імовірності знаходиться в межах відповідного довірчого інтервалу для усіх серій експериментальних досліджень. Це свідчить про високу точність розробленого алгоритму відновлення діелектричної проникності і подальшого визначення вологості ґрунту за моделлю (2.29).

На другому етапі експериментальних досліджень перевірка адекватності моделі з визначення вологості ґрунтів за результатами георадарного зондування проводилася на багатошарових моделях.

Геометричні параметри моделі становили 60 см завширшки та 180 см завдовжки. Модель складалася з трьох однакових секцій, що були розділені між собою плівкою, що не спотворювала результатів георадарних вимірювань. Кожна секція містила ґрунт з різною вологістю. Основні параметри моделі наведено на рисунку 3.35.

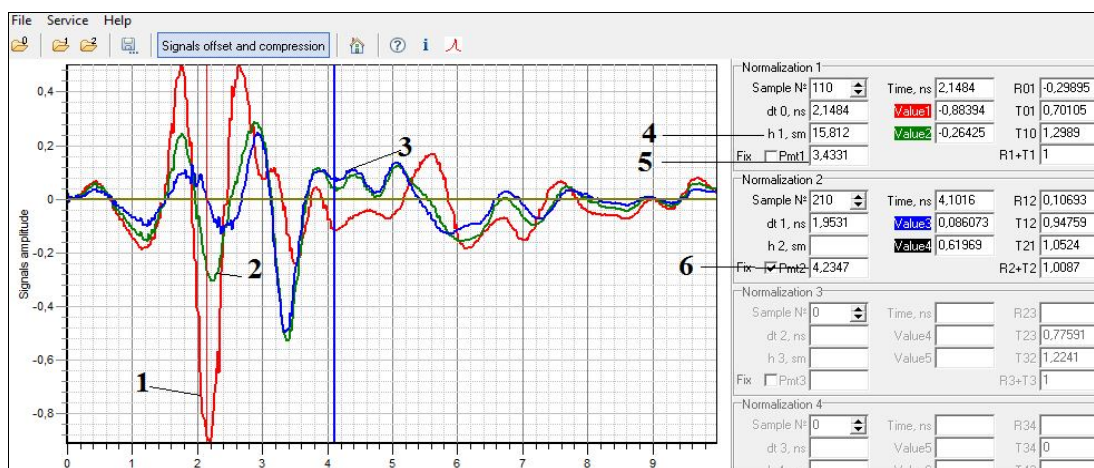
пісок сухий			h=15 см
супісок, $0,63W_T = 15 \%$, $\rho = 1,63 \text{ г/см}^3$	супісок, $0,75W_T = 18 \%$, $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$	супісок, $0,90W_T = 22 \%$, $\rho = 1,77 \text{ г/см}^3$	h=20 см

Рисунок 3.35 – Основні параметри лабораторної моделі

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.

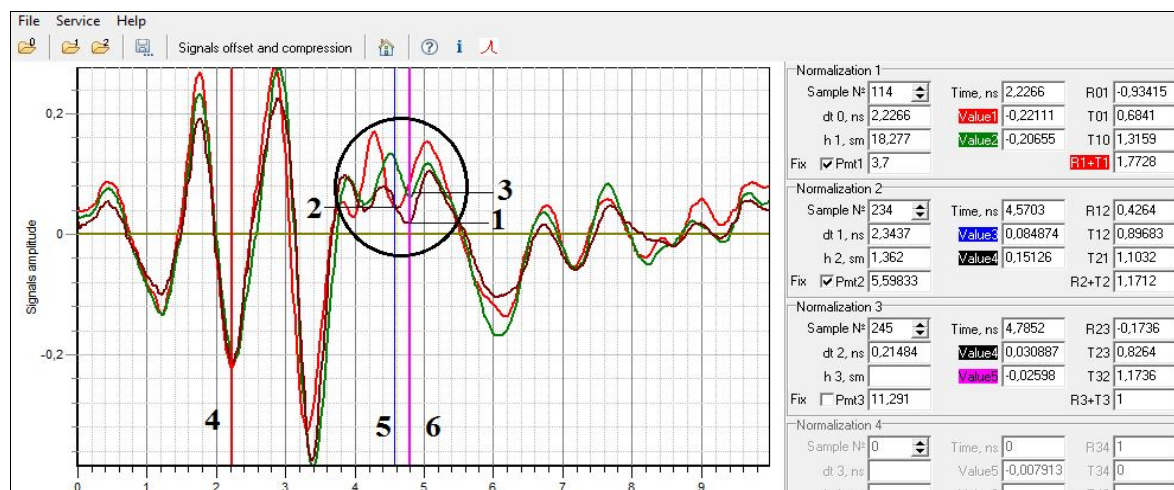
Оброблення результатів зондування здійснювалася в програмі «GeoVizu». Вигляд вікна програми «GeoVizu» в режимі «Аналіз даних» наведено на рисунку 3.36.

На рисунку 3.37 наведено вигляд екрану програми «GeoVizu», де відображено часовий розподіл трьох сигналів від ділянок з різною вологістю (вологість зменшується в процесі руху георадара).



- 1 – сигнал, що відбитий від листа металу (калібрувальний сигнал);
 2 – сигнал, що відбитий від конструкції, що досліджується;
 3 – синтезований сигнал від нижнього шару, де визначається вологість;
 4 – товщина верхнього шару моделі, що розраховується програмно;
 5 – діелектрична проникність матеріалу верхнього шару моделі, що розраховується програмно;
 6 – діелектрична проникність нижнього шару моделі (для визначення вологості), що розраховується програмно

Рисунок 3.36 – Визначення діелектричної проникності ґрунту, що досліджується в режимі «Аналіз даних»



- 1 – сигнал від першої секції ($0,90W_T = 22\%$); 2 – сигнал від другої секції ($0,75W_T = 18\%$); 3 – сигнал від третьої секції ($0,63W_T = 15\%$); 4 – маркер верхньої границі конструкції (початок відліку затримки сигналу); 5,6 – маркери верхньої границі другого шару конструкції

Рисунок 3.37 – Часовий розподіл сигналів, що відбиті від секцій з різною вологістю другого шару (ґрунту, що досліджується)

Для оброблення були прийняті окремі сигнали георадару. Результати інтерпретації сигналів наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – 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

Відносна похибка вимірювань не перевищує 5%, що доводить високу точність запропонованих моделей та алгоритмів щодо визначення вологості ґрунту за результатами георадарного зондування.

3.3.5 Перевірка відтворюваності результатів вимірювань

Оснoву оцінювання вологості ґрунтів складають результати лабораторних експериментів із застосуванням георадара «ОДЯГ-1». Під час проведення експериментальних досліджень необхідно, щоб експерименти були відтворювані, тобто результати експериментальних досліджень, проведених в однакових умовах, не мали суттєвих відмінностей. У процесі експериментів вимірювався час проходження зондуючого імпульсу через досліджувану конструкцію ґрунту – затримка сигналу. За величиною затримки сигналу відтворювалася діелектрична проникність досліджуваного ґрунту:

$$\varepsilon = \frac{c^2 \cdot t^2}{4 \cdot h^2}, \quad (3.28)$$

де ε – діелектрична проникність досліджуваного шару;

c – швидкість світла у вакуумі, $c = 30$ см/нс;

t – затримка сигналу, нс;

h – товщина досліджуваного шару, см.

Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Вихідні дані і результати експериментів

Номер серії	Вихідні параметри ґрунтової моделі товщиною 20 см		Відтворена вологість шару ґрунту, W_T , при повторності				
	Тип ґрунту	Абсолютна вологість ґрунту, %	1	2	3	4	5
1	супісок	12,3 (0,51 W_T)	11,8	11,8	12,1	12,8	12,0
2		14,8 (0,61 W_T)	15,0	14,5	15,2	15,3	14,9
3		17,2 (0,71 W_T)	17,2	17,3	16,5	16,7	17,1
4		18,4 (0,76 W_T)	18,8	19,7	19,4	19,5	19,0
1	суглинок	17,4 (0,52 W_T)	16,9	16,9	17,5	17,6	17,6
2		20,4 (0,61 W_T)	20,9	20,8	19,8	20,2	20,4
3		23,8 (0,71 W_T)	24,2	23,7	23,7	23,9	24,0
4		25,1 (0,75 W_T)	24,4	24,9	24,9	25,4	25,8
1	глина	18,2 (0,52 W_T)	18,3	18,4	17,6	17,7	18,1
2		21,4 (0,61 W_T)	21,1	20,4	21,6	21,4	21,9
3		24,9 (0,71 W_T)	24,7	24,2	24,5	24,7	24,5
4		26,3 (0,75 W_T)	26,6	26,3	26,2	26,4	26,2

Паралельними є експерименти, проведені в однакових умовах, тобто за одних і тих же значеннях вхідних змінних.

Для оброблення результатів експериментів обчислимо математичне очікування і дисперсію в кожній серії:

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{ij} , \quad (3.29)$$

де $\bar{Y}_i$ – оцінка математичного очікування результатів експерименту в i -ій серії;

m – кількість паралельних експериментів;

Y_{ij} – результат j -го експерименту в i -ій серії;

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2, \quad (3.30)$$

де S_i^2 – оцінка дисперсії результатів експерименту в i -й серії.

Результати розрахунків приведені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати паралельних експериментів після оброблення значень

Номер серії	Тип ґрунту	Номер паралельного експерименту					$\bar{Y}_i$	S_i^2
		1	2	3	4	5		
1	супісок	11,8	11,8	12,1	12,8	12,0	12,10	0,170
2		15,0	14,5	15,2	15,3	14,9	14,96	0,097
3		17,2	17,3	16,5	16,7	17,1	16,96	0,118
4		18,8	19,7	19,4	19,5	19,0	18,28	0,137
1	суглинок	16,9	16,9	17,5	17,6	17,6	17,30	0,135
2		20,9	20,8	19,8	20,2	20,4	20,42	0,202
3		24,2	23,7	23,7	23,9	24,0	23,90	0,045
4		24,4	24,9	24,9	25,4	25,8	25,08	0,287
1	глина	18,3	18,4	17,6	17,7	18,1	18,02	0,127
2		21,1	20,4	21,6	21,4	21,9	21,28	0,328
3		24,7	24,2	24,5	24,7	24,5	24,52	0,042
4		26,6	26,3	26,2	26,4	26,2	26,34	0,028

Для перевірки відтворюваності розраховуємо критерій Кохрена:

$$G_p = \frac{\max S_i^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (3.31)$$

де G_p – розрахунковий критерій Кохрена;

$\max S_i^2$ – максимальне значення дисперсії із числа розглянутих паралельних серій N .

$$\text{Для типу ґрунту – супісок: } G_{p(\text{суп})} = \frac{0,170}{0,170 + 0,097 + 0,118 + 0,137} = 0,326.$$

$$\text{Для типу ґрунту – суглинок: } G_{p(\text{суг})} = \frac{0,287}{0,135 + 0,202 + 0,045 + 0,287} = 0,429.$$

Для типу ґрунту – глина: $G_{p(зл)} = \frac{0,328}{0,127 + 0,328 + 0,042 + 0,028} = 0,625$.

За таблицею розподілу критичних точок критерію Кохрена залежно від рівня значимості q , числа ступенів свободи $f = m - 1$ і числа серій N визначаємо критичну точку. Для рівня значимості $q = 0,95$, числа ступенів свободи $f = 5 - 1 = 4$ і числа серій експериментів $N = 4$ критерій Кохрена становить [258]:

$$G_{кр} = G(q, f, N) = 0,629.$$

$$G_{p(суп)} = 0,326 < 0,629, G_{p(сугл)} = 0,429 < 0,629, G_{p(зл)} = 0,625 < 0,629.$$

Оскільки $G_p < G_{кр}$, то експерименти слід вважати відтворюваними.

Оскільки експерименти відтворювані, то обчислюємо помилку експерименту – дисперсію відтворюваності:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2; \quad (3.32)$$

Для супіску: $S_0^2 = \frac{1}{4} \cdot (0,170 + 0,097 + 0,118 + 0,137) = 0,131;$

Для суглинку: $S_0^2 = \frac{1}{4} \cdot (0,135 + 0,202 + 0,045 + 0,287) = 0,167;$

Для глини: $S_0^2 = \frac{1}{4} \cdot (0,127 + 0,328 + 0,042 + 0,028) = 0,131.$

Дисперсія відтворюваності експериментів S_0^2 є оцінкою дисперсії змінної стану σ_y^2 .

Таким чином, отримані статистичні характеристики свідчать про відтворюваність результатів вимірювань.

3.4 Перевірка адекватності методів та моделей визначення вологості ґрунтів в польових умовах

3.4.1 Перевірка адекватності методу оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за допомогою польового георадару

3.4.1.1 Характеристика ділянки, що досліджується, прилади та устаткування для проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження з визначення вологості ґрунту за допомогою польового георадару проводилися на об'їзній автомобільній дорозі м. Харків (М-03) на ділянці км 499+500 – км 499+557, що характеризується незначним просіданням земляного полотна. Обстеження проводилося у різні періоди року (рис. 3.38).



Рисунок 3.38 – Проведення георадарного обстеження ділянки об'їзної автомобільної дороги м. Харків в різні періоди року

Протяжність ділянки, що досліджується становить 57 м. Ділянка дороги проходить в насипі висотою 3,5 м.

Ґрунт земляного полотна – суглинок. Фізичні параметри ґрунту визначалися в лабораторії (див. табл. 3.1).

Експериментальні дослідження містили в собі: георадарне зондування дорожнього одягу на ділянці, що обстежується; визначення вологості ґрунту за допомогою вологоміра, визначення вологості проб ґрунту термоваговим методом [107–109].

Зондування дорожнього одягу виконувалося георадаром «ОДЯГ-1». Висота розташування антенного блоку над поверхнею узбіччя становила 0,35 м. Зондування проводилося зі швидкістю 0,5 м/с з наступними параметрами налаштування програми для передачі інформації на персональний комп'ютер:

- а) розгортка 10 нс і 25 нс;
- б) посилення сигналу 4,0;
- в) накопичення 5;
- г) відліки сигналу фіксувалися через 2 м.

Визначення вологості ґрунту виконувалося вологоміром МГ-44. Відбір проб ґрунту та визначення вагової вологості проводилося згідно з [108, 109].

3.4.1.2 Визначення вологості ґрунту

Як було зазначено раніше, ділянка, що досліджується, характеризується незначним просіданням дорожнього одягу та земляного полотна, тому вимірювання вологості земляного полотна вологоміром МГ-44 та відбір проб ґрунту проводилися:

- а) на неукріпленій частині узбіччя на трьох поперечниках, що відповідають початку, середині та кінцю ділянки (рис. 3.39 а);
- б) на укосі насипу на трьох поперечниках. На кожному поперечнику вологість вимірювалася в трьох точках, що відповідають бровці насипу, середині укосу насипу, підшві насипу (рис. 3.39 б).



а)

б)

Рисунок 3.39 – Вимірювання вологості ґрунту:

а) на неукріпленій частині узбіччя; б) на укосі земляного полотна

Оцінювання вологості ґрунту георадарним комплексом «ОДЯГ-1» здійснювалася в безперервному режимі руху георадару по відповідних поперечниках. За результатами аналізу сигналів георадару в програмі «GeoVizy» оцінювалася діелектрична проникність ґрунту. Визначення вологості ґрунту проводилося відповідно до (п.2.4.2).

Результати експериментальних даних наведено в таблицях 3.10-3.11.

Зменшення вологості ґрунту по мірі наближення до поверхні узбіччя (укосу) пояснюється просиханням верхньої частини ґрунту. Вологість ґрунту на глибині від 40 см до 50 см більшою мірою відповідає реальному стану ґрунту в земляному полотні та може бути використана під час розрахунків міцності дорожнього одягу за трьома граничними станами.

Відносна похибка вагової вологості, що визначена за допомогою георадару, не перевищує 5 %, що свідчить про високу порівнянність результатів.

Незначні коливання відносного відхилення вологості викликані наявністю рослинного покриву на укосі насипу та нерівностями поверхні укосу земляного полотна, що спотворює результати георадарних вимірювань. Під час

вимірювання на неукріпленій частині узбіччя коливання відносного відхилення не спостерігається.

Таблиця 3.10 – 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

Таблиця 3.11 – Результати вимірювань вологості на укосі насипу

Місцеположення	Вагова вологість, %			Відносна похибка, %
	за даними вологоміру на глибині		за георадарними даними	
	6 см	40 см – 50 см		
Початок ділянки				
бровка земляного полотна	21	23	21,8	5,2
середина укусу	23	22	22,5	2,2
підшва земляного полотна	17	18	18,9	5,0
Середина ділянки /просадка				
бровка земляного полотна	20	23	23,5	2,1
середина укусу	21	20	21,0	5,0
підшва земляного полотна	23	23	23,7	3,1
Кінець ділянки				
бровка земляного полотна	22	22	22,9	4,1
середина укусу	22	23	22,8	0,9
підшва земляного полотна	23	23	23,2	0,9

3.5 Висновки за розділом

В даному розділі були вирішені задачі дисертаційного дослідження:

а) експериментально досліджено закономірності зміни електрофізичних

параметрів ґрунту від його вологості, міцнісних та деформаційних параметрів;

б) виконано аналіз точності вимірювань та відтворюваності результатів вимірювань;

в) проведено перевірку адекватності теоретичних моделей та методик георадарних вимірювань за допомогою лабораторних експериментів та польових випробувань на автомобільних дорогах загального користування.

1. На підставі теоретичних досліджень щодо узгодження геометричних розмірів експериментальних зразків із просторово-часовими характеристиками зондувальних сигналів обґрунтовано параметри моделі для проведення георадарних вимірювань, а саме, мінімальні розміри і співвідношення лінійних розмірів моделі з урахуванням розмірів передавальної й прийомних антен, розміру майданчика, що відбиває сигнал, і особливостей хвильової картини, характерної для георадару. 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.

2. Попередніми експериментальними дослідженнями доведено відтворюваність вимірювань діелектричної проникності ґрунтових моделей за критерієм Кохрена для рівня значущості 0,95. Дисперсія відтворюваності, що розрахована на підставі попередніх експериментальних вимірювань становить 0,128 для супіску; 0,167 для суглинку; 0,131 для глини. Отримані статистичні характеристики свідчать про відтворюваність результатів вимірювань.

3. Експериментально встановлені залежності, що відображають зв'язок вологості, щільності та типу ґрунту з діелектричною проникністю. Коефіцієнт кореляції між експериментальними даними та апроксимуючими залежностями становить від 0,9661 до 0,9981, що свідчить про високу точність апроксимуючих моделей. Залежності, що отримані (3.22-3.24) дозволяють визначити параметри моделі (2.29) оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за результатами георадарного зондування.

Статистична обробка результатів зондування доводить, що відносна похибка розрахункової вологості ґрунту, яку визначено за результатами георадарного зондування, відповідає 95% довірчої ймовірності, що свідчить про високу точність розробленого алгоритму відновлення діелектричної проникності і подальшого визначення вологості ґрунту за моделлю (2.29).

Результати експериментальних досліджень дозволили підтвердити теоретичні положення та довести:

а) зі збільшенням вологості ґрунту збільшується значення діелектричної проникності;

б) величина діелектричної проникності залежить від типу ґрунту та частки пилюватих частинок та істотно збільшується зі збільшенням частки пилюватих частинок ґрунту;

в) правомірність гіпотези, що зв'язок між діелектричною проникністю та вологістю з високою точністю характеризується поліноміальними моделями другого порядку.

4. На підставі експериментальних досліджень зв'язку вологості, щільності, гранулометричного складу та діелектричної проникності ґрунту з міцнісними (питоме зчеплення (C), кут внутрішнього тертя (ϕ)) та деформаційними параметрами ґрунтів (модуль пружності (E)), визначено параметри моделі (2.43), що встановлює зв'язок між діелектричною проникністю та міцнісними і деформаційними параметрами ґрунту земляного полотна (див. табл. 3.5). Коефіцієнт кореляції, що знаходиться в межах від 0,9260 до 0,9921 свідчить про високу точність коефіцієнтів моделі (2.43).

5. Підтверджено адекватність запропонованої узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту (2.24-2.26). Коефіцієнт кореляції між теоретичною залежністю та експериментальними даними становить: для супіску $R=0,976$; для суглинку $R=0,91$; для глини $R=0,97$. Даний зв'язок характеризується як тісний та дозволяє зробити висновок, що теоретична модель адекватна (2.24-2.26) експериментальним даним та може використовуватися в моделях оцінювання вологості ґрунтів за результатами

георадарного зондування.

6. Експериментальними дослідженнями на автомобільних дорогах загального користування у Харківській області підтверджено адекватність методу оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна», оцінювання деформаційних та міцнісних параметрів ґрунту земляного полотна. Відносне відхилення вагової вологості, що визначена за допомогою георадару не перевищує 5%, що свідчить про високу порівнянність результатів.

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

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Методика оцінювання вологості ґрунту із застосуванням георадарних даних

Головними перевагами методу георадіолокаційного зондування дорожнього одягу з метою оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» під час діагностики автомобільних доріг на етапах передпроектних вишукувань та експлуатації є безперервність отримання інформації, визначення першопричин руйнування дорожнього одягу (що пов'язані з вологістю ґрунту), максимальна економічність методу.

Методику з оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за допомогою польового георадару розроблено на підставі узагальнення теоретичних (п.2.3, 2.4.1, 2.4.2) та експериментальних досліджень (п.3.3, 3.4.1), що проведені в лабораторних та польових умовах. Методика містить в собі:

а) етап збору вихідних даних, до яких віднесено: інформація про тип ґрунту; калібрувальні сигнали георадару, що використовуються для подальшої обробки радарограм;

б) зондування конструкції дорожнього одягу з метою реєстрації амплітуди сигналів, що надійшли до приймача, та формування часового розподілу сигналів за глибиною;

в) оброблення отриманих даних в програмі Geovizu з метою відновлення діелектричної проникності (ϵ) ґрунту земляного полотна;

г) оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за величиною діелектричної проникності.

Тип ґрунту визначається шляхом відбору зразків згідно з [109], або відповідно до [154].

До калібрувальних сигналів відносяться: сигнал прямого проходження; сигнал, що випромінює антенний блок; сигнал від поверхні конструкції дорожнього одягу, що надходить до приймача.

Запис калібрувальних сигналів, які будуть використовуватися в подальшому під час оброблення сигналів георадарного профілю для отримання значень діелектричної проникності ґрунтів, виконується в такій послідовності:

а) антенний блок випромінює у вільний простір сигнали, тобто розміщується в такому положенні, щоб в межах його діаграми спрямованості не знаходилися предмети, що відбивають сигнал георадару (рис. 4.1 а). Проводиться запис сигналів прямого проходження (реєструється 10-15 відліків);

б) антенний блок розташований в горизонтальному положенні над листом металу, висота розташування антенного блоку становить 35 см, розміри листа металу перекривають площу відбиття зонduючого сигналу (рис. 4.1 б). Проводиться запис сигналу, що відбитий від листа металу (реєструється 10-15 відліків). Таким чином реєструється сигнал, що випромінює антена георадару, визначається амплітуда зонduючого імпульсу;

в) антенний блок розташований в горизонтальному положенні над еталонною ділянкою (рис. 4.1 в). Висота розташування антенного блоку становить 35 см. Проводиться запис калібрувального сигналу відбитого від поверхні еталонної ділянки автомобільної дороги (реєструється 10-15 відліків).

На другому етапі методики проводиться зондування конструкції дорожнього одягу георадарним обладнанням. Зондування дорожнього одягу проводиться на сухому незасніженому покритті, оскільки надмірна вологість покриття істотно знижує якість результатів георадарного зондування. Це пов'язано із загасанням сигналу (діелектрична проникність води – 81). Під час проведення діагностики на вологому покритті потужність відбитого від поверхні покриття сигналу буде значно вище, а глибина сканування менше.

Зондування проводиться за температури повітря від 0°C до 40°C . Температурний діапазон роботи георадіолокаційної апаратури обумовлений температурним діапазоном роботи портативного комп'ютера.

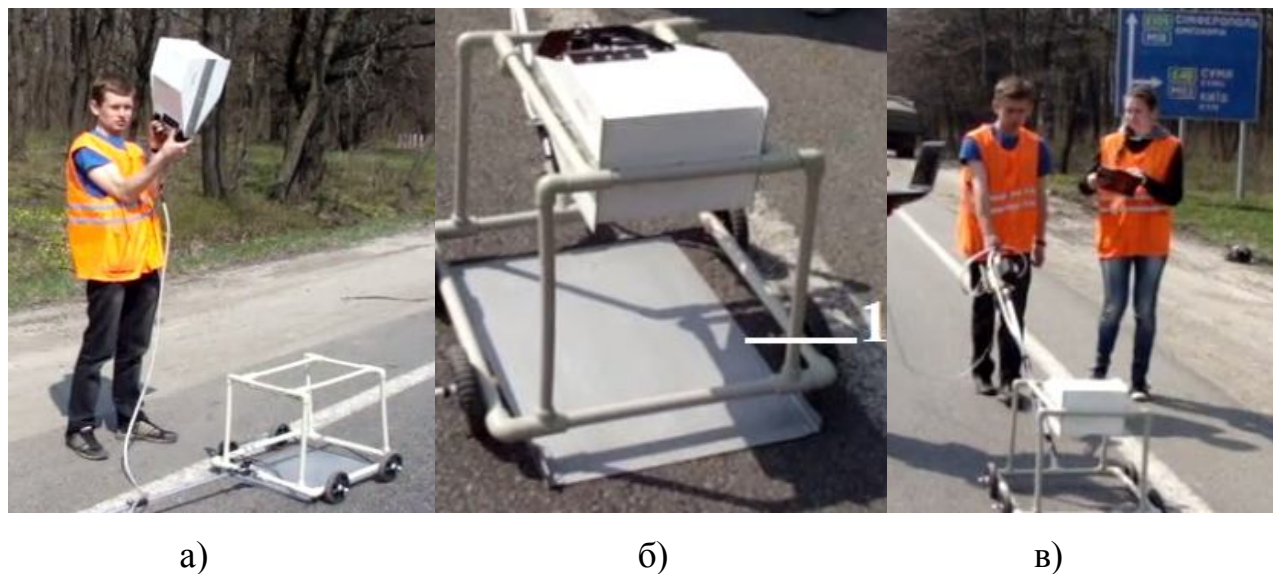


Рисунок 4.1 – Етап запису калібрувальних сигналів

Відстань між трасами зондування георадіолокаційного профілю повинна бути однаковою, тобто георадіолокаційне зондування повинне координуватися за допомогою датчика переміщення, або здійснюватися в покроковому режимі. Крок між трасами зондування не повинний перевищувати 0,05 м за центральної частоти антенного блока 1,2 ГГц.

Зондування проводиться як в повздовжньому так і в поперечному напрямках.

Візуалізація радарограм на екрані комп'ютера здійснюється з метою визначення:

- а) ділянок запису, які підлягають вилученню з процесу подальшої обробки;
- б) пропусків запису та бракованих в результаті апаратних збоїв ділянок запису;
- в) інтервалів запису для подальшої обробки;

г) кількості трас на одиницю довжини профілю, виходячи з умов та завдання досліджень.

На підставі перегляду проводиться редагування даних:

- а) видалення окремих трас або груп трас;
- б) зменшення інтервалу часу для оброблення;
- в) проріджування або інтерполяція у відповідності із новим кроком по профілю;

г) відокремлюються в самостійні об'єкти обробки частини файлів або проводиться об'єднання декількох файлів у єдиний файл.

Третій етап передбачає використання алгоритму визначення діелектричної проникності ґрунту, що реалізований в програмі «Geovizu» (див. рис. 2.8). Запропонована наступна послідовність реалізації роботи алгоритму:

а) під час попередньої обробки даних зондування за допомогою перетворення Гільберта визначаються часові затримки сигналів (Δt_i), які відбиті від границь шарів, і їх амплітуди. Ця інформація є вихідною для роботи алгоритму;

б) визначається амплітуда сигналу, який падає на поверхню покриття $A_{0,1} = A_{мет}$;

в) визначається амплітуда сигналу, відбитого від поверхні конструкції дорожнього одягу $A_{1,0} = A_{відб}$;

г) розраховується коефіцієнт відбиття від поверхні конструкції та шарів дорожнього одягу $R_{n-1,n}$;

д) реалізується алгоритм пошарового розрахунку діелектричної проникності матеріалів шарів конструкції дорожнього одягу та ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» [180];

$$\sqrt{\varepsilon_n} = \sqrt{\varepsilon_{n-1}} \frac{1 - R_{n-1,n}}{1 + R_{n-1,n}}; \quad (4.1)$$

Четвертий етап передбачає оцінювання вологості на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» за (3.22-3.24).

Виконується прогнозування вологості ґрунту у період максимального вологонакопичення для різних типів місцевості за умовами зволоження за (2.33-2.34).

4.2 Методика оцінювання розрахункових параметрів ґрунтів

Визначення розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування на ділянці дороги, що досліджується, проводиться у два етапи.

На першому етапі визначається коефіцієнт варіації відносної вологості (діелектричної проникності) ґрунту. Для визначення коефіцієнту варіації ґрунту використовуються результати зондування ділянки дороги в поздовжньому та поперечному профілях (п. 4.1).

На другому етапі визначається розрахункова вологість ґрунту та пов'язані з нею розрахункові параметрів.

Методика передбачає:

а) розрахунок коефіцієнту варіації відносної вологості ґрунту на ділянці (2.36) або коефіцієнту варіації діелектричної проникності ґрунту:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}_{cp} \right)^2}{(n-1)}} / \bar{\varepsilon}_{cp}, \quad (4.2)$$

де ε_i – значення відносної діелектричної проникності при i -му вимірюванні на ділянці, частки одиниць;

$\bar{\varepsilon}_{cp}$ – середнє значення відносної діелектричної проникності за результатами вимірювань на ділянці, частки одиниць;

n – загальна кількість вимірювань на ділянці;

б) визначення розрахункової вологості ґрунту у межах довірчого інтервалу, що відповідає заданому рівню надійності (2.35) або розрахункового значення відносної діелектричної проникності на ділянці:

$$\varepsilon_p = \bar{\varepsilon}(1 + t \cdot C_v), \quad (4.3)$$

де $\bar{\varepsilon}$ – середня фактична відносна діелектрична проникність ґрунту на ділянці, що досліджується;

t – коефіцієнт нормованого відхилення, що приймається залежно від заданого рівня проектної надійності конструкції дорожнього одягу [254], $t=1,94$;

C_v – коефіцієнт варіації відносної діелектричної проникності.

Під розрахунковою відотною діелектричною проникністю (ε_p) ґрунту будемо розуміти максимальне значення середньої діелектричної проникності ґрунту, що визначена на ділянці обстеження;

в) визначення розрахункових параметрів ґрунту залежно від розрахункової вологості (3.10-3.12, 3.16-3.21) або розрахункової діелектричної проникності (див. табл. 3.5).

Приклад визначення розрахункових параметрів ґрунту за результатами георадарного зондування ділянки автомобільної дороги довжиною 100 м в поздовжньому та поперечному напрямках наведено в таблицях 4.1 – 4.2.

Кінцевою метою георадарної діагностики є призначення ефективних заходів із забезпечення міцності дорожнього одягу та збереження дорожнього одягу від руйнування в період максимального зниження міцності конструкції за критерієм опору зсуву в ґрунтах земляного полотна.

Таблиця 4.1 – Визначення розрахункових параметрів ґрунту (зондування в поздовжньому напрямку)

Номер відліку сигналу	Геометричні та електрофізичні параметри шарів дорожнього одягу							
	покриття		верхній шар основи		нижній шар основи		ґрунт земляного полотна	
	товщина, см	діелектрична проникність	товщина, см	діелектрична проникність	товщина, см	діелектрична проникність	діелектрична проникність	відносна вологість
1	2	3	4	5	6	7	8	9
38	11,5	5,8	17,8	3,8	25,0	4,0	4,1	0,51
87	10,9	5,9	18,1	3,6	25,8	3,7	3,8	0,49
120	11,2	5,7	17,9	3,7	25,2	4,0	4,0	0,51
157	11,4	6,9	16,4	3,6	24,9	4,3	4,2	0,52
267	11,9	7,2	15,7	4,0	25,2	3,9	3,5	0,48
458	11,6	7,0	14,8	4,1	25,9	4,2	3,9	0,50
563	12,3	6,5	16,9	4,0	24,7	3,8	3,4	0,47
687	12,5	6,3	16,4	3,6	24,5	4,5	3,9	0,50
794	12,0	6,0	16,0	3,9	23,7	4,6	4,6	0,53
874	11,9	5,8	16,3	4,1	24,0	4,2	4,5	0,52
912	12,6	5,6	16,8	3,5	25,3	3,9	3,7	0,49
975	12,8	5,4	16,6	3,8	26,4	4,1	3,4	0,47
Розрахункове значення	-	-	-	-	-	-	4,53	0,53
Розрахункові параметри ґрунту: - модуль пружності, МПа; - кут внутрішнього тертя, град.; - питоме зчеплення, МПа							96 32 0,020	100 33 0,021

Таблиця 4.2 – Визначення розрахункових параметрів ґрунту (зондування в поперечному напрямку)

Номер відліку сигналу / характеристика ділянки	Геометричні та електрофізичні параметри шарів дорожнього одягу										
	Верхній шар покриття		Другий шар покриття		Товщина шарів покриття	Верхній шар основи		Другий шар основи		Ґрунт земляного полотна	
	Товщина, см	Діелектрична проникність	Товщина, см	Діелектрична проникність	Товщина, см	Товщина, см	Діелектрична проникність	Товщина, см	Діелектрична проникність	Діелектрична проникність	Відносна вологість
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
21 / без дефектів	7,5	6,7	4,2	6,3	11,7	16,1	3,6	25,3	4,4	4,5	0,53
45 / просідання	7,2	6,0	5,0	5,3	12,2	16,0	4,5	25,9	4,7	4,3	0,52
77 – вісь дороги	7,1	6,5	6,8	5,6	13,9	16,6	4,7	26,3	3,7	3,4	0,48
104 / вибоїна	5,8	10,3	4,9	9,7	10,7	16,0	6,9	-	8,6	8,6	0,70
121 / без дефектів	7,4	6,6	4,9	5,2	12,3	16,1	4,7	26,0	4,4	4,1	0,51
132 / сітка тріщин, просідання	7,1	6,5	4,2	5,9	11,3	16,8	5,0	24,0	4,7	4,7	0,54
190 / без дефектів	6,9	6,9	4,2	6,1	11,1	16,1	4,5	26,0	5,3	5,1	0,56
Середнє значення	7,0	7,1	4,9	6,3	11,9	16,2	4,8	25,6	5,1	5,0	0,50
Коефіцієнт варіації	0,08	0,21	0,19	0,25	0,09	0,02	0,21	0,03	0,31	0,34	0,13
Розрахункове значення	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,85	0,67
Розрахункові параметри ґрунту: - модуль пружності; - кут внутрішнього тертя; - питоме зчеплення										64 29 0,017	65 30 0,016

4.3 Економічна ефективність від впровадження результатів дисертаційного дослідження

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційного дослідження полягає у наступних положеннях:

а) інформацію про фізичні параметри конструкції дорожнього одягу можна отримати оперативно неруйнівними методами, що призводить до зменшення часу на діагностику, та дозволяє зменшити собівартість діагностики дорожнього одягу;

б) безперервність інформації, що отримано за результатами георадарної

діагностики, дозволяє встановити ділянки автомобільної дороги з максимальною вологістю ґрунту земляного полотна (з мінімальною зсувостійкістю ґрунтів), що дозволяє раціонально розподіляти кошти на ремонт та утримання автомобільних доріг;

в) визначення вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» дозволяє прогнозувати змінення вологості в річному циклі, що, в свою чергу, надає можливості:

1) вводити диференційовану плату за проїзд по ділянках із зниженою міцністю за критерієм зсуву в ґрунтах земляного полотна для компенсації збитків на передчасне руйнування дорожнього одягу;

2) уточнити дати обмеження руху, що дозволяє: зберегти ослаблену конструкцію дорожнього одягу від руйнування і заощадити на передчасному ремонті, зменшити собівартість перевезень та збитків від перебування вантажів та пасажирів у дорозі під час об'їзду ослабленої ділянки автомобільної дороги.

4.3.1 Економічна ефективність від застосування методу оцінювання вологості ґрунту за результатами георадарного зондування дорожнього одягу

Для розрахунку економічної ефективності від застосування результатів георадарної діагностики під час оцінювання вологості ґрунтів земляного полотна проведений розрахунок вартості робіт, що виконують за стандартними методами визначення вологості ґрунту земляного полотна, і вартості проведення георадарного діагностування.

Норми розходів на проведення робіт за стандартними методами [269, 270] приймаються відповідно до СОУ 42.1-37641918-071:2018 і СОУ 42.1-37641918-035:2018. Норми витрат на проведення георадарних досліджень приймалися відповідно до розрахунків і шляхом проведення хронометражу проведення робіт. Витрати на амортизацію обладнання приймалися відповідно до СОУ 42.1-37641918-071:2018 і згідно з розрахунками. Збільшення вартості

обладнання внаслідок інфляції враховувалося шляхом введення індексу інфляції відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 01.12.2017 року. Усереднена вартість людино-години за розрядами робіт під час виконання випробувань приймалася згідно з наказом Мінрегіону України від 27.07.2018 №196 і коректувалася відповідно до індексу зміни ринкової вартості будівельно-монтажних робіт станом на 01.09.2018 згідно з Постановою КМУ №906 від 01.12.2017р.

Під час визначення вологості ґрунтів земляного полотна стандартним методом відбору кернів необхідно виконати наступні операції:

- а) відбір зразку циліндричної форми за допомогою керновідбірника;
- б) експрес-оцінка типу ґрунту;
- в) вимірювання вологості ґрунту;
- г) відновлення стану покриття на місці відбору керну.

Результати розрахунку витрат на визначення вологості ґрунту земляного полотна в одній точці при порушенні цілісності дорожнього покриття приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунок витрат для визначення вологості ґрунту земляного полотна

Найменування робіт	Од. вим.	Кількість	Вартість, грн	Сума, грн
Відбір зразків циліндричної форми керновідбірником	люд.год	0,65	168,75	109,69
	маш.год	0,65	25,99	16,89
Визначення типу ґрунту	люд.год.	0,5	168,75	84,38
Вимірювання вологості вологоміром	люд.год.	0,05	168,75	8,44
Відновлення покриття автомобільної дороги	люд.год.	1,96	46,43	91,00
Щебінь	т	0,024	365,00	8,76
Суміш асфальтобетонна	т	0,0302	2012,50	60,78
Всього:				379,94

Вартість проведення вимірювань вологості стандартним методом становить 379,94 грн за одне вимірювання.

Відповідно до ДБН А.2.1-1-2008 [271] відбір кернів необхідно проводити через 250 м, тобто на 1 км автомобільної дороги необхідно виконати не менше чотирьох відборів кернів.

Для визначення вологості ґрунтів земляного полотна методом дистанційного зондування георадаром необхідно виконати наступну послідовність операцій:

- а) підготовка і калібрування георадарного комплексу;
- б) проведення георадарного зондування автомобільної дороги;
- в) оброблення результатів зондування, визначення значень вологості.

При цьому рекомендується [150, 161] для уточнення значень вологості відбирати один керн, що значно скорочує витрати і час на дослідження.

Результати розрахунку витрат на визначення вологості ґрунту земляного полотна на ділянці довжиною 1 км методом георадарного зондування приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахунок витрат для визначення вологості ґрунту земляного полотна

Найменування робіт	Од. вим.	Кількість	Вартість, грн	Сума, грн
Визначення типу ґрунту	люд.год.	0,5	168,75	84,38
Визначення вологості ґрунту земляного полотна георадаром	люд.год.	1,11	168,75	185,63
	маш.год.	1,11	8,00	8,88
Всього:				278,89

Вартість проведення вимірювань вологості методом георадарного зондування становить 278,89 грн на 1 км автомобільної дороги.

Ефект від застосування георадарного обладнання під час визначення вологості ґрунту земляного полотна (на етапі діагностування конструкції дорожнього одягу) визначається як різниця у витратах на проведення робіт методом георадарного зондування (C_1) та стандартним методом відбору кернів (C_2):

$$E = C_2 - C_1, \quad (4.4)$$

де C_1, C_2 – вартість методу відібрання кернів із конструкції та георадарного методу відповідно, грн./км.

$$E = 379,94 \times 4 - (278,89 + 379,94) = 860,93 \text{ грн./км.}$$

За рахунок впровадження георадарного комплексу у практику проектно-вишукувальних робіт може бути обстежено близько 2000 км/рік за допомогою одного георадара. Тоді економія від обстеження мережі доріг становить:

$$E = (C_2 - C_1) - K \times E_n, \quad (4.5)$$

де C_1, C_2 – вартість методу відібрання кернів із конструкції та георадарного методу відповідно, грн./км.;

K – капіталовкладення у георадарний комплекс, грн.;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень ($E_n = 0,12$).

Капіталовкладення у георадарний комплекс становлять 200000 грн. Тоді очікувана економія становить:

$$E = 1721860 - 200000 \times 0,12 = 1697860 \text{ грн./рік}$$

Таким чином, очевидна висока ефективність застосування георадарного комплексу при інженерних вишукуваннях, експлуатації, будівництві та ремонті автомобільних доріг.

4.3.2 Ефективність застосування методу оцінювання вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування під час реалізації стратегії збереження автомобільних доріг

Для запобігання передчасного руйнування дорожніх одягів запроваджують тимчасове обмеження навантажень на вісь транспортних засобів і (або) інтенсивність руху в періоди року, несприятливі щодо умов

зволоження земляного полотна (період весняного відтавання ґрунтів земляного полотна). В Україні практика тимчасового обмеження руху великовагових ТЗ регламентується наказом Державного агентства автомобільних доріг на підставі результатів оцінювання транспортно-експлуатаційних показників дорожнього одягу. Відповідно до СОУ 45.2-00018112-042:2009 [272] для кожної області України встановлені терміни початку і закінчення розрахункового періоду року.

Впровадження георадарного обстеження з метою оцінювання вологості ґрунту земляного полотна дозволяє оперативно, в реальному масштабі часу, розрахувати коефіцієнт запасу міцності конструкції дорожнього одягу $K_{зм}$ і, у випадку ослаблення конструкції, рекомендувати періоди тимчасового обмеження руху великовагових транспортних засобів, що дозволить отримати, за рахунок цього, економічний ефект:

а) через зменшення збитків завданих від проїзду великовагових транспортних засобів [273]:

$$E = \Delta C = C^{(0)} - C^{(1)} = \sum_{i=1}^m n_i \cdot C_i^{(0)} - \sum_{i=1}^m n_i \cdot C_i^{(1)}, \quad (4.6)$$

де ΔC – зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів, грн./добу;

n_i – добова інтенсивність транспортних засобів i -го типу, авт./добу;

$C_i^{(0)}, C_i^{(1)}$ – збитки від одного проїзду транспортного засобу i -го типу в базовий і розрахунковий період відповідно [273], грн./км;

m – кількість типів автомобілів в транспортному потоці.

б) через зменшення відстані проїзду та, відповідно, часу перебування вантажів і пасажирів під час об'їзду ділянки автомобільної дороги, де через втрату міцності конструкції дорожнього одягу обмежено рух ТЗ. За умови якщо відтавання ґрунтів земляного полотна відбувається пізніше прогнозованого терміну, але при цьому міцнісні параметри конструкції дорожнього одягу, що

встановлені з врахуванням розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна отриманих за допомогою експрес-методу георадарної діагностики, задовольняють умовам експлуатації автомобільних доріг:

$$E = \Delta C_a + \Delta B, \quad (4.7)$$

де ΔC_a – зниження витрат на перевезення вантажів, грн./добу;

ΔB – зниження витрат від перебування вантажів та пасажирів у шляху, грн/добу.

Зниження витрат на перевезення вантажів [273]:

$$\Delta C_a = \Delta L \cdot \Delta T \cdot \sum_{i=1}^m N_{ip} \cdot S_i \cdot 10^{-5}, \quad (4.8)$$

де ΔC_a – зниження витрат на перевезення вантажів, тис. грн;

N_{ip} – інтенсивність руху i -го транспортного засобу у розрахунковий період, авт/добу;

S_i – собівартість перевезення вантажів i -м транспортним засобом, коп./авт.км.

ΔT – період на який скорочується обмеження руху, діб;

ΔL – збільшення довжини шляху через об'їзд ділянки дороги, де діє обмеження руху великовагових транспортних засобів, км.

Зниження витрат від перебування вантажів та пасажирів у шляху [273]:

$$\Delta B = \Delta T \cdot 10^{-3} \cdot C \cdot \Delta L \cdot \sum_{i=1}^m \frac{N_{ipa} \cdot P_a}{V_{pa}}, \quad (4.9)$$

де ΔT – період на який скорочується обмеження руху, діб;

C – збитки в розрахунку на 1 люд.год. перебування у шляху, в тому числі

збитки від транспортної втоми (11,51 – 16,11 грн.);

ΔL – збільшення довжини шляху через об'їзд ділянки дороги, де діє обмеження руху великовагових транспортних засобів, км;

N_{pa} – інтенсивність руху автобусів i -го типу, авт/добу;

P_a – середня кількість пасажирів в автобусі;

V_{pa} – середня швидкість руху автобусів, км/год.

Як доводять результати розрахунків (Додаток Г), залучення даних георадарного зондування з оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна дає змогу оперативно розрахувати коефіцієнт запасу міцності конструкції дорожнього одягу для уточнення терміну обмеження руху щоб:

а) отримати економічний ефект від зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів на 653,24 грн/км·добу;

б) отримати економічний ефект від зменшення відстані проїзду та, відповідно, часу перебування вантажів і пасажирів у шляху під час об'їзду ділянки автомобільної дороги, де обмежено рух, у розмірі 2,836 тис грн./км·добу.

4.4 Розвиток та подальше впровадження наукових результатів, що отримані у дисертаційному дослідженні

Розвиток георадіолокаційних технологій, технічних можливостей антенних систем, методів інтерпретації радарограм, вирішення обернених задач відновлення розподілу діелектричної проникності за глибиною в умовах змінення фізичних параметрів структури, що досліджується, розвиток критеріїв граничного стану конструкцій дорожніх одягів, методів прогнозування стану дорожніх одягів залежно від умов експлуатації, що змінюються в часі, будуть сприяти широкому впровадженню георадіолокаційних технологій в практику проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг.

Тому шляхи подальшого розвитку та впровадження наукових результатів,

що отримані у дисертаційному дослідженні, пов'язуються:

а) з удосконаленням технічних можливостей георадарів в частині збільшення роздільної здатності за глибиною.

В дисертаційному дослідженні був застосований апаратний вимірювальний комплекс для георадарного дослідження дорожнього одягу «ОДЯГ-1» з центральною частотою антенного блоку 1,2 ГГц. Під час обґрунтування параметрів антенної системи виходили з компромісу між роздільною здатністю за глибиною зондування та точністю відновлення геометричних параметрів дорожнього одягу. Тому результати, що отримані в дисертаційному дослідженні за заданого рівня надійності та 95 % довірчого інтервалу, ґрунтуються на зондуванні конструкцій дорожніх одягів загальною товщиною не більше 0,50 м. Оскільки основну мережу автомобільних доріг загального користування України (до 80 %) формують автомобільні дороги з конструкціями дорожнього одягу саме таких товщин, результати дисертаційного дослідження мають суттєве практичне значення. З розвитком технічних можливостей георадарів, алгоритми та методики, що розроблено в дисертаційному дослідженні, дозволять визначати вологість ґрунту земляного полотна для конструкцій значно більшої товщини;

б) з розвитком та впровадженням в практику інженерних (передпроектних) вишукувань георадарних комплексів, що містять як георадари для вирішення задач товщинометрії (з центральною частотою зондуючого імпульсу від 1,0 ГГц до 1,4 ГГц) так і глибинні георадари (з центральною частотою від 400 МГц до 450 МГц), що дозволить залучити алгоритми відновлення профілю діелектричної проникності за глибиною, що, в свою чергу, дозволить визначати розподіл вологості ґрунтів за глибиною без залучення теоретичних методів, що мають певні обмеження у застосуванні. Це, в свою чергу, дозволить обґрунтовувати доцільність застосування дренажних систем та здійснювати їх розрахунок;

в) з подальшим розвитком алгоритмів та програмного забезпечення, що дозволяють автоматично визначати електрофізичні та фізичні, міцнісні та

деформаційні параметри ґрунту земляного полотна. В дисертаційному дослідженні був запропонований метод оброблення георадіолокаційних даних з метою визначення діелектричної проникності на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна». На даний час метод реалізується оператором під час оброблення георадіолокаційних даних.

Результати дисертаційного дослідження пройшли широку апробацію на виробництві та впроваджені у технологічні документи Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор»: Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування (М 02071168-725:2013) [153]; Методика оцінки збитків від проїзду великовагових транспортних засобів по автомобільних дорогах загального користування М 02071168-752:2016 [274].

4.5 Висновки за розділом

1. Розроблено та впроваджено у виробничу практику практичну методику георадарного зондування конструкції дорожнього одягу, відповідні алгоритми та методику оброблення і інтерпретації результатів георадарного зондування під час вирішення задачі оцінювання вологості ґрунту земляного полотна на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна».

2. Розроблено методику оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунтів земляного полотна за даними георадарного зондування. Залучення моделей тепло-вологотеренесення до результатів георадарного зондування дозволяє оцінювати розподіл вологості за глибиною та часом у період максимального вологонакопичення.

3. Визначено економічну ефективність від впровадження методів оцінювання вологості та розрахункових параметрів ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування:

а) очікувана економія від зниження собівартості діагностики георадарним комплексом становить 860,93 грн./км. Під час обстеження 2000 км/рік за

допомогою одного георадарного комплексу очікуваний економічний ефект становить 1697,86 тис.грн./рік;

б) очікуваний економічний ефект 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).

ЗАГАЛЬНІ 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васильев А.П. Эксплуатация автомобильных дорог: учебник для студ. высш. учеб. заведений : в 2 т. М. : Издательский центр «Академия», 2010. Т.1. 320 с.
2. Цытович Н.А. О незамерзающей воде в рыхлых горных породах. М. : АН СССР, 1947. 134 с.
3. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1976. 247 с.
4. Павлюк Д.О., Шур'яков М.В., Гладун С.А. Порівняння методів і засобів контролю ущільнення ґрунтів при будівництві земляного полотна. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава, 2016. Вип. 2. С. 241–254.
5. Ускоерная оценка уплотнения грунтов легким прибором с падающим грузом / Д. Павлюк [та ін.]. Автошляховик України. 2009. №5. С. 27–31.
6. Справочная энциклопедия дорожника : энциклопедия : в 6 т. М. : Росавтодор, 2005. Т.1 : Строительство и реконструкция автомобильных дорог / под ред. А.П. Васильева. 654 с.
7. Бируля А.К., Михович С.И. Работоспособность дорожных одежд. М. : Транспорт, 1968. 172 с.
8. Бируля А.К., Бируля В.И., Носич И.А. Устойчивость грунтов дорожного полотна в степных районах. М. : Дориздат, 1951. 176 с.
9. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / под ред. Н.Н. Иванова та др. М. : Транспорт, 1973. 328 с.
10. Бируля А.К., Сиденко В.М. Определение расчетных влажностей полотна автомобильных дорог на основе теории вероятности. Научное сообщение №6. Х. : ХАДИ, 1958. 36 с.

11. Бируля А.К., Сиденко В.М. Определение расчётной влажности для проектирования дорожного полотна по данным метеостанций. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1954. Вып. 17. С. 49–54.
12. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплового режима дорожных одежд и земляного полотна. М. : Автотрансиздат, 1962. 116 с.
13. ВБН В.2.3-218-186-2004. Дорожній одяг нежорсткого типу. [На заміну ВСН 46-83; чинний від 2005-01-01]. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 2004. 151 с.
14. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. [Действующий от 1984-01-01]. М. : Транспорт, 1985. 136 с.
15. ВБН В.2.3-218-008-97. Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів. [На заміну ВСН 139-80; чинний від 1998-01-01]. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 1997. 219 с.
16. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. [Взамен ВСН 46-83; действующий от 2001-01-01]. М. : Министерство транспорта Российской федерации. Государственная служба дорожного хозяйства России (РОСАВТОДОР), 2001. 94 с.
17. ТКП 45-03.3-3-2004 (02250). Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов. [Действующий от 2005-07-01]. Изд. офиц. Минск: Белавтодор, 2005. 54 с.
18. Ефименко С.В. Обоснование расчетных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд автомобильных дорог (на примере Западной Сибири) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11. Омск, 2006. 23 с.
19. Афиногенов А.О. Обоснование региональных норм степени уплотнения глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог (на примере районов западной Сибири) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11. Омск, 2011. 22 с.
20. Результати приймальних випробувань станції для штампових випробувань дорожніх конструкцій і їх шарів / Д.О. Павлюк [та ін.]. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К., 2013. №90. С.97–105.

21. Станция для штамповых испытаний дорожных конструкций и их слоев / Д. Павлюк [та ін.]. Автошляховик України. 2013. № 2. С.30–35.

22. ДСТУ Б В.2.1-7-2000. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності і реформованості (ГОСТ 20276-99). [На заміну ГОСТ 20276-85, ГОСТ 21719-80, ГОСТ 23253-78, ГОСТ 23741-79; чинний від 2001-03-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2001. 85 с.

23. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і реформованості (ГОСТ 12248-96). [На заміну ГОСТ 12248-78, ГОСТ 17245-79, ГОСТ 23908-79, ГОСТ 24586-90, ГОСТ 25585-83, ГОСТ 26518-85; чинний від 1997-04-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 1997. 107 с.

24. Кривисский А.М. Пузаков Н.А. О методике подготовки образцов для определения модуля деформации грунта. В кн.: Исследование прочности дорожных одежд. М. : Автотрансиздат, 1959. С. 183–197.

25. Сиденко В.М., Михович С.И. Эксплуатация автомобильных дорог : учебник для студентов вузов по специальности «Автомобильные дороги». М. : Транспорт, 1976. 288 с.

26. Васильев А.П., Сиденко В.М. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения : учебник. М.: Транспорт, 1990. 304 с.

27. Славінська О., Стьожка В. Визначення основних параметрів дренажних систем мілкового залягання. Автошляховик України. 2010. № 6. С.40–44.

28. Гамеляк І., Якименко Я. Аналіз зміни загального модуля пружності та міцності на розтяг при згині монолітних шарів нежорсткого дорожнього одягу протягом року. Автошляховик України. 2010. № 4. С. 38–41.

29. Савенко В.Я., Славінська О.С, Стьожка В.В. Методи визначення параметрів дренажу мілкового залягання на автомобільних дорогах з урахуванням річного циклу роботи. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2011. Вип. 17. С. 19–26.

30. Савенко В.Я., Славінська О.С., Усиченко О.Ю. Закономірності водно-теплового режиму земляного полотна. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2014. Вип. 91. С. 97–102.

31. Ефименко В., Ефименко С., Бадина М, Григорьев А. Учет региональных природно-климатических условий при уточнении норм проектирования автомобильных дорог. Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. №1. С. 15–17.

32. Ремонт и содержание автомобильных дорог : справочник інженера-дорожника / В.А. Васильев и др. ; под. ред. А.П. Васильева. М. : Транспорт, 1989. 287 с.

33. Савенко В.Я., Славінська О.С., Усиченко О.Ю., Стьошка В.В. Особливості урахування надходження кількості вологи в дренажні конструкції при відтаванні ґрунту земляного полотна. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2013. Вип. 87. С. 79–85.

34. Білятинський О.А., Заворицький В.Й., Старовойда В.П., Хом'як Я.В. Проектування автомобільних доріг : підручник. В 2 ч. / за ред. О.А. Білятинського, Я.В. Хом'яка. К. : Вища шк., 1997. Ч.1. 518 с.

35. 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 міжнародної науково-технічної конф., м. Харків, 14-16 лист. 2013 р. Харків, 2013. С. 27–31.

36. Тулаев А.Я. Регулирование водного режима земляного полотна на автомобильных дорогах. Сб. Проектирование земляного полотна на железных и автомобильных дорогах. М : Изд. Дориздат, 1950. С. 89–163.

37. Тулаев А.Я. Осушение дренирующего слоя на уклонах. Автомобильные дороги. 1963. №4. С. 18–20.

38. Тулаев А.Я. Расчет дренирующего слоя как средства осушения земляного полотна. М. : Транспорт, 1955. 255 с.

39. Преферансова Л.А. Влияние природных условий местности на устойчивость грунтовых оснований усовершенствованных дорог. Сб.

Проектирование грунтовых оснований усовершенствованных покрытий с учетом их работы в зимних условиях. М., 1953. С. 5–39.

40. Пузаков Н.А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. М. : Автотрансиздат, 1960. 128 с.

41. Тулаев А.Я. Расчет допустимого морозного пучения дорожных одежд: материалы Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по прочности дорожных одежд, Харьков, 1968. С. 106–112.

42. Бируля А.К. Сезонные изменения влажности и плотности уплотненного грунта в дорожном полотне. Труды ХАДИ. Харьков : ХГУ, 1956. Вып. 18. С. 13–20.

43. Бируля А.К. Дороги из местных материалов. М. : Автотрансиздат, 1955. 140 с.

44. Бируля А.К. Полотно и покрытия автомобильных дорог в зоне сухих стезей. Труды ХАДИ. Харьков : ХГУ, 1949. Вып. 13. С. 5–33.

45. Бабков В.Ф. Автомобильные дороги : учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1983. 200 с.

46. Степура В.С., Белятинський А.О., Кужель Н.В. Основи експлуатації автомобільних доріг і аеродромів : навч. посіб. К. : НАУ, 2013. 204 с.

47. Белятинський А.О., Гулюк А.В. Використання геотекстильних матеріалів при стабілізації ґрунтових основ. САПР ALLPLAN у архітектурі та будівництві : матеріали семінару Міжнародного науково-практичного фестивалю (м.Київ, 22-26 квіт. 2013 р.). К., 2013. С. 23–26.

48. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [На заміну ДБН В.2.3-4-2007; чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 2015. 109 с.

49. ГБН В.2.3-37641918-554:2013. Шари дорожнього одягу з кам'яних матеріалів, відходів промисловості і ґрунтів, укріплених цементом. [На заміну ВБН В.2.3-218-002-95; чинний від 2013-11-01]. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 2013. 43 с.

50. Гамеляк І.П., Петрович В.В., Скрипник В.Ю. Вплив термовологоперенесення на водно-тепловий режим дорожньої конструкції. Наукові нотатки: зб. наук. пр. Луцьк, 2014. Вип. 45. С. 119–130.

51. Жданюк В.К., Лапченко А.С., Панасюк Я.І. Властивості комплексно укріпленого ґрунту для будівництва конструктивних шарів дорожніх одягів автомобільних доріг. Наукові нотатки : зб. наук. пр. Луцьк, 2012. Вип. 37. С. 101–104.

52. Жданюк В., Лапченко А., Панасюк Я. Властивості цементоґрунту з добавками поліпропіленової фібри. Автошляховик України. 2012. № 1. С. 30–32.

53. Кірічек Ю.О., Балашова Ю.Ю. Підвищення стійкості високих насипів автодоріг у складних інженерно-геологічних умовах. Вісник ПДАБА. Дніпропетровськ, 2008. №4–5. С. 13–17.

54. Киричек Ю.А., Коник В.С. Изменение характеристик ґрунтов, уплотненных длительно действующей нагрузкой. Вісник ПДАБА. Дніпропетровськ, 2014. №8. С. 15–19.

55. Носов В., Гнездилова С. Влияние природно-климатических факторов на колеобразование. Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. №4. С. 25–27.

56. Орнатский Н.В. Проектирование противопучинистых мероприятий. Сб. Регулирование водяного режима. М., 1946. Вып. 6. С. 37–85.

57. Павлюк Д., Шурьяков М., Шуляк І., Гладун С. Обґрунтування формул для визначення модуля деформації як показника ущільнення ґрунтів земляного полотна. Автошляховик України. 2015. №3. С. 41–43.

58. Петрович В.В., Скрипник Т.В. Передумови розрахунку дорожньої конструкції на водно-теплові навантаження. Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов : материалы Междунар. научно-практ. конф. с участием студентов и молодых ученых, г. Харьков, 1-4 нояб. 2012 р. Харків, 2012. С. 240–241.

59. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Н.А. Пузаков та ін. ; под ред. профессорів І.А. Золотаря, Н.А. Пузакова, В.М. Сиденка. М. : Транспорт, 1971. 416 с.
60. Пузаков Н.А. Предохранение дорожного полотна от грунтовых вод. Сб. Регулирование водного режима дорожных оснований. М., 1946. Вып. 41. С. 86–127.
61. Пузаков Н.А. Теоретические основы зимнего накопления влаги в дорожном полотне и их практическое применение. Сб. Проектирование и возведение земляного полотна железных и автомобильных дорог. М., 1950. С. 58–88.
62. Рувинский В.Н. Оптимальные конструкции земляного полотна. М. : Транспорт, 1982. 168 с.
63. Носич И.А. Сезонные колебания влажности и плотности грунтов в полотне дорог степных районов. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1951. Вып. 13.
64. Носич И.А. Влияние влажности на прочность грунта в дорожном полотне. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1950. Вып. 10. С. 21–30.
65. Сиденко В.М. О расчётном состоянии грунтовых оснований дорожных покрытий в степных районах. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1957. Вып. 19. С. 77–82.
66. Сиденко В.М. Сезонные изменения прочности грунта дорожного полотна в степных районах. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1959. Вып. 20. С. 20.
67. Сиденко В.М. О методах расчета воднотеплового режима при парообразном увлажнении дорожных одежд и полотна. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1961. Вып. 25.
68. Гудзинский М.Н. Обоснование расчетных характеристик грунтов полотна автомобильных дорог применительно к природным условиям СССР : дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.23 / ХГУ. Х., 1975. 265 с.
69. Кірічек Ю.О., Балашова Ю.Б., Легка Н.В. Из досвіду проектування земляного полотна автомобільної дороги на органічних глинистих ґрунтах. Вісник ПДАБА. Дніпропетровськ, 2011. №1–2. С.63–67.

70. Начіпне обладнання НТУ для оцінки міцності і деформативності дорожніх конструкцій та ґрунтових основ / Д. Павлюк [та ін.]. Автошляховик України. 2008. № 3. С. 33–36.

71. Павлюк Д., Шурьяков М., Шуляк І., Гладун С. Обґрунтування формул для визначення модуля деформації як показника ущільнення ґрунтів земляного полотна. Автошляховик України. 2015. №3. С. 41–43.

72. Пристрій для автоматизованого вимірювання фактичного та асимптотичного модуля деформації ґрунтів та основ дорожніх одягів / Д. Павлюк [та ін.]. Автошляховик України. 2012. №1. С. 33–37.

73. Павлюк Д.А. Анализ требований государственных норм «Автомобильные дороги» к уплотнению оснований дорожных одежд. Автошляховик України. 2015. № 1–2. С. 50–53.

74. Золотарь И.А. Основы расчета водно-тепловых процессов в земляном полотне автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых горных пород : материалы VIII Всесоюзного межведомственного совещания по геокриологии. Якутск, 1966. С. 12–20.

75. Золотарь И.А. Теоретические основы применения тонкодисперсных ґрунтов для возведения земляного полотна автомобильных дорог в северных районах области многолетнемерзлых ґрунтов : монография. Л. : Военная акад. тыла и трансп, 1961. 422 с.

76. Алексиков С., Будрудинова А. Обоснование региональной влажности ґрунтовых обочин автомобильных дорог юга РФ. Дороги и мосты. 2012. №1(27). С. 71–78.

77. Гнездилова С.А. Учёт изменений состояния ґрунтов при проектировании дорожных одежд (на примере Белгородской области) : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. М., 2010. 23 с.

78. Ефименко С.В. Исследования состава и свойств глинистых ґрунтов районов Западной Сибири для назначения их расчётных характеристик. Вестник Том. гос. архитектурно-строит. ун-та. Томск, 2005. №1(10). С. 213–220.

79. Шкулова Н.Г. Причины деформаций на дорогах Северного Казахстана. Исследование эксплуатационно-транспортных показателей автомобильных дорог Западной Сибири. Омск, 1970. С. 52–55.

80. Котвицкий А.М. Сезонные изменения расчетных характеристик грунтов земляного полотна в засушливых районах Казахстана. Труды СоюздорНИИ. М. : СоюздорНИИ, 1970. Вып. 43. С. 71–93.

81. Леонович И.И., Вырко Н.П. Накопление и передвижение влаги в грунтах земляного полотна. Строительные конструкции и теория сооружений. Минск, 1973. Вып. 2. С. 17–23.

82. Влияние водно-тепловых процессов на параметры земляного полотна и прочность автомобильных лесовозных дорог / И.И. Леонович и др. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог. Минск, 1972. С. 64–70.

83. Леонович И.И., Вырко Н.П. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог. Минск : БНТУ, 2013. 332 с.

84. Порицкий Р.З., Корюков В.П. Организация наблюдений за водно-тепловым режимом автомобильных дорог в Полесье. Сб. «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов». Минск, 1971.

85. Михович С.И. Обоснование расчетного состояния грунта при лабораторных исследованиях его прочности. Труды ХАДИ. Х. : ХГУ, 1968. Вып. 28 С. 77–82.

86. Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Бердников А.Д. Назначение расчетной влажности глинистых грунтов земляного полотна для проектирования дорожных одежд на территории Западной Сибири. Вестник ТГАСУ. Томск, 2012. №1. С. 160–168.

87. Сіденко В.М., Фомін В.О. Водно-тепловий режим міських доріг. Х. : ХДУ, 1971. 180 с.

88. Методические указания по прогнозу влажности глинистых грунтов на годовой период. М.: РОСАВТОДОР, 1973. 63 с.

89. Кудрявцев М.Н. Проектирование земляного полотна автомобильных дорог в Западно-Сибирской низменности. Сборник тезисов докладов первой научной сессии вузов, объединенных Западно-Сибирским советом по координации научно-исследовательской работы. Томск, 1963. Вып. 1. С. 140-141.

90. Шелопаев Е.И., Юрков Ф.Х. Проектирование автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты : учебное пособие. Красноярск : Красноярский политехнический ин-тут, 1977. 68 с.

91. Шелопаев Е. Прогнозирование водно-теплового режима земляного полотна и дорожной одежды с применением ЭВМ. Автомобильные дороги. 1973. №10. С. 26.

92. Маркуц В.М. Расчёт влажности грунтов активной зоны. Тюмень, 1985. 61 с.

93. Константинов А.Р. Испарение в природе. Л. : ГИМИЗ, 1968. 59 с.

94. Карлинский М.И. К вопросу о методике определения расчётной влажности глинистых грунтов в годовом цикле : инструктивно-методические указания. М., 1969. 26 с.

95. Гушля А.В., Мезенцев В.С. Водно-балансовые исследования. К. : Высшая школа, 1982. 232 с.

96. Мезенцев В.С., Карнацевич Н.В. Увлажнённость Западно-Сибирской равнины. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 167 с.

97. Мезенцев В.С. Графики для определения влажности почвы и элементов водного баланса за внутригодовые промежутки времени по климатическим данным. М. : Известия АН СССР, 1970. №3.

98. Режимы влагообеспеченности и условия гидромелиорации степного края / В.С. Мезенцев и др. М. : Колос, 1974. 239 с.

99. Скрыпников А.В. Исследование влажности грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорогах. Научный журнал КубГАУ. 2012. №77 (03). С. 235–245.

100. Мезенцев В.С. Расчёты водного баланса. Омск : ОмСХИ, 1976. 74 с.

101. Мезенцев В.С. Метод гидролого-климатических расчетов и опыт его применения для районирования Западно-Сибирской равнины по признакам увлажнения и теплообеспеченности : Труды ОмСХИ. Омск: ОмСХИ, 1957. Т. 147. 121 с.

102. Кондрашова Е.В. Прогнозирование влажности грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог. Фундаментальные исследования. 2011. №4. С. 83–88.

103. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М. : Высшая школа, 1973. 400 с.

104. Вериго С.А., Разумова Л.А. Почвенная влага (применительно к запросам сельского хозяйства). Л. : Гидрометеиздат, 1973. 327 с.

105. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге : в 2 т. Л. : Гидрометеиздат, 1969. Т.2 : Методы изучения водного режима почв. 287 с.

106. Роде А.А. Водный режим некоторых основных типов почв СССР (по многолетним данным). Тепловой и водный режим почв СССР. М. : Наука, 1968. С. 88–142.

107. ДСТУ Б В.2.1-6-2000. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Польові випробування. Загальні положення (ГОСТ 30672-99). [Чинний від 2001-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2000. 13 с.

108. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. Вперше [зі скасуванням в Україні ГОСТ 5180-84; чинний від 2010-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 36 с.

109. ДСТУ Б В.2.1-8-2001. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків (ГОСТ 12071-2000). [На заміну ГОСТ 12071-84; чинний від 2002-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2002. 16 с.

110. ДСТУ Б В.2.1-3-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення (ГОСТ 30416-96). [Чинний від 1997-04-01]. Вид. офіц. Київ : Держкоммістобудування України, 1997. 27 с.

111. ОСТ 56-81-84. Полевые исследования почвы. Порядок и способы проведения работ, основные требования к результатам. [Действующий от 1986-01-01]. М. : Отраслевой стандарт, 1984. 19 с.
112. ТКП 140-2008 (02191). Автомобильные дороги. Порядок выполнения диагностики. Впервые [с отменой РД 0219.1.21–2001; действующий от 2009-01-01]. Минск : Белавтодор, 2008. 45 с.
113. Иванов Н.Н., Поройков И.В. Применение достижений физики в строительстве автомобильных дорог. М. : Автотрансиздат, 1960. 148 с.
114. Black W.P.M., Croney D. Pore water pressure and moisture content studies under experimental pavements. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London, Vol. 2, pp. 94–103.
115. Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Оптические методы и устройства контроля влажности. М. : Энергоатомиздат, 1986. 96 с.
116. ДСТУ Б В.2.7-291:2011. Будівельні матеріали. Нейтронний метод вимірювання вологості (ГОСТ 23422-87, MOD). Вперше [зі скасуванням в Україні ГОСТ 23422-87; чинний від 2012-12-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. 11 с.
117. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е.С. Кричевский и др. ; под ред. Е.С. Кричевского. М. : Энергия, 1980. 240 с.
118. ДСТУ Б В.2.1-26:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи радіоізотопного вимірювання щільності та вологості. Вперше [зі скасуванням в Україні ГОСТ 23061-90; чинний від 2010-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 24 с.
119. Хараджа Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. М : Энергия, 1966. 568 с.
120. Данилин А. Способ измерения влажности почвогрунтов на основе газопроницаемости. Геофизические и изотопные методы исследования в гидрогеологии и инженерной геологии. 1975. С. 162–166.
121. Мерзлотные явления в грунтах : сборник статей / под ред. Н.А. Цытовича. М. : Изд-во Иностранной литературы, 1955. 479 с.

122. Черняк Г.Я. Методы определения естественной влажности и пористости песчаных грунтов. Водгео. Информационные материалы №7, 1955.
123. Кулижников А.М., Белозеров А.А. Неразрушающие георадарные методы в инженерных изысканиях. Геопрофи. 2004. №5. С. 44–47.
124. Батракова А.Г. Оценка состояния дорожных одежд с привлечением георадарных технологий : монография. Х. : ХНАДУ, 2013. 156 с.
125. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллективная монография / под ред. А.Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 34 с.
126. Архангельский С.В. Автоматизированный диагностический комплекс контроля состояния технических объектов железнодорожной инфраструктуры «ЭРА». Железнодорожный транспорт. 2008. №1. С. 76–82.
127. Хакиев З.Б., А.А., Карпов А.Ю., Явна В.А. Прямая задача георадиолокации. Расчеты радарограмм для сред с разной влажностью. Инженерная и рудная геофизика – 2008 : 4 Междунар. научно-практ. конф., г. Геленджик, 25-30 апр. 2008 г. М., 2008. С.72–73.
128. Георадары, дороги – 2000 : материалы Междунар. научно-техн. семинара (2000 г., г. Архангельск). Архангельск, 2000. 104 с.
129. Георадары, дороги – 2002 : материалы Междунар. научно-практ. конф. (2002 г., г. Архангельск). Архангельск, 2002. 94 с.
130. Калмыков А.И., Тимченко А.И., Щербинин И.Н. Возможности исследования подповерхностных объектов с помощью радиолокационного зондирования : Институт радиофизики и электроники, 1990. №13. 25с. (Препринт. АН УССР, Институт радиофизики и электроники; 1990-13)
131. Topp G.C., Yanuka M., Zebchuk W.D., Zegelin S. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry : Soil and water experiments in coaxial lines. Water Resources. 1988. № 24.PP. 945–952.
132. Scullion T., Lau C.L., Chen Y. Pavement evaluations using ground penetrating radar in Texas. Proc. 5th Intl. Conf. on GPR, Kitchener, Ontario, 12-16 June 1994. Kitchener, Ontario, 1994. Vol. 1 of 3. PP. 449–463.

133. Scullion T., Chen Y., Lau C.L. Colormap – user's Manual with Case Studies. Texas: DOTPD [Rep. TX-95-1341-1]. 1995.
134. Maser K.R. Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar. J. Infrastruct. Syst. 1996. Vol. 2 (2). PP. 94–101.
135. Mardeni R.R., Raja Abdullah S.A., Shafri H.Z.M. Road pavement density analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system. Progress In Electromagnetics Research. 2010. Vol. 21. PP. 399–417.
136. Батракова А.Г., Ряпухін В.М., Галащук І.Б. Георадарні дослідження дорожніх одягів : монографія. Х. : ХНАДУ, 2011. 156 с.
137. Батракова А.Г., Галащук И.Б. Георадиолокационные исследование дорожных одежд. Науковий вісник будівництва. Х. : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. Вип. 47. С. 57–61.
138. Кулижников А.М. Белозеров А.А. Георадарные методы определения влажности грунтов земляного полотна. Дороги и мосты. 2005. Вып.13/1. С. 185–193.
139. Кулижников А.М. Применение георадарных технологий в проектно-изыскательских работах. М., 2004. 76 с.
140. Кулижников А.М. Георадары в дорожном строительстве. М., 2000. 51 с.
141. Лушников Н.А. Перспективы развития неразрушающих методов обследования автомобильных дорог. Дороги России XXI века. 2003. №5. С. 65–67.
142. Лушников Н.А., Лаврухин С.В. Метод радиолокационного контроля состояния дорожных одежд и земляного полотна. Труды ГП РосдорНИИ. М. : РосдорНИИ, 1998. Вып. 9. С. 101–104.
143. Макеечева И.В. Дорожный рентген. Георадиолокационные исследования при дорожном строительстве и диагностике состояния дорог. Строит. техника и технологии. 2001. №5. С. 38–39.
144. Annan A.P., Davis J.L. Impulse radar soundings in permafrost. Radio Science. 1976. Vol. 4. PP. 383–394.
145. Annan A.P., Davis J.L., Gendzwill D. Radar sounding in potash mines. Geophysics. Vol. 53. PP. 1556–1564.

146. Davis J.T., Annan F.P. Ground-penetrating Radar for High-resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy Geophysical Prospecting. 1989. №37. P. 531–552.
147. Saarenketo T. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys. Oulu, 2006. 127 p.
148. Saarenketo T., Nikkinen T., Lotvonen S. The use of ground penetrating radar for monitoring water movement in road structures. Proc. 5th Intl. Conf. on GPR, Kitchener, Ontario, 12-16 June 1994, Kitchener, Ontario, 1994. Vol.3. PP. 1181–1192.
149. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics. 2000. Vol. 43. PP. 119–138.
150. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций. М.: Росавтодор, 2003. 38 с.
151. Методика застосування георадарних технологій при контролі якості влаштування земляного полотна, конструктивних шарів дорожніх одягів та систем водовідводу. К. : Держбуд України, 2008. 40 с.
152. М 02071168-706:2012. Методика дефектоскопії шарів дорожнього одягу методами під поверхневого зондування. [Чинний від 2012-01-01]. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 2012. 78 с.
153. М 02071168-725:2013. Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування. [Чинний від 2013-01-01]. Вид. офіц. Київ : Укравтодор, 2013. 78 с.
154. ОДН 218.0.006-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. [Взамен ВСН 6-90; действующий от 2002-10-03]. М. : Росавтодор, 2002. 196 с.
155. Богатырев Е.Ф. Результаты радиолокационного подповерхностного зондирования мерзлых пород. Теория и техника радиолокации и радиосвязи. 1988. С. 35–37.
156. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию : учебное пособие. М. : МГУ, 2004. 153 с.

157. Калинин А., Владов М., Старовойтов А., Шалаева Н. Высокоразрешающие волновые методы в современной геофизике. Разведка и охрана недр. 2002. №1. С. 23–27.

158. Владов М., Старовойтов А., Калашников А. Основные типы деформаций в железнодорожных насыпях по данным георадиолокационного профилирования. Разведка и охрана недр. 2006. №12 С. 14–17.

159. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллективная монография / О.В. Сытник и др. ; под ред. А.Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.

160. Перспективы использования георадиолокации в геологоразведке углеводородов / Л. Волкомирская [и др.]. Инженерная и рудная геофизика – 2009 : 5-я Междунар. научно-практ. конф., г. Геленджик, 26-30 апр. 2009 г. М., 2009.

161. Гензе Д.А. Применение георадарных технологий мониторинга грунтов в условиях Среднего Приобья : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Тюмень, 2011. 20 с.

162. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н. Оценка состояния конструктивных слоев и землеполотна автодорог по данным георадиолокации. Разведка и охрана недр. 2001. № 3. С. 39-42.

163. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н. Некоторые перспективные направления развития метода георадиолокации в инженерной геофизике. Георадар-2002 : тезисы конференции. М., 2002. С.1–4.

164. Ефимова Н.Н. Георадиолокационные исследования при решении задач инженерной геофизики : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 04.00.12. СПб., 1999. 16 с.

165. Финкельштейн М.И., Кугев В.А, Золотарев В.Л. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М. : Недра, 1986. 128 с.

166. Денисов Р., Капустин В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме. Геофизика. 2010. №4. С. 76–80.

167. Капустин В.В., Денисов Р.Р., Мойшенен Л.О. Применение георадарного метода в квазиродных средах. Сборник материалов 5 Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли. 2011. Т.2. С. 343–346.
168. Копейкин В.В. Опыт применения георадиолокации в геофизике [Электронный ресурс] / В.В. Копейкин. Режим доступа: <http://geo-radar.ru/publish/pub4.php#1>.
169. Копейкин В.В. Первичная обработка георадарных сигналов [Электронный ресурс] / В.В. Копейкин. Режим доступа: <http://www.geo-radar.ru/articles/article3.php>
170. Лукьянов С.П., Семенчук В.Е. Реконструктивное подповерхностное зондирование. Изв. вузов. Электроника. 1998. № 3. С. 114–120.
171. Количественная обработка георадиолокационных данных / А.В. Морозов [и др.]. Вестник РГУПС. Ростов, 2011. № 3. С. 96–105.
172. Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В. Некоторые результаты применения георадара «ОКО». Георадар-2004 : тезисы докладов IV Междунар. научно-практ. конф., г. Москва, 29 марта-2 апр. 2004 г. М., 2004. С. 100–103.
173. Судакова М.С. Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях : дис. ... канд. физико-математических наук : спец. 25.00.10 / МГУ. М., 2009. 125 с.
174. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
175. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А, Радиолокация слоистых земных покровов. М. : Сов. Радио, 1977. 151 с.
176. Хакиев З.Б. Некоторые особенности амплитудно-частотных характеристик георадиолокационных трасс в средах с различной проводимостью. Известия СКНЦ Высшей школы. Естественные науки. 2009. Т.6. С.41–43.

177. Хакиев З.Б. Определение свойств грунта георадиолокационным методом. Труды третьей всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». М.: ИРЭ РАН, 2009. Т. 1. С. 177–181.

178. Георадиолокационные исследования объектов железнодорожного пути / В.А. Явна [и др.]. Георадар-2004 : тезисы докладов 4-ой Междунар. научно-практ. конф., г. Москва, 29 марта-2 апр. 2004 г. М., 2004. С. 83–84.

179. M. Jol Harry. Ground Penetrating Radar : Theory and Applications. Amsterdam : Elsevier Science, 2009. 508 p.

180. Maierhofer C. Nondestructive Evalution of Concrete Infrastructure with Ground Penetrating Radar. Journal of Materials in Civil Engineering. 2003. May/June 2003. (Vol. 15). PP. 287–297.

181. Mardeni R.R., Raja Abdullah S.A., Shafri H.Z.M. Road pavement density analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system. Progress In Electromagnetics Research. 2010. Vol. 21. PP. 399–417.

182. Lunt I.A., Hubbard S.S., Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. Journal of Hydrology. 2005. 9 June. (Vol. 307). PP. 254–269.

183. Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic detection of soil water. Canadian Journal Remote Sense. 1977. Vol. 1 (3). P. 76–86.

184. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resource. 1980. Vol. 16 (3). P. 574–582.

185. Thomas A.M., Rogers C.D.F., Metje N., Chapman D.N. Soil Electromagnetic Mapping for Enhanced GPR Utility. 25th International No-Dig Conference and Exhibition : Proceedings, Rome, Italy, 9-12 September 2007. Rome, Italy. 2007. P. 1–12.

186. Батракова А.Г., Батраков Д.О. Определение плотности и влажности грунтов земляного полотна методами георадиолокации. Дороги і мости : зб. наук. статей. К. : ДержНДІ ім. М. П. Шульгіна, 2006. Вип. 5. С. 15–35.

187. Grote K., Hubbard S., Harvey J., Rubin Y. Evaluation of infiltration in

layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 2005. №57. P. 129–153.

188. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М. : МГУ, 2008. 190 с.

189. Батракова А.Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.11 / ХНАДУ. Х., 2014. 397 с.

190. Боярский Д.А., Тихонов В.В. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв : ИКИ РАН, 2003. 48 с. (Препринт. ИКИ РАН; 2003).

191. Словарь по геологии нефти и газа. Л.: Недра, 1988. 680 с.

192. Справочник физических констант горных пород / под ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969. 544 с.

193. Campbell M.J., Ulrichs J. Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations. *J. Geophys. Research*. 1969. Vol. 74. (N.25.) PP. 5867–5881.

194. Виняйкин Е.Н., Зиничева М.Б., Наумов А.П. Ослабление миллиметровых и сантиметровых радиоволн и изменение их фазы в среде, состоящей из сухих и обводненных пылевых частиц : Научно-исследовательский радиофизический институт, 1993. 40 с. (Препринт. Научно-исследовательского радиофизического института (НИР ФИ); 1993).

195. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 243 с.

196. Черняк Г.Я., Мясковский О.М. Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1973. 176 с.

197. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М. : Наука, 1986. 192 с.

198. Белая М., Левадный В. Молекулярная структура воды. Новое в жизни, науке, технике. Сер. Физика. 1987. № 11. С. 3–61.

199. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и

проблемы. Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 79–85.

200. Ray P.S. Broadband Complex Refractive Indices of Ice and Water. J. Applied Optics. 1972. Vol. 11(N. 8). PP.1836–1844.

201. Stogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of saline water. IEEE Transactions on Microwave Theory Tech. 1971. Vol. 19. PP. 733–736.

202. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.

203. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий / И.Н. Садовский [и др.]. : ИКИ РАН, 2013. 59 с. (Препринт / ИКИ РАН; 2013)

204. Криворучко Я.С. Визначення ефективної діелектричної проникності гетерогенних середовищ та оцінка вмісту вологи в ґрунтах. Поверхность. 2011. Вып. 3(18). С. 22–28.

205. Wang J.R., Schmugge T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing. 1980. Vol. 18 (N. 4). PP. 288–295.

206. Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism. Oxford: Clarendon.1891. V.2. PP. 265–290.

207. Геофизические методы изучения коллекторских свойств и нефтенасыщенности горных пород: материалы Межвузовского совещания по вопросам новой техники в нефтяной промышленности. / под ред. В.Н. Дахнова. М. : Гостоптехиздат, 1958. Т.1.

208. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1978. 390 с.

209. Lichteneker K. Die Dielectrizitatskonstante naturlicher und Kunstlicher Mischkorper. Physik Z. 1926. Vol. 27. PP. 115–255.

210. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. ЖТФ. 1951. Т.21 Вып. 6. С. 667–677.

211. Венгер Е.Ф., Гончаренко А.В., Дмитрук М.Л. Оптика малих частинок і дисперсних середовищ. К. : Наукова думка, 1999. 348 с.

212. Hilfer R. Dielectric response of porous medium. Phys. Rev. B. 1991. V.44. P. 60–76.
213. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М. : Мир, 1986. 664 с.
214. Bruggeman D.A.J. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterigenen Substanzen. P. II. Ann. Phys., Leipzig, 1935. V. 24. № 8. PP. 665– 679.
215. Бобров А.П., Бобров П.П., Ивченко О.А., Мандрыгина В.Н. Определение диэлектрической проницаемости прочно- и рыхлосвязанной воды на СВЧ с использованием емкостной модели диэлектрической проницаемости почв [Электронный ресурс] : Электронный научный журнал «Вестник Омского государственного педагогического университета». Омск, 2006. Режим доступа: www.omsk.edu.
216. Хаммуд Ф.М., Герасимов В.П., Гордиенко Ю.Е. СВЧ диэлектрическая проницаемость дисперсных влагосдорежающих сред. Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10. № 3. С. 334–340.
217. Birchak J.R., Gardner G.G., Hipp J.E., Victor J.M. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. Proc. IEEE. 1974. Vol. 62. PP.93–98.
218. Wang J.R., Schmugge T.J. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content. National Aeronautics and Space Administration Goddard Spans. 1978. 39 p.
219. Rada G.R. SHRP-LTPP Monitoring Data: Five-Year Report. SHRP-P-696, PCS. Law Engineering, Beltsville, Maryland, Washington : DC, 1994. 106 p.
220. Lakkavalli V.A., Falls L.C. Model for Real-Time Monitoring of Pavements. 7th International Conference on Managing Pavement Assets : Proceedings, Calgary Alberta, Canada, 23-28 June 2008. Calgary, 2008. P. 100–109.
221. Кондрашова Е.В., Волков А.М. Повышение эффективности транспортной работы автомобильных дорог в лесном комплексе : монография. Воронеж : ВГУ, 2010. 232 с.
222. Huston D.R., Pelczarski N.V., Esser B., Maser K.R. Damage detection in

roadways with ground penetrating radar. Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar: Proceedings, Gold Coast, Australia. 2000. PP. 91–94.

223. Батракова А.Г., Урдзік С.М., Процюк В.О. Дослідження електрофізичних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів. Містобудування та територіальне планування : Науково-технічний збірник. Київ, 2011. №40. С. 93–97.

224. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М., Орхименко Р.К. Уплотнение грунтов дорожных насыпей. М. : Автотрансиздат, 1958. 44 с.

225. Хархута Н.Я., Васильев Б.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1975. 288с.

226. Пьянков С.А., Азизов З.К. Механика грунтов : учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2014. 169 с.

227. Казарновский В.Д. В.Д., Лейвланд И.В., Мирошкин А.К. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог. М. : СоюздорНИИ, 2002. 55 с.

228. Механика грунтов, основания и фундаменты : учеб. пособие для строит. спец. вузов : 4-е изд., стер. / С.Б. Ухов, и др. ; под ред. С.Б. Ухова. М. : Высш. шк., 2007. 566 с.

229. Учебное пособие по курсу "Механика грунтов" / А.А. Петраков и др. ; под ред. А.А. Петракова. Макеевка : ДонНАСА, 2004. 164 с.

230. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов : учебное пособие для автомоб.-дор. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1986. 239 с.

231. Качинский Н.А. Физика почвы . М. : МГУ, 1965. 263 с.

232. Морозов С.С. Почвы и условия почвообразования в Калининской обл. Уч. записки МГУ. Москва, 1939. Вып.29. С. 5–32.

233. Морозов С.С. Зависимость физических и механических свойств грунтов от состава обменных катионов. Уч. записки МГУ. Москва, 1946. Вып. 105. С. 122-143.

234. Попова И.В. Основы инженерно-геологического грунтоведения : методич. пособ. М.-Л.: Госгеолиздат, 1941. 223 с.
235. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. Физико-химическая механика дисперсных структур. 1966.
236. Соколов В.Н. Влияние влажности на прочность структурных связей глинистых частиц. Вестник Моск. университета, сер. геология. Москва, 1973. № 6. С. 100–104.
237. Соколов В.Н. Влияние минералогического состава на прочность структурных связей глинистых частиц. Вестник Моск. университета. Сер. геология. Москва, 1973. № 4. С. 114–117.
238. Осипов В.И., Соколов В.Н. Роль ионно-электростатических сил в формировании структурных связей глин. Вестник Моск. университета. Сер. геология. Москва, 1974. № 1. С. 16–32.
239. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ, 1979. 210 с.
240. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия : учебн. 2-е изд. М. : Высшая школа, 1992. 414 с.
241. Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А., Щукин Е.Д. Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М. : Химия, 1982. 185 с.
242. Табарин В.А., Демьянцева С.Д. Определение содержания связанной воды в кернах на СВЧ [Электронный ресурс] : Нефтегазовое дело. 2009. 28 с. Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>.
243. Явна В.А., Хакиев З.Б., Кислица К.Ю., Рассудов М.С. Определение эффективности георадиолокационного метода в грунтах с различными электрофизическими свойствами [Электронный ресурс] : Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/872>.
244. Радовский Б.С. Методы и приборы контроля качества дорожных покрытий в США. Дор. техника. Сер. Контроль качества дорожных покрытий в США. 2005. № 7.

245. Солдовieri Ф., Персико Р., Головки М., Почанин Г. Два метода определения диэлектрической проницаемости грунта на основании георадиолокационных данных. Успехи современной радиоэлектроники. 2009. №5. С. 60–73.

246. Schmugge T.J., Jackson T.J., McKim H.L. Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Res. 1980. Vol. 16 (6). PP. 961–979.

247. Миронов В.Л., Анисимова А.Ю., Фомин С.В., Косолапова Л.Г. Область применения диэлектрической модели Шмагге для влажных почв. Решетневские чтения. 2009. № 13. С. 187–188.

248. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц / Т. Беляева [и др.]. Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28–34.

249. Бобров П.П., Мандрыгина В.Н., Стасюк В.Д., Убогов В.И. Диэлектрическая проницаемость почв лесотундровой зоны Красноярского края [Электронный ресурс] : Электронный научный журнал «Вестник Омского государственного педагогического университета». Омск, 2006. Режим доступа: www.omsk.edu

250. Вырко Н.П., Леонович И.И. Дорожное грунтоведение с основами механики грунтов : учебник. Минск : Высшая школа, 1977. 224 с.

251. Болтинцев В.Б. Аппаратно-программный комплекс электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.11.15. С-Петербург-Томск, 2015. 393 с.

252. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. Пущино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.

253. Roth K., Schulin R., Fluhler H., Attinger W. Calibration of time domain reflectometry for water content using a composite dielectric approach. Water Resour. Res. 1990. Vol. 26 (10). PP. 2267–2273.

224. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. [Действующий с 1984-01-01]. М. : Транспорт, 1985. 136 с.

255. Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes / R.L. Lytton et al. Report SHRP-A-357. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1993.

256. Пиоро Е.В. Деформационные и акустические свойства глинистых грунтов по результатам лабораторных инженерно-геологических и ультразвуковых исследований : дис. ... канд. геолого-минерал. наук : спец. 25.00.08. М., 2014. 220 с.

257. Грунтоведение / Трофимов В.Т., и др. ; под ред. В.Т. Трофимова. 6-е изд., перер., и доп. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.

258. Зиангиров Р.С. Объемная деформируемость глинистых грунтов. М. : Наука, 1979. 164 с.

259. Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. М. : ДАР/ВОДГЕО, 2005. 94 с.

260. Батраков О.Т. Особенности конструирования и расчета одежд сельскохозяйственных дорог. Проектирование и строительство сельскохозяйственных дорог : сб. науч. трудов МАДИ. М., 1983. С. 54–56.

261. Lamborn M.J. A Micromechanical Approach to Modeling Partly Saturated Soils. M.S. Thesis. Texas A&M University, College Station, Texas, 1986.

262. ДСТУ Б В.2.1-19:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення гранулометричного (зернового) та мікроагрегатного складу. Вперше [зі скасуванням в Україні ГОСТ 12536-79; чинний від 2010-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 29 с.

263. ДСТУ Б В.2.1-12:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти Метод лабораторного визначення максимальної щільності. Вперше [зі скасуванням в Україні ГОСТ 22733-77; чинний від 2010-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 15 с.

264. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying : in the book of Advanced

Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications / G.P. Pochanin et al. London : CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016. 464 p.

265. ДСТУ Б В.2.1-2-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація (ГОСТ 25100-95). [На заміну ГОСТ 25100-82; чинний від 1997-04-01]. Вид. офіц. Київ : Укрархбудінформ, 1997. 51 с.

266. Стасовская К.А. Грунтоведение и механика грунтов : лабораторные работы. К. : Вища школа, 1977. 128 с.

267. Грушко И.М., Сиденко В.М. Основы научных исследований. 3-е изд., перераб. и доп. Х. : Вища школа, 1983. 224 с.

268. Антонов В.М., Евдокимцев О.В. Механика грунтов : лаб. раб. Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2005. 32 с.

269. СОУ 42.1-37641918-071:2018. Автомобільні дороги. Ресурсні елементні кошторисні норми на роботи з експлуатаційного утримання. [На заміну СОУ 42.1-37641918-071:2011; чинний від 2018-04-01]. Вид. офіц. Київ : Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), 2018. 300 с.

270. СОУ 42.1-37641918-035:2018. Автомобільні дороги. Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. [На заміну СОУ 42.1-37641918-035:2010; чинний від 2018-04-01]. Вид. офіц. Київ : Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), 2018. 352 с.

271. ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва. [На заміну СНиП 1.02.07-87; чинний від 2008-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. 72 с.

272. СОУ 45.2-00018112-042:2009. Автомобільні дороги. Визначення транспортно-експлуатаційних показників дорожніх одягів. [На заміну ДСТУ 218-02070915-102-2003; чинний від 2009-08-01]. Вид. офіц. Київ : Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2009. 32 с.

273. ВСН 21-83. Указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию

автомобильных дорог. [Взамен 21-75; действующий от 1986-01-01]. М. : Транспорт, 1985. 125 с.

274. М 02071168-752:2016. Методика оцінки збитків від проїзду великовагових транспортних засобів по автомобільних дорогах загального користування. [Чинний від 2016-01-01]. К. : Укравтодор, 2016. 290 с.

275. Гамеляк І.П., Шевчук В.Р. Модель оцінки руйнівного впливу великовантажних транспортних засобів на монолітні шари нежорсткого дорожнього одягу. Вісник ЦНЦ ТАУ. 1999. № 2. С. 82–85.

ДОДАТОК А

Результати тарування важільного пресу

Таблиця А.1 – Визначення коефіцієнту важеля під час тарування

Вантаж 2 кг					Вантаж 4 кг				
Показ динамометра, мм	Сила, кН	Навантаження на штамп, кг	Коефіцієнт	Середнє значення	Показ динамометра, мм	Сила, кН	Навантаження на штамп, кг	Коефіцієнт	Середнє значення
1,262	0,38	38,67	19,33	19,31	1,530	0,77	78,22	19,55	19,58
1,262	0,38	38,67	19,33		1,531	0,77	78,36	19,59	
1,261	0,38	38,52	19,26		1,531	0,77	78,36	19,59	
1,261	0,38	38,52	19,26		1,531	0,77	78,36	19,59	
1,262	0,38	38,67	19,33		1,532	0,77	78,51	19,63	
1,262	0,38	38,67	19,33		1,530	0,77	78,51	19,55	
Вантаж 5 кг					Вантаж 6 кг				
1,668	0,97	98,58	19,72	19,70	1,801	1,15	116,86	19,48	19,52
1,669	0,97	98,73	19,75		1,802	1,15	117,00	19,50	
1,663	0,96	97,84	19,57		1,801	1,15	116,86	19,48	
1,669	0,97	98,73	19,75		1,802	1,15	117,00	19,50	
1,665	0,97	98,58	19,72		1,803	1,15	117,15	19,52	
1,668	0,97	98,58	19,72		1,808	1,16	117,88	19,65	
					1,802	1,15	117,00	19,50	
Вантаж 7 кг					Вантаж 8 кг				
1,942	1,35	137,43	19,63	19,64	2,072	1,53	156,39	19,55	19,64
1,940	1,34	137,14	19,59		2,079	1,54	157,41	19,68	
1,941	1,35	137,28	19,61		2,078	1,54	157,27	19,66	
1,941	1,35	137,28	19,61		2,073	1,54	157,54	19,57	
1,942	1,35	137,63	19,63		2,079	1,54	157,41	19,68	
1,947	1,35	138,16	19,74		2,078	1,54	157,27	19,66	
					2,078	1,54	157,27	19,66	
Вантаж 9 кг									
2,209	1,73	176,38	19,60	19,62					
2,210	1,73	176,53	19,61						
2,211	1,73	176,67	19,63						
2,211	1,73	176,67	19,63						
2,211	1,73	176,67	19,63						
2,210	1,73	176,53	19,61						
					Середнє значення коефіцієнта важеля становить				19,57

ДОДАТОК Б

Статистична перевірка достовірності визначення загального модулю пружності
грунтової моделі

В процесі експериментальних досліджень з визначення залежностей між модулем пружності ґрунту і вологістю були отриманні експериментальні значення модулю пружності. Для підтвердження достовірності експериментально визначених значень модулю пружності ґрунтової моделі була проведена статистична обробка даних відповідно до [258]. Вона полягала у визначенні довірчого інтервалу і дійсних значень досліджуваної величини.

Дійсне значення досліджуваної величини визначається із відношення:

$$R_{\partial} = \bar{R} \pm \mu_{cm}, \quad (\text{Б.1})$$

де $\bar{R}$ – середнє значення виміряної величини:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (\text{Б.2})$$

де R_i – значення виміряної величини i - того вимірювання серії;

n – кількість вимірювань в серії;

μ_{cm} – довірчий інтервал:

$$\mu_{cm} = \frac{\varepsilon \cdot \bar{R}}{100}, \quad (\text{Б.3})$$

де ε – відносна похибка вимірювань $\varepsilon = 5\%$.

Коефіцієнт варіації характеризує мінливість вимірювань відносно середніх значень і визначається із відношення:

$$C_V = \frac{\sigma}{R}, \quad (\text{Б.4})$$

Статистична обробка результатів вимірювань проводилася для трьох типів ґрунтів, і результати якої наведені у таблиці Б.1, таблиці Б.2, таблиці Б.3.

Таблиця Б.1 – Статистична обробка результатів вимірювань модулю пружності ґрунтової моделі з супіску

Показники	Модуль пружності ґрунту, МПа, при відносній вологості					
	0,51 W _T	0,56 W _T	0,61 W _T	0,66 W _T	0,71 W _T	0,76 W _T
Серія 1	77,3	67,9	61,7	50,9	45,9	39,3
Серія 2	79,3	70,8	62,4	51	48,3	41,7
Серія 3	75,4	71,4	63	55	48,8	42,1
Серія 4	80,9	71,4	62,3	54,4	51,1	42,6
Середнє значення $\bar{R}$	78,2	70,4	62,4	52,8	48,5	41,4
Довірчий інтервал $\mu_{ст}$	3,91	3,52	3,12	2,64	2,43	2,07
Нижня межа значення $R_{д-}$	74,3	66,9	59,2	50,2	46,1	39,4
Верхня межа значення $R_{д+}$	82,1	73,9	65,5	55,5	51,0	43,5
Коефіцієнт варіації C_v	0,031	0,024	0,009	0,041	0,044	0,035

Таблиця Б.2 – Статистична обробка результатів вимірювань модулю пружності ґрунтової моделі з суглинку

Показники	Модуль пружності ґрунту, МПа, при відносній вологості					
	0,52 W _T	0,56 W _T	0,61 W _T	0,66 W _T	0,71 W _T	0,75 W _T
Серія 1	63,6	60,9	49,4	41,5	28,2	20,9
Серія 2	63,9	57,6	50,2	38,9	30,5	19,8
Серія 3	67,1	55,5	49,8	39,2	28	19,7
Серія 4	66,3	57,4	50,1	39,6	28,6	19,6
Середнє значення $\bar{R}$	65,2	57,9	49,9	39,8	28,8	20,0
Довірчий інтервал $\mu_{ст}$	3,26	2,89	2,49	1,99	1,44	1,00
Нижня межа значення $R_{д-}$	61,96	54,96	47,38	37,81	27,38	19,00
Верхня межа значення $R_{д+}$	68,49	60,74	52,37	41,79	30,27	21,00
Коефіцієнт варіації C_v	0,027	0,039	0,007	0,029	0,040	0,030

Таблиця Б.3 – Статистична обробка результатів вимірювань модулю пружності ґрунтової моделі з глини

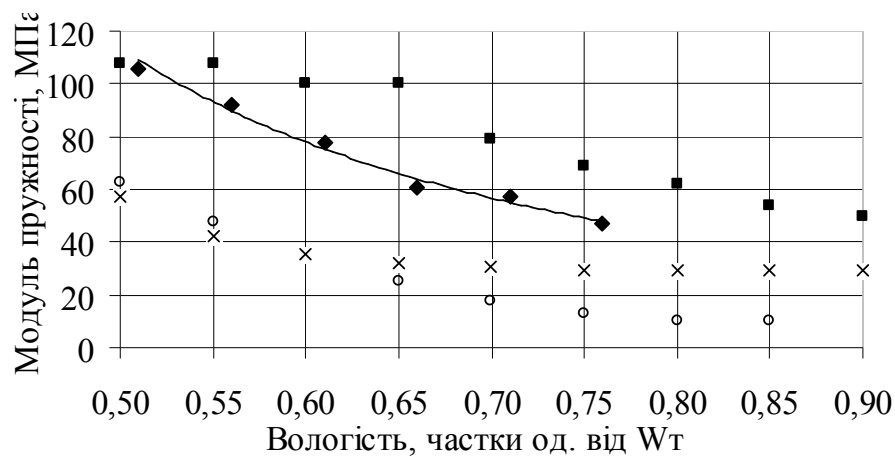
Показники	Модуль пружності ґрунту, МПа, при відносній вологості					
	0,52 W_T	0,56 W_T	0,61 W_T	0,66 W_T	0,71 W_T	0,75 W_T
Серія 1	47,1	39,9	29,2	23	18,2	10,5
Серія 2	51,2	41,1	30,9	23,4	18,5	10,8
Серія 3	48,9	42	31,9	23,4	18,5	11,1
Серія 4	49,2	42,2	32,6	23,4	18,7	11,2
Середнє значення $\bar{R}$	49,1	41,3	31,2	23,3	18,5	10,9
Довірчий інтервал $\mu_{ст}$	2,46	2,07	1,56	1,17	0,92	0,55
Нижня межа значення $R_{д-}$	46,65	39,24	29,59	22,14	17,55	10,36
Верхня межа значення $R_{д+}$	51,56	43,37	32,71	24,47	19,40	11,45
Коефіцієнт варіації C_v	0,034	0,025	0,047	0,009	0,011	0,029

ДОДАТОК В

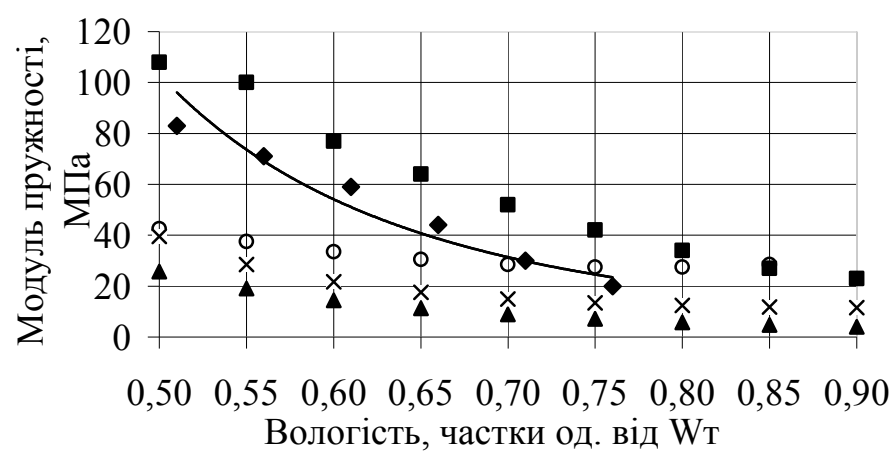
Зв'язок міцнісних та деформаційних параметрів ґрунтів з відносною вологістю

Результати, що отримані під час проведення лабораторних експериментів з визначення деформаційних та міцнісних параметрів ґрунтів представлені графічно (рис. В.1 – В.3).

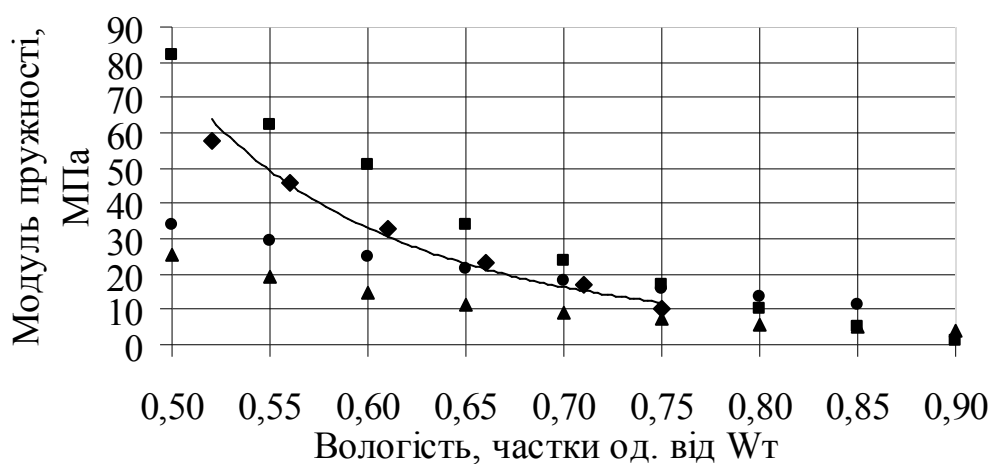
а)



б)



в)

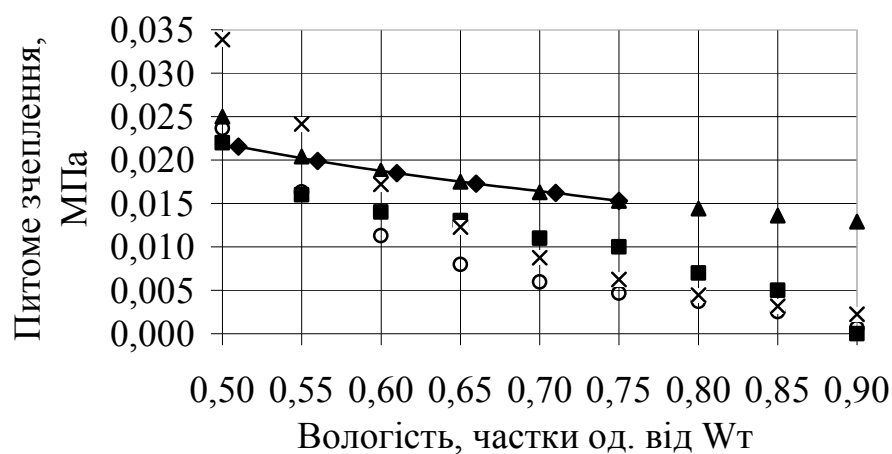


▲ - Алексіков; ■ - ВБН В.2.3-218-186; ○ - Сіденко; × - Єфіменко;
 ● - Гнезділова; ◆ - експерименталін дані автора

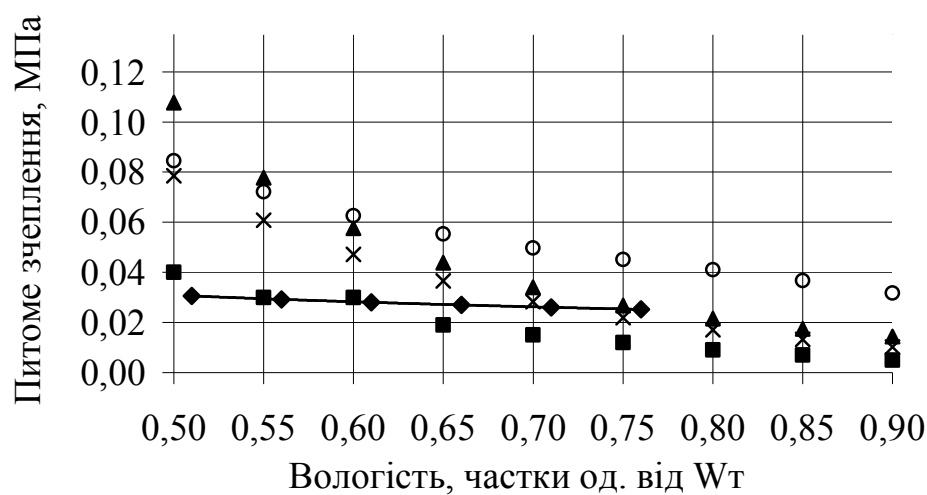
Рисунок В.1 – Графіки зв'язку модулю пружності із вологістю ґрунту:

а) – супісок; б) – суглинок; в) – глина

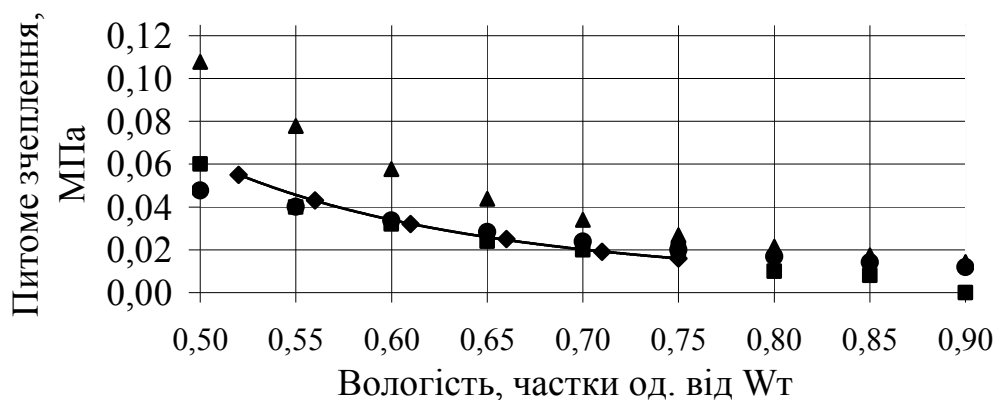
а)



б)



в)

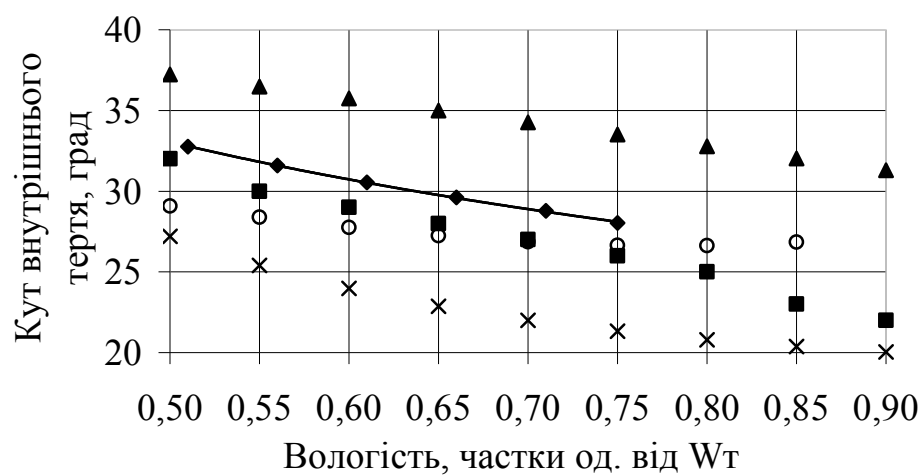


▲ - Алексіков; ■ - ВБН В.2.3-218-186; ○ - Сіденко; × - Єфіменко;
 ● - Гнезділова; ◆ - експерименталін дані автора

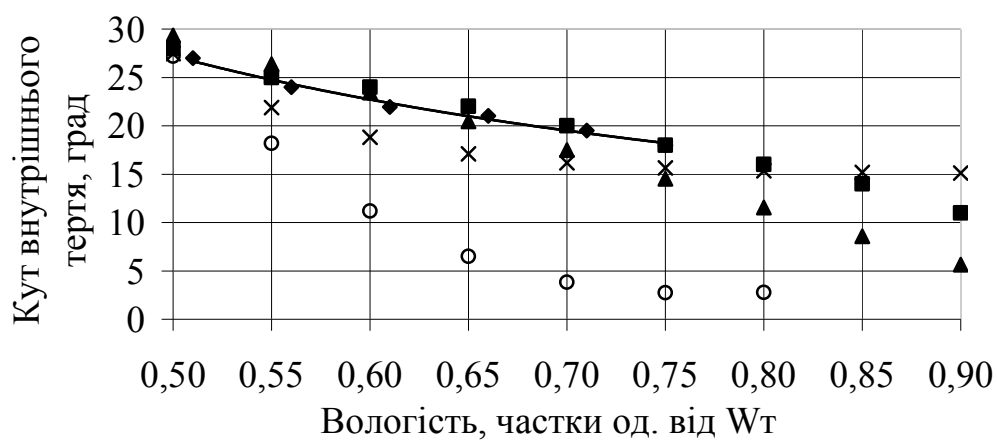
Рисунок В.2 – Графіки зв'язку питомого зчеплення від вологості ґрунту:

а) – супісок; б) – суглинок; в) – глина

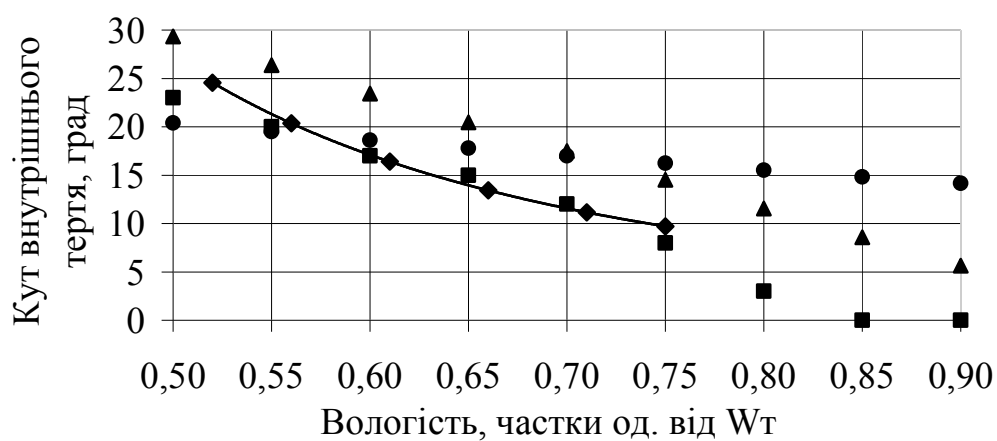
а)



б)



в)



▲ - Алексіков; ■ - ВБН В.2.3-218-186; ○ - Сіденко; × - Єфіменко;
 ● - Гнезділова; ◆ - експерименталін дані автора

Рисунок В.3—Графіки зв'язку кута внутрішнього тертя від вологості ґрунту

а) – супісок; б) – суглинок; в) – глина

ДОДАТОК Г

Приклади розрахунку економічної ефективності від уточнення розрахункових
параметрів ґрунтів земляного полотна

Г.1 Економічний ефект через зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів

Економічний ефект через зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів розрахований на прикладі ділянки автомобільної дороги М-07 Київ – Ковель – Ягодин, що розташована у Волинській області згідно з [274].

Вихідні дані для розрахунку:

- а) номер дорожнього району – 1;
- б) категорія автомобільної дороги – II;
- в) розрахункове навантаження – A2;
- г) тип конструкції – капітальний;
- д) матеріал покриття – щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-15;
- е) термін служби до капітального ремонту – 11 років;
- ж) вартість капітального ремонту за усередненими показниками в цінах 2018 року становить 2419250 грн. на 1 км проїзної частини шириною 7,5 м з двома смугами руху.

з) вартість поточного середнього ремонту становить 278575 грн.

Кількість ремонтів за термін служби дороги:

- а) поточний середній ремонт – 2 ремонти інтервалом 5 років;
- б) капітальний ремонт – 1 ремонт

Вартість поточного ремонту і утримання, а також ремонту штучних споруд і земляного полотна не враховується.

Поділ календарного року на періоди і вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці Г.1. Збитки від проїзду транспортних засобів у залежності від їх руйнуючого впливу в різні періоди року на 1 км автомобільної дороги певної категорії визначають за формулою [274, 275]:

$$C^{(i)} = \beta^{(i)} C_p (S_{j\Sigma} - 1), \quad (\text{Г.1})$$

де $C^{(i)}$ – збитки від проїзду транспортного засобу у i -й період року на 1 км автомобільної дороги, грн/км;

$\beta^{(i)}$ – коефіцієнт вагомості проїзду в i -й період року;

C_p – вартість ремонтних заходів однієї смуги руху, що припадають на один проїзд розрахункової осі на 1 км автомобільної дороги, грн./км;

$S_{j\Sigma}$ – сумарний коефіцієнт приведення транспортного засобу j -ї марки до розрахункового навантаження.

Таблиця Г.1 – Розрахункові параметри ґрунту земляного полотна і коефіцієнт вагомості проїзду в різні періоди року

Номер періоду	Період року	Тривалість		Коефіцієнт сезонних коливань інтенсивності $\gamma^{(i)}$	Вологість земляного полотна, в частках от W_m	E_{cp} МПа	φ_{cp} град	C_{cp} МПа
		доби	відносна $t(i)$					
0	Весняний розрахунковий (базовий)	27	0,074	0,85	0,80	34	16	0,009
1	Весняний розрахунковий	3	0,008	0,85	0,79	36	16,5	0,0096
2	Весняний не розрахунковий	37	0,101	0,90	0,75	42	18	0,011
3	Літній	104	0,285	1,00	0,65	64	21	0,018
4	Осінньо-зимовий	110	0,302	1,20	0,70	52	19	0,014
5	Зимового промерзання	84	0,230	0,90	-	-	-	-

Вартість ремонтних заходів однієї смуги руху, що припадають на один проїзд розрахункової осі автомобіля (групи А1, А2 А3) визначається:

$$C_p = \frac{C_k + m \cdot C_n}{365 \cdot T_{kr} \cdot N_p}, \quad (\text{Г.2})$$

де C_k і C_n – відповідно вартість капітального і поточного ремонтів однієї смуги руху автомобільної дороги певної категорії, грн/км;

m – кількість поточних ремонтів в межах фактичного терміну служби дорожнього одягу;

T_{kr} – термін служби між капітальними ремонтами, роки;

N_p – розрахункова добова середньорічна кількість прикладань розрахункового осьового навантаження за критерієм зсувостійкості ґрунтів земляного полотна, авт/добу.

Коефіцієнт вагомості одного проїзду розрахункового навантаження в i -й період року за критерієм зсувостійкості ґрунтів земляного полотна в порівнянні зі середньорічними умовами визначається [274, 275]:

$$\beta_{\tau}^{(i)} = \frac{F_{\tau}^{(i)}}{\sum_{i=0}^l \left(\gamma^{(i)} t^{(i)} F_{\tau}^{(i)} \right)}. \quad (\Gamma.3)$$

де $\beta_{\tau}^{(i)}$ – коефіцієнт вагомості проїзду в i -й період року за критерієм зсувостійкості ґрунтів земляного полотна;

l – кількість періодів, на які поділений рік;

$t^{(i)}$ – відносна тривалість окремих періодів року, частки одиниці;

$\gamma^{(i)}$ – коефіцієнт сезонних коливань інтенсивності руху (див. табл. Г.1), частки одиниць;

$F_{\tau}^{(i)}$ – коефіцієнт приведення проїзду в i -й період року до проїзду в розрахунковий (найбільш несприятливий) період за критерієм зсувостійкості ґрунтів земляного полотна [274]:

$$F_{\tau}^{(i)} = \left(\frac{C_{zp}^{(0)}}{C_{zp}^{(i)}} \cdot \frac{\tau_{zp}^{(i)}}{\tau_{zp}^{(0)}} \right)^{6.6}, \quad (\Gamma.4)$$

де $C_{\text{зр}}^{(0)}$ і $C_{\text{зр}}^{(i)}$ – коефіцієнт зчеплення ґрунту відповідно у розрахунковий і нерозрахунковий періоди року, МПа;

$\tau^{(0)}$ і $\tau^{(i)}$ – напруження зсуву в ґрунті відповідно у розрахунковий і нерозрахунковий періоди року, МПа.

Результати розрахунку наведено у таблиці Г.2

Таблиця Г.2 – Розрахунок збитків від проїзду транспортних засобів

Показник	Весняний розрахунковий (базовий) період	Весняний розрахунковий
Коефіцієнт приведення проїзду в i -й період року до проїзду в розрахунковий (найбільш несприятливий, розрахунковий) період за критерієм зсувостійкості ґрунтів земляного полотна ($F_{\tau}^{(i)}$)	1,0	0,69
Коефіцієнт вагомості одного проїзду розрахункового навантаження ($\beta_{\tau}^{(i)}$)	4,2	3,6
Розрахункова добова середньорічна кількість прикладань нормативного осьового навантаження (N_p), авт/добу	202	202
Збитки від одного середньорічного проїзду розрахункового осьового навантаження автомобіля групи А2 (C_p), грн./км	3,67	3,67
Коефіцієнт приведення до розрахункового навантаження МАЗ 642208 з напівприцепом МАЗ 93866 ($S_{j\Sigma}$)	2,70	2,70
коефіцієнт приведення до розрахункового навантаження RENAULT Premium HR 385.18 з напівприцепом Kassbohrer DL ($S_{j\Sigma}$)	3,10	3,10
Вартість проїзду транспортного засобу МАЗ 642208 з напівприцепом МАЗ 93866, грн./км	26,20	22,46
Вартість проїзду транспортного засобу RENAULT Premium HR 385.18 з напівприцепом Kassbohrer DL, грн./км	32,37	27,75

Враховуючі, що в складі транспортного потоку автомобілів МАЗ 642208 з

напівпричепом MAZ 93866 – 98 авт/добу, а RENAULT Premium HR 385.18 з напівпричепом Kassbohrer DL – 56 авт/добу, загальна сума збитків від проїзду транспортного потоку:

а) у весняний розрахунковий (базовий) період:

$$C^{(0)} = 26,20 \cdot 98 + 32,37 \cdot 56 = 4380,32 \text{ грн/км} \cdot \text{добу};$$

б) у весняний розрахунковий період:

$$C^{(1)} = 22,46 \cdot 98 + 27,25 \cdot 56 = 3727,08 \text{ грн/км} \cdot \text{добу}.$$

Зменшення збитків від проїзду великовагових транспортних засобів за одну добу становить:

$$E = \Delta C = C^{(0)} - C^{(1)} = 4380,32 - 3727,08 = 653,24 \text{ грн/км} \cdot \text{добу}.$$

Г.2 Розрахунок економічного ефекту від зменшення відстані проїзду та часу перебування вантажів і пасажирів в дорозі

Розрахунок економічного ефекту від зменшення відстані проїзду та часу перебування вантажів і пасажирів під час об'їзду ділянки автомобільної дороги, де обмежено рух, проведений згідно (4.6 – 4.9).

Вихідні дані для розрахунку:

а) інтенсивність транспортних засобів у складі транспортного потоку:

- 1) вантажний автомобіль MAZ 642208 з напівпричепом MAZ 93866 – 98 авт/добу;
- 2) вантажний автомобіль RENAULT Premium HR 385.18 з напівпричепом Kassbohrer DL – 56 авт/добу;
- 3) автобус Ікарус 256 – 17 авт/добу;

б) собівартість перевезень:

- 1) вантажний автомобіль MAZ 642208 з напівпричепом MAZ 93866 – 1944 коп./авт.км;

- 2) вантажний автомобіль RENAULT Premium HR 385.18 з напівпричепом Kassbohrer DL - 1626 коп./авт.км;

- в) кількість пасажирів в автобусі Ікарус 256 – 45 пас.

Зниження витрат на перевезення вантажів:

$$\Delta C_a = 98 \cdot 1944 \cdot 10^{-5} + 56 \cdot 1626 \cdot 10^{-5} = 1,905 + 0,911 = 2,816 \text{ тис грн./км·добу.}$$

Зниження витрат від перебування грузів та пасажирів у шляху:

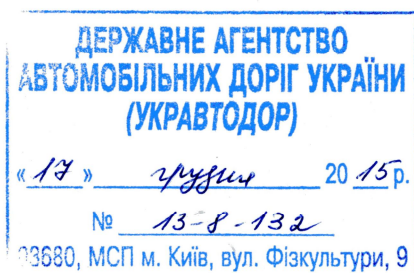
$$\Delta B = 16,11 \cdot \frac{17 \cdot 45}{60} = 0,205 \text{ тис грн./км·добу.}$$

Економічний ефект від зменшення відстані проїзду та часу перебування вантажів і пасажирів у шляху під час об'їзду ділянки автомобільної дороги, де обмежено рух:

$$E = 2,816 + 0,205 = 3,021 \text{ тис грн./км·добу.}$$

ДОДАТОК Д

Довідки про впровадження результатів дисертаційного дослідження



ДОВІДКА

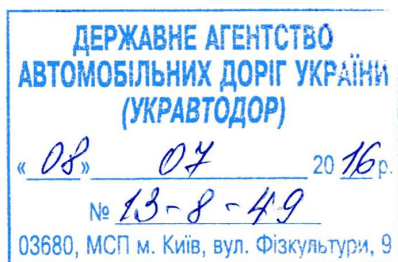
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг і аеродромів
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Процюка Віталія Олексійовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань і проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Процюка В.О. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідної роботи згідно договору № 64/37-52-12 «Розробити методику комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування та концепцію дорожньої бази даних про стан дорожнього одягу за результатами обстежень методами підповерхневого зондування» (№ державної реєстрації 0112U004745), яка передбачала, в тому числі, розроблення методики М 02071168-725:2013 «Методика комплексного моніторингу автомобільних доріг методами підповерхневого зондування». Методику призначено для впровадження системи моніторингу дорожнього одягу на автомобільних дорогах загального користування на підставі діагностики, оцінки стану та прогнозування стану дорожнього одягу за результатами георадарного обстеження.

Результати наукових досліджень асп. Процюка В.О. застосовані при розробленні основних положень діагностики дорожніх одягів з метою визначення вологості підстильного ґрунту за результатами георадарного зондування (розділ 5 Методики); склали основу порядку оцінки деформаційних та міцнісних характеристик підстильного ґрунту та конструкції дорожнього одягу за результатами підповерхневого зондування при вирішенні задач моніторингу (розділ 6 Методики).

Начальник відділу інноваційного розвитку
та кошторисного ціноутворення
Державного агентства автомобільних
доріг України (Укравтодор)

Анатолій Цинка



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг і аеродромів
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Процюка Віталія Олексійовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань і проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Процюка В.О. були впроваджені в Державному агентстві автомобільних доріг України при виконанні науково-дослідної роботи за темою «Провести дослідження і розробити методику оцінки збитків від проїзду великовагових транспортних засобів по автомобільних дорогах загального користування» (договір від 19.06.2015 № 47/37-02-15, № державної реєстрації 0115U001613), яка передбачала, в тому числі, розроблення методики М 02071168-752:2016 «Методика оцінки збитків від проїзду великовагових транспортних засобів по автомобільних дорогах загального користування». Методика призначена для використання при розробленні економічно обґрунтованих тарифів щодо проїзду великовагових транспортних засобів автомобільними дорогами загального користування; обґрунтуванні раціональної стратегії збереження автомобільних доріг, оцінці збитків дорожнього господарства під час перевезення великовагових вантажів.

Результати наукових досліджень аспіранта Процюка В.О. були використані при розробленні основних положень оцінки руйнівної дії великовагових транспортних засобів на дорожній одяг за критерієм опору зсуву в ґрунті земляного полотна в різні періоди року (розділ 5 Методики); визначенні максимально допустимого навантаження на вісь транспортного засобу та максимально допустиму кількість прикладань навантаження за критерієм зсувостійкості ґрунтів земляного полотна; склали основу порядку визначення максимально допустимої добової інтенсивності вантажних автомобілів з навантаженням на вісь більшим за розрахункове (Додаток В Методики).

Директор Департаменту розвитку
мережі доріг Укравтодору

Сергій Цепелев

Начальник Управління експлуатації
доріг Укравтодору

Олег Федоренко



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження аспіранта
кафедри вишукувань та проектування доріг та аеродромів Харківського
національного автомобільно-дорожнього університету

Процюка Віталія Олексійовича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри вишукувань та проектування доріг та аеродромів ХНАДУ Процюка В.О. було впроваджено в Службі автомобільних доріг у Волинській області під час виконання проекту поточного ремонту автомобільної дороги Львів – Радехів – Луцьк на ділянці 97+000 – км 100+000.

Результати наукових досліджень аспіранта Процюка В.О. застосовані під час проектних вишукувань на автомобільній дорозі Львів – Радехів – Луцьк на ділянці 97+000 – км 100+000, а саме виконана оцінка деформаційних та міцнісних характеристик ґрунтів земляного полотна та конструкції дорожнього одягу за результатами підповерхневого зондування.

Заступник начальника Служби
автомобільних доріг у
Волинській області з будівництва
автомобільних доріг



Антонян Н.А.

ДОДАТОК Е

Список опублікованих праць за темою дисертації

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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 Харьковського національного автомобільно-дорожного університета : сб. науч. тр. Х., 2016. Вып. 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. Х., 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..