

ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ВИРОБИ

УДК 625.7/.8:658.562

Батракова А.Г., д-р техн. наук, Процюк В.О.

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОЛЬОВОГО ГЕОРАДАРУ

Анотація. У статті запропоновано рішення задачі визначення вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням польового георадара, обґрунтовано модель, що визначає зв'язок вологості з діелектричною проникністю ґрунту.

Ключові слова: діелектрична проникність, вологість ґрунту земляного полотна.

УДК 625.7/.8:658.562

Батракова А.Г., д-р техн. наук, Процюк В.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛЕВОГО ГЕОРАДАРУ

Аннотация. В статье предложено решение задачи определения влажности грунта земляного полотна с применением полевого георадара, обоснована модель, определяющая связь влажности с диэлектрической проницаемостью грунта.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажность грунта земляного полотна.

UDC 625.7/.8:658.562

Batrakova A. H., Dr. Tech. Sci., Protsiuk V. A.

DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT OF THE SOIL SUBGRADE WITH THE USE OF FIELD GPR

Abstract. The paper proposes solution of the problem of the soil moisture content evaluation of a roadbed with the use of a field GPR. A model that determines the

relationship between moisture and the dielectric permittivity of the soil is proved.

Keywords: the dielectric permittivity, soil moisture.

Вступ

Для конструювання та розрахунку дорожнього одягу, здійснення заходів з ремонту та експлуатаційного утримання необхідна інформація щодо зміни вологості ґрунту земляного полотна у річному циклі. Технологія інженерно-вишукувальних робіт передбачає одноразове визначення вологості ґрунту. Разом з тим, фактична вологість ґрунту в процесі експлуатації автомобільної дороги досить часто значно відрізняється від значень, що зафіксовані під час інженерно-геологічних вишукувань [1]. Розрахунки [2] доводять, що збільшення вологості лише на 4 % для супіщаних ґрунтів й на 6 % для суглинистих ґрунтів і глин призводить до зменшення модуля пружності ґрунту на 23 МПа – 44 МПа відповідно та, як наслідок, до зменшення загального еквівалентного модуля пружності конструкції дорожнього одягу з капітальним типом покриття до 14 %, а для дорожнього одягу з покриттям перехідного типу – майже вдвічі. Таким чином, обмежена інформація про вологість ґрунту земляного полотна призводить до зниження експлуатаційної надійності дорожнього одягу, збільшення витрат на підтримання його нормативного транспортно-експлуатаційного стану протягом терміну служби [3]. З іншого боку, на даний час існує ефективний інструмент одержання інформації про будову конструкції дорожнього одягу та її параметри – георадар. Він дозволяє здійснювати лінійний моніторинг стану шарів покриття, основи й ґрунтів.

Постановка задачі та методи вирішення

Оцінку вологості ґрунту із застосуванням польового георадару пропонується виконувати у такій спосіб [4]:

а) використовувати рішення задачі товщинометрії конструктивних шарів дорожнього одягу, засноване на розрахунку коефіцієнтів відбиття і коефіцієнтів проходження електромагнітних хвиль через досліджувану конструкцію [4];

б) оцінювати діелектричну проникність (ϵ) на межі «конструкція дорожнього одягу – ґрунт земляного полотна» [4];

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

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

де W – об’ємна (вагова) вологість ґрунту, %;

ρ – щільність ґрунту, кг/м^3 ;

Γ – гранулометричний склад ґрунту;

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

При оцінюванні вологості ґрунту необхідно вирішити зворотну задачу – за відомою функцією відгуку – діелектричною проникністю (ε), відновити значення вологості (W) за апріорно відомими параметрами ґрунту, що не змінюються в процесі експлуатації (вид ґрунту та його гранулометричний склад). Відомо, що діелектричні властивості ґрунтів визначаються діелектричними властивостями компонент, що входять до його складу. Для обґрунтування моделі діелектричних властивостей ґрунтів, розглянемо діелектричні властивості компонент ґрунту як чотирифазної системи, яку складають частинки мінерального скелета ґрунту, вільна вода, зв’язна вода та повітря. Згідно з [5] дійсна частина діелектричної проникності таких породоутворюючих мінералів як кварц, польові шпати, монтморилоніт, каолініт в діапазоні частот від 1 ГГц до 50 ГГц має величину близько 3,6 [6, 7], а уявна частина в цьому ж діапазоні від 0,05 до 0,25 [7, 8]. Через значні експериментальні труднощі діелектричні властивості зв’язаної води досліджено недостатньо [9, 10]. Згідно з [9, 11] ці властивості визначаються властивостями поверхні, з якою взаємодіє вода, і ступенем зв’язку води з цією поверхнею. Якщо для вільної води діелектрична проникність дорівнює 81, то для зв’язаної води – від 3 до 40 в залежності від товщини водяної плівки [12].

Модель Шмугге враховує наявність як вільної, так й зв’язаної води [13]. При цьому перша з них має табличне значення діелектричної проникності (81), а друга – істотно менше значення, яке знаходиться в межах значень діелектричної проникності льоду і води. Відповідно до цієї моделі, комплексна діелектрична проникність ґрунту визначається [5, 14]:

а) при виконанні умови $W \leq W_t$ – вільна вода відсутня:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zp} &= W\varepsilon_{ze} + (P-W)\varepsilon_a + (1-P)\varepsilon_m, \\ \varepsilon_{ze} &= \varepsilon_l + (\varepsilon_e - \varepsilon_l) \times \frac{W}{W_t} \times \gamma; \end{aligned} \quad (2)$$

б) при виконанні умови: $W > W_t$ – за наявності вільної води:

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

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

W_t – об'ємна перехідна вологість, частки од. Під перехідною вологістю ґрунту (W_t) розуміється граничне значення вологості, за якого в ґрунті присутня тільки зв'язана вода, що утримується силами міжмолекулярної взаємодії;

$\varepsilon_{zp}, \varepsilon_{зв}, \varepsilon_g, \varepsilon_m, \varepsilon_a, \varepsilon_l$ – 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.

Перехідна вологість (W_t) і параметр (γ) визначаються [14]:

$$W_t = 0,49 \times V + 0,165; \quad \gamma = -0,57 \times V + 0,481, \quad (4)$$

де V – визначається з співвідношення [14]:

$$V = 0,06774 - 0,00064 \times SAND + 0,00478 \times CLAY, \quad (5)$$

де $SAND, CLAY$ – вагові частки гранулометричних фракцій ґрунту (пісчани та глинисті відповідно). До піщаної фракції автори роботи [227] відносять частки ґрунту діаметром $d_{SAND} > 0,005$ см, до глинистої фракції – $d_{CLAY} < 0,0002$ см.

Перевагою даної моделі є можливість врахування щільності і гранулометричного складу ґрунтів під час оцінки діелектричної проникності ґрунту. Як відзначають автори роботи [15], 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 для багатокомпонентних середовищ може бути представлена для ґрунтів, до складу яких входить мінеральна частина ґрунту, вільна вода, зв'язана вода і повітря, у вигляді [16]:

$$\varepsilon_{zp}^{\alpha} = V_m \times \varepsilon_m^{\alpha} + V_a \times \varepsilon_a^{\alpha} + V_{зв} \times \varepsilon_{зв}^{\alpha} + V_g \times \varepsilon_g^{\alpha}, \quad (6)$$

де $V_m, V_a, V_{зв}, V_g$ – об'ємна частка мінеральної частини ґрунту, повітря,

зв'язаної і вільної води відповідно, частки од.

α – експериментально підібраний параметр [17], приймається $\alpha = 0,5$.

Прийнявши об'ємну частку зв'язаної води рівною ваговій перехідній вологості ($V_{зв} = W_t$), об'ємну частку вільної води ($V_{в} = W - W_t$) та виразивши об'ємні частки мінеральної частини ґрунту і повітря через пористість ґрунту ($P = 1 - \frac{P_{сз}}{P_m}$)

отримаємо:

а) без урахування зв'язаної води:

$$\sqrt{\varepsilon_{зп}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_{в}} - 1) + \frac{P_{сз}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (7)$$

б) з урахуванням зв'язаної води:

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

$$\sqrt{\varepsilon_{зп}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_{зв}} - 1) + \frac{P_{сз}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1; \quad (8)$$

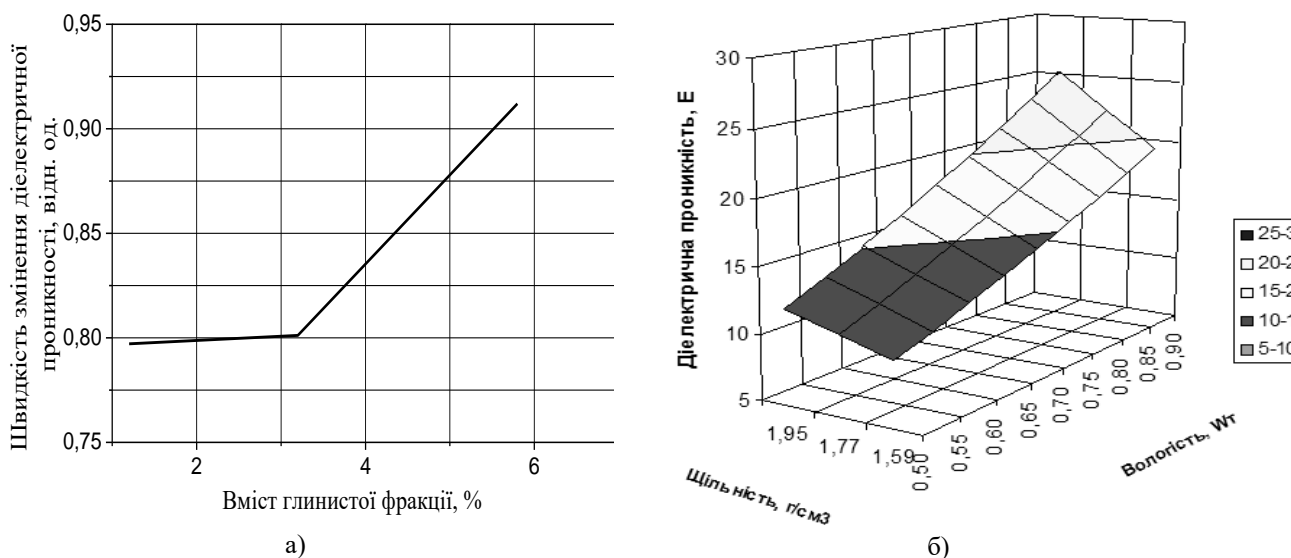
2) для $W > W_t$ – за наявності вільної води:

$$\sqrt{\varepsilon_{зп}} = W \times (\sqrt{\varepsilon_{в}} - 1) - W_t \times (\sqrt{\varepsilon_{в}} - \sqrt{\varepsilon_{зв}}) + \frac{P_{сз}}{P_m} \times (\sqrt{\varepsilon_m} - 1) + 1. \quad (9)$$

Рішення (7-9) узгоджується з результатами досліджень, наведених в роботах [18, 19] та дозволяє встановити значення діелектричної проникності ґрунту в залежності від його гранулометричного складу, та об'ємної вологості.

Аналіз моделі доводить, що зі збільшенням вмісту глинистої фракції збільшується діелектрична проникність ґрунту. При цьому швидкість зростання діелектричної проникності ($\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta W}$) має нелінійний характер та збільшується зі збільшенням вмісту глинистої фракції (рис. 1). Вклад щільності ґрунту у величину діелектричної проникності (у реальному діапазоні значень щільності ґрунту у земляному полотні) становить від 3 % до 10 %, зменшуючись зі зменшенням об'ємної вологості ґрунту, тоді як збільшення вологості призводить до зростання діелектричної проникності понад 200 % (рис. 1).

Результати проведеного аналізу не суперечать загально прийнятим уявленням щодо впливу вологості на діелектричну проникність ґрунту та використовуються в алгоритмі визначення фізико-механічних характеристик ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування.



- а) вплив вмісту глинистої фракції ґрунту на швидкість зростання діелектричної проникності при збільшенні частки об'ємної вологості ґрунту;
 б) зв'язок діелектричної проникності з щільністю та вологістю ґрунту. Ґрунт – супісок

Рисунок 1 – Аналіз узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту

Для перевірки адекватності теоретичної моделі діелектричних властивостей ґрунту були використані результати лабораторних вимірювань вологості ґрунту за допомогою георадару «ОДЯГ-1» з центральною частотою антен 1,2 ГГц. В процесі лабораторних вимірювань визначалася діелектрична проникність ґрунтів з різною вологістю (рис.2).

Результати зіставлялися з розрахунковими значеннями діелектричної проникності (2.26-2.28). Перехідна вологість визначена за (2.13) в залежності від гранулометричного складу ґрунту, діелектрична проникність вільної води – за (2.11), (2.12). Діелектрична проникність основних породоутворюючих мінералів коливається від 3-4 до 10-12 (для кварцу від 4,3 до 5,6, для польових шпатів від 4,5 до 7,2, для слюди від 5,4 до 11,5 [6]). Щільність мінеральних частинок ґрунту коливається в незначних межах, тому для розрахунків прийнято: для супіску 2,65 г/см³, для суглинків – 2,70 г/см³, для глини – 2,75 г/см³ [20].

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, тобто теоретична модель адекватна експериментальним даним та може використовуватися при оцінюванні вологості ґрунтів земляного полотна за результатами георадарного зондування.

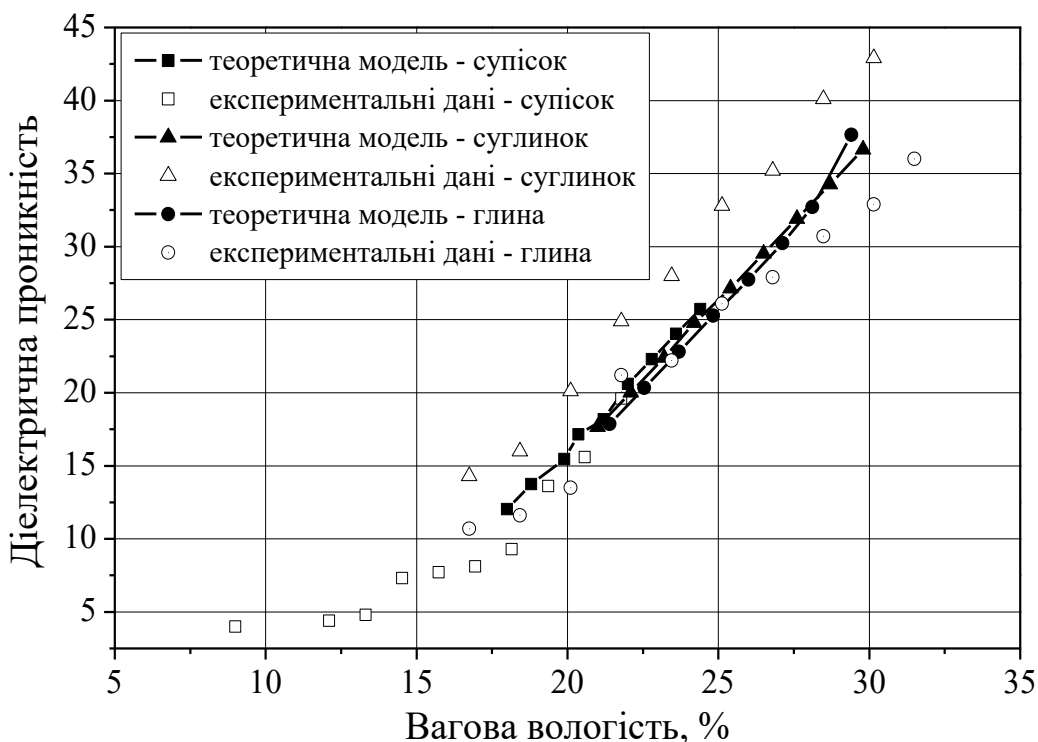


Рисунок 2 – Зв’язок діелектричної проникності з ваговою вологістю ґрунтів

Для оцінки вологості ґрунту земляного полотна за результатами георадарного зондування, припускаючи, що діелектрична проникність ґрунту визначена [4], скористуємося (7-9), виразивши об’ємну вологість:

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

$$W = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - \sqrt{\varepsilon_m})}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} + P \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} - \frac{P_{cz}}{P_m} \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)}; \quad (10)$$

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

$$W = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - \sqrt{\varepsilon_m})}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} + W_t \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - \sqrt{\varepsilon_{3\sigma}})}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} + P \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{zp}} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} + W_t \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - \sqrt{\varepsilon_{3\sigma}})}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)} - \frac{P_{cz}}{P_m} \times \frac{(\sqrt{\varepsilon_m} - 1)}{(\sqrt{\varepsilon_\sigma} - 1)}. \quad (11)$$

Тоді алгоритм оцінки вологості ґрунту земляного полотна за величиною діелектричної проникності містить в собі основні етапи:

а) визначення діелектричної проникності ґрунту за результатами георадарного зондування [4];

б) розрахунок основних параметрів узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту (4-5);

в) оцінка вологості ґрунтів за (10-11).

Висновки

Перевагою узагальненої моделі діелектричних властивостей ґрунту, що поєднує модель Шмугге та модель Бірчака для багатокомпонентних середовищ, є можливість врахування вільної та зв'язаної води, щільності і гранулометричного складу ґрунтів для оцінки діелектричної проникності. Рішення оцінки вологості ґрунтів земляного полотна за допомогою польового георадару 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 та узагальнену модель діелектричних властивостей ґрунтів, що відображає зв'язок діелектричної проникності ґрунтів з їх вологістю

Література

1. Батракова А.Г. Оценка состояния дорожных одежд с привлечением георадарных технологий: монография / А.Г. Батракова. – Х. : ХНАДУ, 2013. – 156 с.
2. Процюк В.О. Дослідження впливу вологості підстильного ґрунту та товщини шарів основи на загальний модуль пружності конструкції дорожнього одягу / В.О. Процюк // Сучасні технології будівництва й експлуатації автомобільних доріг: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Х.: ХНАДУ, 2013. – С. 27-31.
3. 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. / Ефименко Сергей Владимирович. – Омск, 2006. – 23 с.
4. Батракова А.Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.11 / Батракова Анжеліка Геннадіївна. – Х., 2014. – 390 с.
5. 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.
6. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. – М.: Мир, 1969. – 544 с.
7. 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.
8. 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.
9. Черняк Г.Я. Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии / Г.Я. Черняк, О.М. Мясковский. – М.: Недра, 1973. – 176 с.
10. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов / А.М. Шутко. – М.: Наука, 1986. – 192 с.

11. Белая М.Л. Молекулярная структура воды / М.Л. Белая, В.Г. Левадный // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Физика. – 1987. – № 11. – С. 3–61.
12. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы / В.А. Королев // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 9. – С. 79-85.
13. Schmugge T.J. Survey of methods for soil moisture determination / T.J. Schmugge, T.J. Jackson, H.L. McKim // – Water Resources Res. / Vol. 16. – PP. 961-979.
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. Миронов В.Л. Область применения диэлектрической модели Шмагге для влажных почв / В.Л. Миронов, А.Ю. Анисимова, С.В. Фомин, Л.Г. Косолапова // Решетневские чтения. – Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 13. – С. 187-188.
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. Wong K.T. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design / K.T. Wong, E. Urbaez // Shaping the future: Linking policy, research and outcomes : 25th ARRB Conference, Perth, Australia : Proceedings. – 2012. – PP. 1–13.
18. Беляева Т.А. 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.А. Беляева, А.П. Бобров, П.П. Бобров, О.В. Галеев, В.Н. Мандрыгина // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 5. – С. 28-34.
19. Бобров П.П. Диэлектрическая проницаемость почв лесотундровой зоны Красноярского края [Электронный ресурс]. / П.П. Бобров, В.Н. Мандрыгина, В.Д. Стасюк, В.И. Убогов // Электронный научный журнал «Вестник Омского государственного педагогического университета». – Омск, 2006. – Режим доступа: www.omsk.edu
20. Вырко Н.П. Дорожное грунтоведение с основами механики грунтов : Учебник / Н.П. Вырко, И.И. Леонович. – Минск : Высшая школа, 1977. – 224 с.

Рецензенти:

Кузло М.Т., д-р техн. наук, Національний університет водного господарства та природокористування.

Балашова Ю.Б., канд. техн. наук, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури.

Reviewers:

Kuzlo M.T., Dr. Tech. Sci., National University of Water and Environmental Engineering.

Balashova Yu.B., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Стаття надійшла до редакції: **13.02.2017 р.**