

УДК 535.3

ОГЛЯД ОСНОВНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ҐРУНТІВ

REVIEW OF BASIC MATHEMATICAL MODELS FOR DEFINITION OF SOILS PERMITTIVITY

Процюк В.О., асистент (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

Protsiuk V.O., assistant (Lutsk national technical university, Lutsk)

В статті розглянуті та порівняні існуючі математичні моделі визначення діелектричної проникності ґрунтів. Показано вплив частоти сигналу на величину діелектричної проникності мінералів і води. Порівняні електрофізичні властивості зв'язної і вільної води.

The article considered and compared to existing mathematical models for determining the permittivity of soils. The influence of the signal frequency on the magnitude of minerals dielectric permittivity and water is shown. A comparative analysis of most dependencies between dielectric material permeability and content of its components has been carried out. According to the results of the researches, it was concluded that the results of calculations according to the Birchak model and the Shmuhge model are satisfactory with the data of experimental researches of soil dielectric properties.

Ключові слова: ґрунт, діелектрична проникність, частота, математична модель.

Keywords: soil, permittivity, frequency, mathematical model.

Встановлення розрахункових характеристик ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг є важливим питанням під час діагностики доріг та проектування ремонтів по посиленню конструкції дорожнього одягу та забезпеченню всіх необхідних транспортно-експлуатаційних характеристик дороги.

Серед добре відомих і надійних методів по встановленню розрахункових характеристик ґрунтів, існують і нові прогресивні

методи, які володіють рядом переваг – безконтактність, а отже забезпечення цілісності дорожньої конструкції, швидкість та оперативність діагностики та економічність проведення діагностики. Цього дозволяється досягти завдяки використанню підповерхневої георадіолокації.

Проте, як і всі методи, георадіолокація має також свої недоліки, які пов'язані із: складністю інтерпретації даних отриманих в процесі зондування конструкції дорожнього одягу та ґрунтів земляного полотна; недостатньою кількістю математичних залежностей електрофізичних характеристик з фізичними та міцнісними характеристиками ґрунтів; відсутністю достатньої бази даних електрофізичних характеристик ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень. Значні дослідження електрофізичних характеристики матеріалів ґрунтів були зроблені: Боярський Д.А., Віняйкіним Є.Н., Золотарем В.М., Криворучко Я.С., Судаковою М.С. та іншими.

Дослідження зв'язної та вільної води, яка наявна в ґрунтах земляного полотна, наведені в роботах: Боярського Д.А., Корольова В.А., Шутко А.М., Черняка Г.Я. та інших.

Постановка мети і завдань досліджень. 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.

Результати досліджень. Згідно з аналізом, проведеним в роботі Д.А. Боярським [1], дійсна частина діелектричної проникності таких мінералів як кварц, польові шпати, монтморилоніт, каолініт і т. д. в діапазоні частот 1 – 50 ГГц має величину $\sim 3,6$ [2-4], а уявна частина в цьому ж діапазоні $\sim 0,05 - 0,25$ [4, 5]. При більш високих частотах (~ 500 ГГц) дійсна частина діелектричної проникності цих мінералів становить $\sim 2,5 - 5$, а уявна частина зменшується до значень $\sim 0,001$ [6].

Через складність проведення експериментальних досліджень

діелектричних властивостей зв'язаної води, ці властивості вивчені недосконало [7, 8], і мають суперечливий характер для позитивних температур. Більшість дослідників дійшли до висновку, що ці властивості визначаються властивостями поверхні, з якою взаємодіє вода, і ступенем зв'язку води з цією поверхнею [6, 9]. Проф. Корольов В.А. відзначає, що діелектрична проникність води зв'язаної в кілька разів менша у порівнянні з вільною водою [10]. 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. Згідно даними останніх досліджень, плівка зв'язаної води товщиною 0,5 – 0,6 нм має 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 °С до ~ 80 при 20 °С і на частоті 40 ГГц від ~ 9 при 0 °С до ~ 16 при 20 °С [1]. Уявна частина змінюється при 0 °С від ~ 9 (1 ГГц) до ~ 17 (40 ГГц). Найбільш сильно ці ефекти проявляються для вологих ґрунтів, тому досить важливо враховувати частоту сигналів

На поширення сигналу в середовищі сильно впливає наявність дисперсії (залежно від частоти), тому цей факт необхідно враховувати під час розробки алгоритму визначення вологості ґрунтів земляного полотна. Проте, дорожній одяг над ґрунтом земляного полотна містить матеріали, які є композицією різних складових, що унеможливує вирішити дане завдання аналітично, не маючи інформації про властивості кожної з компонент. Тому пропонується ввести в модель коефіцієнт поправки, що враховує дисперсійні властивості матеріалів. В такому випадку діелектрична проникність буде визначатися як [11]:

$$\varepsilon = k_d \cdot \varepsilon_{\omega}, \quad (1)$$

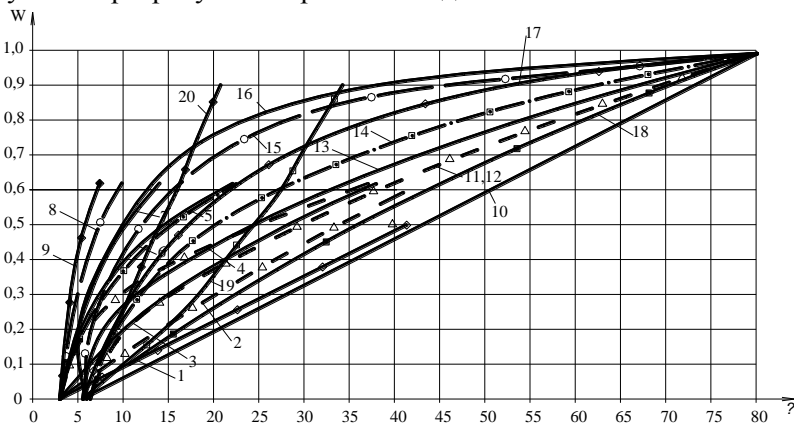
де ε – значення діелектричної проникності, прийняте в розрахунках;

ε_{ω} – значення діелектричної проникності, яке визначене експериментально на частоті ω .

Залежності діелектричної проникності багатоконпонентних сумішей від діелектричної проникності компонент, а також від

вмісту і розподілу компонент в суміші досить докладно вивчені теоретично і представлені графічно (рис. 1).

Авторами робіт [12, 13], а також автором статті були виконані розрахунки за вказаними моделями. В дослідженнях [13] приймалося, що дійсна частина діелектричної проникності в діапазоні надвисоких частот сухого ґрунту $\epsilon_1=3$, а води – $\epsilon=80$, уявну частину діелектричної проникності не враховували. Результати розрахунків наведено на рисунку 1. Експериментальні дані [14] позначені прямокутниками для піщаного ґрунту та трикутниками для суглинистого ґрунту (рис. 1). Цифрами позначені результати розрахунків за різними моделями.



1 – формула Вінера (нижня межа), 2 – формула Оделевського, 3 – формула Бірчака, 4 – формула К. Боттчера, 5 – формула К. Ліхтенкера, 6 – формула Бругемана,

7 – формула Максвелл-Гарнетта, 8 – формула Л.В. Лоренца-Лорентца, 9 – формула Вінера (верхня межа) [226], 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; 14 – формула К. Ліхтенкера, 15 – формула Л.В. Лоренца-Лорентца, [169], 16 – формула Л.В. Лоренца-Лорентца, 17 – формула Оделевського, 18 – формула Нельсона, 19 – формула Ландау

Рис. 1 – Зв'язок дійсної частини діелектричної проникності суміші з об'ємною часткою води

Як відзначають автори робіт [12, 13] жодна з формул не дає точного збігу з експериментальними даними. Найбільш узгоджується з експериментом для даних типів дисперсних середовищ 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 приходять А.М. Шутко [8].

Провівши порівняльний аналіз більшості залежностей між діелектричною проникністю матеріалу та вмістом його компонент, автор [8] приходять до висновку, що всі формули (крім формул Ліхтенекра, 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. Як зазначається в роботі [15] 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.

Висновок. За результатами узагальнення наукових досліджень [12, 13] та дослідженнями автора статті було зроблено висновок, що з даними експериментальних досліджень діелектричних властивостей ґрунту задовільно збігаються результати розрахунків за моделлю Бірчака [16] і моделлю Шмугге [17]. Зазначені моделі є основою для удосконалення математичної моделі щодо встановлення діелектричної проникності ґрунтів з урахуванням різних розрахункових станів ґрунту.

1. Боярский Д.А. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв / Д.А. Боярский, В.В. Тихонов. – М.: ИКИ РАН, 2003. – 48 с. – (Препринт / ИКИ РАН; 2003).
2. Словарь по геологии нефти и газа. – Л.: Недра, 1988. – 680 с.
3. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. – М.: Мир, 1969. – 544 с.

4. Campbell M.J. Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations / M.J. Campbell, J. Ulrichs // *J. Geophys. Research.* – 1969. – Vol. 74. N. 25. – PP. 5867–5881.

5. Виняйкин Е.Н. Ослабление миллиметровых и сантиметровых радиоволн и изменение их фазы в среде, состоящей из сухих и обводненных пылевых частиц / Виняйкин Е.Н., Зиничева М.Б., Наумов А.П. – Нижний Новгород: НИР ФИ, 1993. – 40 с. – (Препринт / Научно-исследовательского радиофизического института (НИР ФИ); 1993).

6. Золотарев В.М. Оптические постоянные природных и технических сред / Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. – Л.: Химия, 1984. – 243 с.

7. Черняк Г.Я. Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии / Г.Я. Черняк, О.М. Мясковский. – М.: Недра, 1973. – 176 с.

8. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов / А.М. Шутко. – М.: Наука, 1986. – 192 с.

9. Белая М.Л. Молекулярная структура воды / М.Л. Белая, В.Г. Левадный // *Новое в жизни, науке, технике. Сер. Физика.* – 1987. – № 11. – С. 3–61.

10. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы / В.А. Королев // *Соросовский образовательный журнал.* – 1996. – № 9. – С. 79–85.

11. Георадары, дороги – 2002: Материалы международной научно-практической конференции. – Архангельск: Архангельский гос. техн. ун-т, 2002. – 94 с.

12. Судакова М.С. Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях: дис. ... канд. физико-математических наук: 25.00.10 / Судакова Мария Сергеевна. – М., 2009. – 125 с.

13. Криворучко Я.С. Визначення ефективної діелектричної проникності гетерогенних середовищ та оцінка вмісту вологи в ґрунтах / Я.С. Криворучко // *Поверхность.* – 2011. – Вып. 3(18). – С. 22–28.

14. Wang J.R. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content / J.R. Wang, T.J. Schmugge // *IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing.* – 1980. – Vol. 18, N 4. – PP. 288–295.

15. Хаммуд Ф.М. СВЧ диэлектрическая проницаемость дисперсных влагосодержащих сред / Ф.М. Хаммуд, В.П. Герасимов, Ю.Е. Гордиенко // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. –Т. 10. – № 3. – С. 334–340.

16. Birchak J.R. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture / J.R. Birchak, G.G. Gardner, J.E. Hipp, J.M. Victor // *Proc. IEEE.* – 1974. – Vol. 62. – PP.93–98.

17. Wang J.R. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content / J.R. Wang T.J. Schmugge // *National Aeronautics and Space Administration Goddard Spans.* – 1978. – 39 p.