



УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Кочеткова А.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
sadykov@kgeu.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* При строительстве дорог, подготовке фундаментов для высотных зданий необходима информация о таком важном параметре, как плотность скелета грунта – отношение массы частиц грунта к объему образца ненарушенной структуры. Точное определение этого параметра является важной задачей, поскольку данный параметр имеет нелинейную зависимость от влажности. Следовательно, в узком диапазоне изменения влажности, плотность скелета грунта становится максимальной, что делает такой грунт наиболее благоприятным для проведения строительных работ. *ЦЕЛЬ.* Разработать автономное устройство для измерения влажности грунта в полевых условиях. *МЕТОДЫ.* Для разработки устройства измерения влажности грунта использовался диэлькометрический метод. Это косвенный метод измерения влажности веществ, основанный на зависимости диэлектрической проницаемости этих веществ от их влажности. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Было разработано автономное устройство определения влажности грунта использующее диэлькометрический метод, предназначенное для использования в полевых условиях, что значительно ускоряет процесс анализа и обработки результатов измерения, а, следовательно, и процесс обработки информации о состоянии грунта. В ходе проекта были проведены эксперименты по измерению емкости в зависимости от влажности и температуры на различных частотах от 100 Гц до 100 кГц в различных типах грунтов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Было разработано устройство определения влажности грунта и предложена методика определения влажности и плотности скелета грунта диэлькометрическим методом, проведены предварительные эксперименты. Однако в ходе экспериментов обнаружилась зависимость от температуры для низких частот, поэтому необходима дополнительная калибровки по температуре.

Ключевые слова: влажность грунта; плотность скелета грунта; диэлектрическая проницаемость; диэлькометрический (емкостной) метод.

Для цитирования: Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Кочеткова А.А. Устройство для измерения влажности грунта в полевых условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 20-29. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-20-29.

A DEVICE FOR MEASURING SOIL MOISTURE IN THE FIELD

Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Galieva T.G., Kochetkova A.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sadykov@kgeu.ru

Abstract: *RELEVANCE.* When building roads, preparing foundations for high-rise buildings, information is needed about such an important parameter as the density of the soil skeleton – the ratio of the mass of soil particles to the volume of the sample of an undisturbed structure. The precise determination of this parameter is an important task, since this parameter has a nonlinear dependence on humidity. Consequently, in a narrow range of humidity changes, the density of the soil skeleton becomes maximum, which makes such a soil the most favorable for construction work. *PURPOSE.* To develop an autonomous device for measuring soil moisture in the field. *METHODS.* The dielkometric method was used to develop a device for measuring soil moisture. This is an indirect method for measuring the humidity of substances based on the dependence of the dielectric constant of these substances on their humidity. *RESULTS.* An autonomous device for

determining soil moisture using the dielkometric method has been developed, designed for use in the field, which significantly speeds up the process of analyzing and processing measurement results, and, consequently, the process of processing information about the state of the soil. During the project, experiments were carried out to measure capacity depending on humidity and temperature at various frequencies from 100 Hz to 100 kHz in various types of soils. **CONCLUSION.** A device for determining soil moisture was developed and a method for determining the moisture and density of the soil skeleton by the dielkometric method was proposed, preliminary experiments were conducted. However, during the experiments, a temperature dependence was found for low frequencies, so additional temperature calibration is necessary.

Keywords: soil moisture; density of the soil skeleton; dielectric constant; the dielkometric (capacitive) method.

For citation: Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Galieva T.G., Kochetkova A.A. A device for measuring soil moisture in the field. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 20-29. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-20-29.

Введение (Introduction)

В действующей нормативной технической литературе контроль качества уплотнения насыпных грунтов основан на анализе коэффициента уплотнения грунта либо плотности сухого грунта [1, 2]. Данная методика весьма трудоемка из-за необходимости определения максимальной плотности и оптимальной влажности. В то же время за рубежом активно применяются методы экспресс-контроля качества уплотнения грунтов основания, причем данные методы основаны на анализе деформационных характеристик грунта [3, 4]. В связи с этим актуальным является исследование методов экспресс-контроля для снижения трудоемкости работ по контролю качества уплотнения грунтов [5, 6].

Прочность, надежность и долговечность дорожного покрытия в большой степени зависят от плотности скелета грунта – отношение массы частиц грунта к объему образца ненарушенной структуры. Его рассчитывают для того, чтобы определить: предполагаемую усадку, потребность в дополнительном уплотнении, допустимую нагрузку [7, 8]. Данный параметр имеет нелинейную зависимость от влажности. Следовательно, в узком диапазоне влажности плотность скелета грунта становится максимальной, что делает такой грунт наиболее благоприятным для проведения строительных работ [9].

Влажность грунта – отношение массы воды в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы. Его рассчитывают для того, чтобы определить: предполагаемую усадку, потребность в дополнительном уплотнении, допустимую нагрузку. Известные методы измерения влажности грунта, в соответствии с ГОСТ 5180-2015¹, производятся путем отбора грунта, предварительно подготовленного и взвешенного (масса 15-50 грамм), помещая в заранее высушенный и пронумерованный стаканчик, после чего производится ряд действий для определения гигроскопической влажности грунта, путем помещения образца в нагретый сушильный шкаф при температуре 105 ± 2 °C на 3 часа, с последующим взвешиванием. Разность грунта до и после высушивания позволит определить количество выпаренной влаги. После чего, в соответствии с ГОСТ 5180-2015, можно определить процент влажности грунта.

Разработанное нами устройство использует диэлькометрический (емкостной) метод, который основан на корреляционной зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нем влаги при положительных температурах, в соответствии с ГОСТ 21718-84² «Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности».

Разработанное нами устройство является автономным, предназначенным для испытаний в полевых условиях, следовательно, необходимость в транспортировке образцов отпадает, что значительно убыстряет процесс анализа и обработки результатов измерения, а также процесс обработки информации о состоянии грунта.

Понимая важность определения влажности для контроля состояния грунтов различного состава в нашей стране и за рубежом, разрабатываются подобные устройства [10-12].

Основными недостатками известных устройств являются: высокая погрешность измерения, в связи с тем, что устройства реализуют измерения влажности с помощью

стержня или блока сорбции, погружаемых в грунт, который, в свою очередь, имеет разную плотность.

Материалы и методы (Materials and methods)

Устройство определения влажности грунта основано на диэлькометрическом методе. Диэлькометрический метод – метод косвенного измерения влажности веществ, основанный на зависимости диэлектрической проницаемости этих веществ от их влажности.

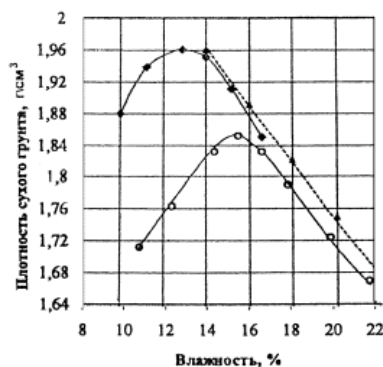


Рис. 1. Зависимость плотности сухого грунта от влажности¹ Fig. 1. Dependence of dry soil density on humidity

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Диэлькометрический (емкостной) метод основан на особых электрических свойствах воды. Вода обладает целым рядом особенностей строения и свойствами, отличающими ее от других веществ. Одним из аномальных свойств воды является очень высокая диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость свободной воды $\epsilon \sim 80$. У большинства твердых веществ $\epsilon < 10$, у жидкостей $\epsilon < 10 \dots 20$. Диэлектрическая проницаемость воды зависит от ее состояния. При связывании вода теряет подвижность в электрическом поле и ее диэлектрическая проницаемость уменьшается. У химически связанной воды $\epsilon = 4 \dots 4,9$.

Влажный материал условно может быть представлен как двухкомпонентная смесь с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{\text{общ}}$. Для расчета композиционных диэлектриков (смесей) воспользуемся формулой Лихтенеккера, которая для двухкомпонентных смесей имеет вид:

$$\epsilon_{\text{общ}} = \rho_v \epsilon_v + \rho_c \epsilon_c, \quad (1)$$

где ϵ_v и ϵ_c – диэлектрические проницаемости воды и сухого материала соответственно; ρ_v и ρ_c – объемные концентрации воды и сухого материала соответственно.

Сумма объемных концентраций удовлетворяет условию:

$$\rho_v + \rho_c = 1. \quad (2)$$

Первичный преобразователь предлагаемого устройства представляет собой конденсатор. Емкость конденсатора C зависит от диэлектрической проницаемости вещества, находящегося между электродами конденсатора:

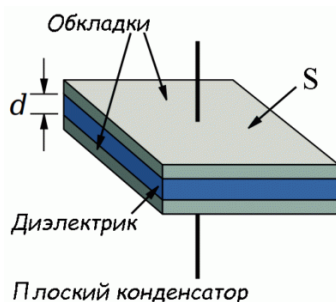


Рис. 2. Схема конденсатора

Fig. 2. Capacitor circuit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (3)$$

¹ ГОСТ 5180-2015 «Методы лабораторного определения физических характеристик»

² ГОСТ 21718-84 «Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности»

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками конденсатора; S – площадь обкладок конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

Зная геометрию конденсатора (то есть площадь обкладок и расстояние между ними), электрическую постоянную заменим все известные параметры на коэффициент k . Измерив емкость конденсатора, можно вычислить диэлектрическую проницаемость по формуле:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{C}{k}. \quad (4)$$

Используя формулы (1), (2) и (3), составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon = \rho_{\varepsilon} \varepsilon_{\varepsilon} + \rho_c \varepsilon_c \\ \rho_{\varepsilon} + \rho_c = 1 \end{cases}. \quad (5)$$

В ходе проведения экспериментов с грунтами различной влажности проводились измерения его емкости, что является базой данных для опытных испытаний.

Плотность скелета грунта (ρ_a) – отношение массы частиц грунта к объему образца ненарушенной структуры. Расчет плотности скелета грунта производится следующим образом:

$$\rho_a = \frac{\rho}{1+W}, \quad (6)$$

где ρ – плотность грунта, г/см³; W – влажность грунта (в долях единицы).

Нами было разработано устройство определения влажности грунта использующее диэлькометрический метод, являющееся автономным и предназначенным для использования в полевых условиях.



Рис. 3. Блок-схема разработанного устройства

Fig. 3. Block diagram of the developed device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Принцип работы устройства заключается в следующем:

1. В специальный отсек засыпается образец (грунт).
2. С помощью измерительного устройства вычисляется емкость грунта.
3. Микроконтроллерная обработка вычисляет влажность и плотность скелета грунта по описанной выше методике.

Результаты выводятся на блок индикации.

Лабораторное устройство состоит из измерительной ячейки с образцами, измерительного устройства (RLC-метр), блока индикации. Измерительная ячейка (2) состоит из шести отсеков для опытных образцов (рис. 4), каждый отсек контактирует с двумя пластинами текстолита, выполняющих функцию электродов конденсатора. Грунт помещается в отсек, а центральная перегородка служит для создания дополнительной прочности. Измерительное устройство RLC-метр присоединяется к проводам, припаянным к металлизированной части текстолита. Полученная с него информация о емкости передается на микроконтроллер, после чего обрабатывается и передается на блок индикации.

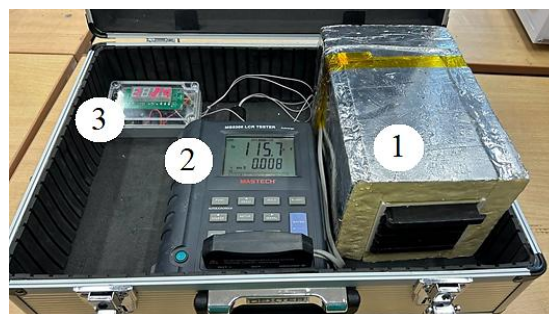


Рис. 4. Лабораторное устройство:

Fig. 4. Laboratory device:

1 – измерительная блок с образцами;

1 – measuring unit with samples;

2 – измерительное устройство (RLC-метр);

2 – measuring device (RLC meter);

3 – блок индикации

3 – display unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты (Results)

В ходе выполнения работы были проведены эксперименты по измерению емкости в зависимости от влажности и температуры на различных частотах от 100 Гц до 100 кГц.

Исходные данные:

Влажность грунта: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%.

Частота измерений: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц.

Температура грунта: 24°C; 18°C.

На рисунке 5 представлены зависимости емкости (пФ) от влажности грунта (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%) для различных частот (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц) при температуре грунта 24°C.

На рисунке 6 представлены зависимости емкости (пФ) от влажности грунта (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%) для различных частот (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц) при температуре грунта 18°C.

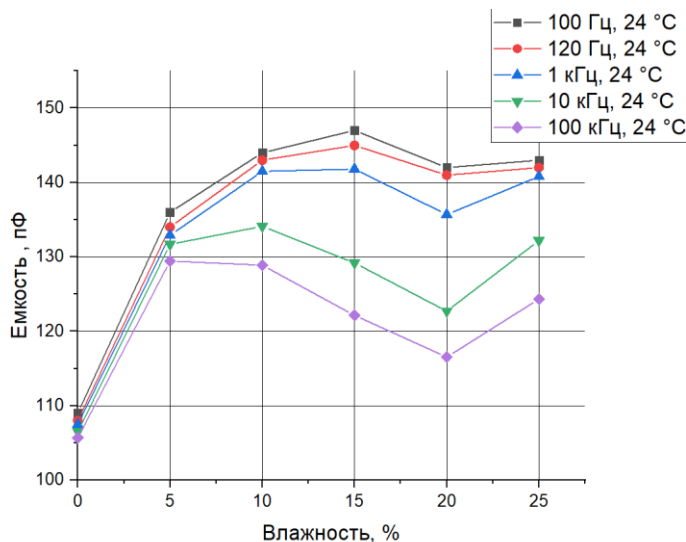


Рис. 5. Зависимости емкости от влажности для различных частот при температуре 24°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

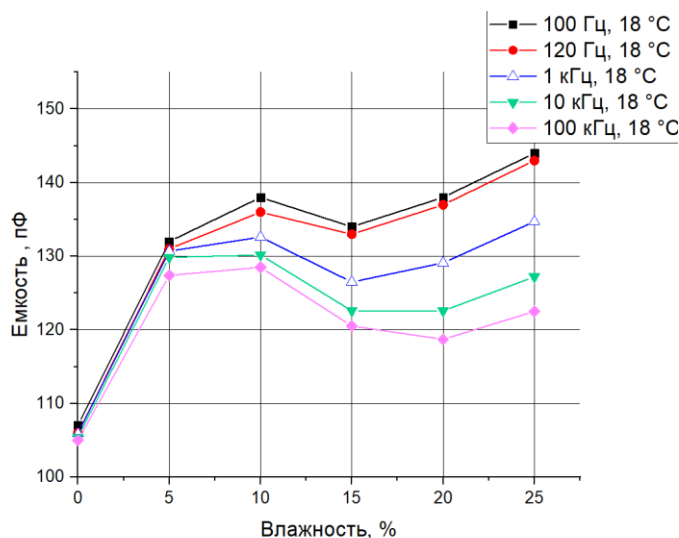


Рис. 6. Зависимости емкости от влажности для различных частот при температуре 18°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 7-11 представлены зависимости емкости от влажности на различных частотах отдельно при температурах 24°C и 18°C.

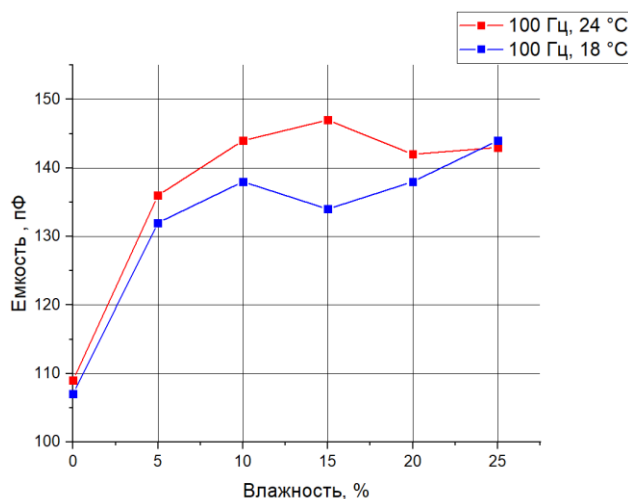


Рис. 7. Зависимость емкости от влажности на частоте 100 Гц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 7. Dependence of the capacity on humidity at a frequency of 100 Hz at temperatures of 24°C and 18°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

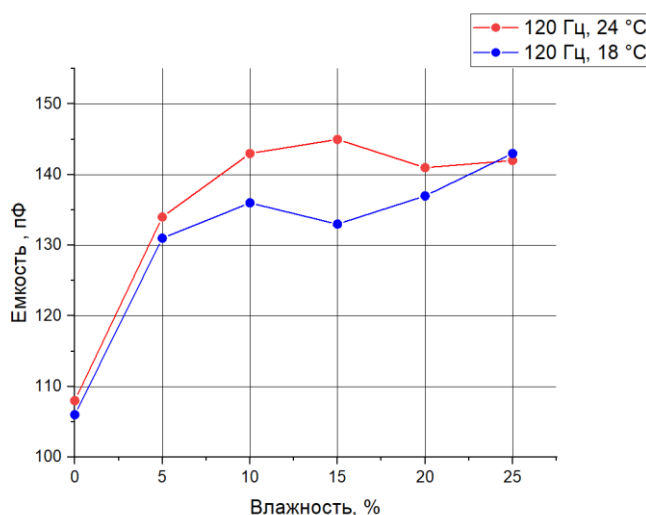


Рис. 8. Зависимость емкости от влажности на частоте 120 Гц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 8. Dependence of the capacity on humidity at a frequency of 120 Hz at temperatures of 24°C and 18°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

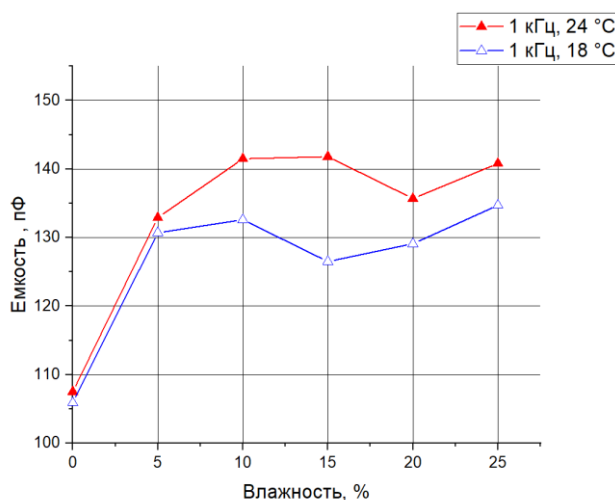


Рис. 9. Зависимость емкости от влажности на частоте 1 кГц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 9. Dependence of capacity on humidity at a frequency of 1 kHz at temperatures of 24°C and 18°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

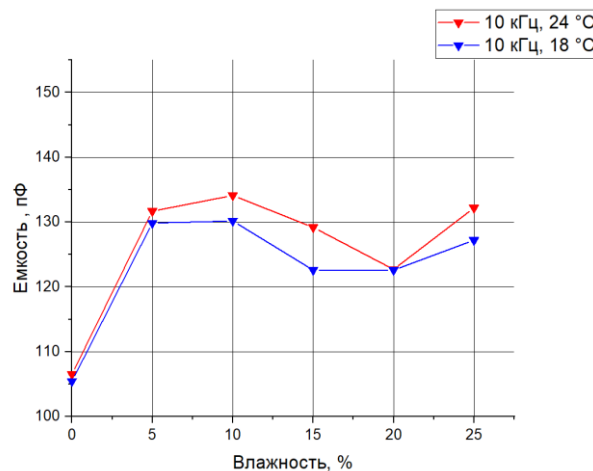


Рис. 10. Зависимость емкости от влажности на частоте 10 кГц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 10. Dependence of capacity on humidity at a frequency of 10 kHz at temperatures of 24°C and 18°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

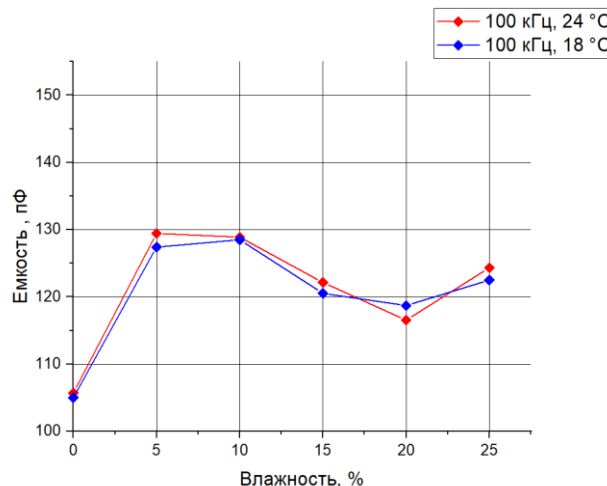


Рис. 11. Зависимость емкости от влажности на частоте 100 кГц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 11. Dependence of capacity on humidity at a frequency of 100 kHz at temperatures of 24°C and 18°C

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из графиков можно сделать вывод, что на низких частотах (100 Гц-1 кГц) прослеживается температурная зависимость в среднем при 7-20% влажности.

На высоких частотах (10 и 100 кГц) температурная зависимость выражена слабо, есть экстремум на 5-10% влажности.

Закключение (Conclusions)

Нами был разработан лабораторный стенд и предложена методика определения влажности грунта диэлькометрическим методом. После проведения ряда измерений емкости образцов с известными (неизменными) размерами было установлено, что изменение емкости связано с диэлектрической проницаемостью, которая, в свою очередь, коррелирует с влажностью. Эксперименты проводились на различных частотах.

В ходе исследования было установлено, что на высоких частотах зависимость от температуры выражена слабо, однако есть экстремум на 5-10%. Для совокупного анализа и однозначного определения исследования проводились на низких частотах. На рисунке 6 видна разница значений емкости при 100 Гц (черный график) и при 100 кГц (розовый график), что показывает линейную зависимость от влажности. Погрешность прибора 1%.

Таким образом, в ходе исследования установлена работоспособность метода, но также обнаружена невозможность измерения емкости традиционным диэлькометрическим методом с большой влажностью образца, т.е. устройство показывает верные результаты при малой концентрации воды.

Литература

1. Сазонова С.А., Румянцев С.Д. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 113–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.
2. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. О некоторых результатах исследований насыпных грунтов // Изв. вузов. Строительство. – 2016. – № 2 (686). – С. 109–116.
3. В. А. Шадских, В. Е. Кижаяева, В. О. Пешкова, И. А. Шушпанов, З. Ф. Иванищева, Е. С. Смирнов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 1(33), Перспективы использования влагомера для оперативного определения влажности почвы, 2019.
4. Fleming P.R., Frost M.W., Lambert J.P. A review of the lightweight deflectometer (lwd) for routine insitu assessment of pavement material stiffness.
5. Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Бондарев А.Б., Берестовой А.А., Микова Е.Ю., Яровенко А. А. Комплексный метод измерения теплофизических характеристик грунтов земляного полотна автомобильной дороги, журнал СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ, 2023 г. № 4. с.34-37.
6. Kopf F., Adam D., Paulmichl I. Investigation of the dynamic plate loading test with the light-weight deflectometer using the boundary element // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf (дата обращения: 10.03.2024).
7. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control // Journal of Civil Engineering and Management. – 2004. – Vol. X, suppl. 1. – P. 45–50.
8. Fleming P.R., Frost M.W., Lambert J.P. A review of the lightweight deflectometer (lwd) for routine insitu assessment of pavement material stiffness. TIC service group, available at: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007_uk_portable_fwd_evaluation.pdf (дата обращения: 11.03.2024).
9. Use of the light weight deflectometer (lwd) at highland valley copper mine / K. Neil Singh [et al.] // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use_of_the_Light_Weight_Deflectometer.pdf (дата обращения: 15.03.2024).
10. Пономарев А.Б., Сазонова С.А., Румянцев С.Д. О современных методах экспресс-контроля характеристик насыпных грунтов. Журнал геотехника Учредители: 2017г., №3, с. 4-8.
11. Александрова Н.П., Семенова Т.В. Совершенствование методов экспресс-контроля уплотнения грунтов в земляном полотне лесных дорог. Часть 1. Обобщающая математическая модель // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-2(48). С. 10-14.
12. Панкова, Т. А. Применение современных методов определения влажности почвы / Т. А. Панкова // Научная жизнь. – 2016. – № 4. – С. 130–137.
13. Study of the precision farming with soil maps describing environmental load using a real-time soil sensor / H. Umeda, S. Shibusawa, T. Okayama, D. Y. Sakuma, T. Kaho, K. Ninomiya // J. Japan. Soc. Agr. Mach. – 2011. – Vol. 73, № 1. – P. 37–44.
14. Аскеров К.А., Мардахаев А.В., Хидиров А.Ш. О диэлькометрическом методе измерения влажности почвы (TDR метод) DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122 Вестник Азербайджанской инженерной академии 2022, т. 14, №3, с. 104-122.
15. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., and Friedman S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry // Vadose Zone J., vol. 2, pp 444–475, 2003 (in English)
16. Rothe A., Weis W., Kreutzer K., Matthies D., Hess U., Ansorge B. Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture // Water Resour. Res., vol. 33, iss. 7, pp 1585-1593, 1997.

Авторы публикации

Садыков Марат Фердинантович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6816-0148>. sadykov@kgeu.ru

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7334-7775>. alex.kutuzov@mail.ru

Иванов Дмитрий Алексеевич – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453> Ivanov.da@mail.ru

Галиева Татьяна Геннадьевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5244-1110.79534929817@ya.ru>

Кочеткова Азалия Адиповна – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Беспилотные и робототехнические платформы в энергетике» (НИЛ БРПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). azalkakarimova.16@mail.ru

References

1. Sazonova S.A., Rummyantsev S.D. Application of express methods for determining the characteristics of bulk soils // Bulletin of PNRPU. Construction and architecture. - 2017. – Vol. 8, No. 3. – pp. 113-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017
2. Sazonova S.A., Ponomarev A.B. On some results of studies of bulk soils // Izv. vuzov. Construction. – 2016. – № 2 (686). – Pp. 109-116.
3. V. A. Shadskikh, V. E. Kizhaeva, V. O. Peshkova, I. A. Shushpanov, Z. F. Ivanishcheva, E. S. Smirnov // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Problems of Land Reclamation, No. 1(33), Prospects of using a moisture meter for the operational determination of soil moisture, 2019.
4. Fleming P.R., Frost M.V., Lambert J.P. Overview of a lightweight deflectometer (LWD) for routine assessment of the stiffness of pavement material in situ.
5. Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V., Bondarev A.B., Berestovoy A.A., Mikova E.Yu., Yarovenko A.A. An integrated method for measuring the thermophysical characteristics of soils of the roadbed, journal CONSTRUCTION AND ROAD MACHINERY, 2023 No. 4. pp.34-37.
6. Kopf F., Adam D., Paulmichl I. Investigation of dynamic plate loading using a light deflectometer using a boundary element // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf (accessed: 07/10/2024).
7. Maria Y.S. Application of the modern method of control of embankment compaction // Journal of Civil Engineering and Management. - 2004. – Volume X, Supplement 1. – pp. 45-50.
8. Fleming P.R., Frost M.V., Lambert J.P. Review of a lightweight deflectometer (lwd) for routine assessment of the stiffness of the pavement material in place. TIC Service Group, available at: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007_uk_portable_fwd_evaluation.pdf (date of reference: 03/11/2024).
9. The use of a light deflectometer (lwd) at the Highland Valley copper mine / K. Neil Singh [et al.] // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use_of_the_Light_Weight_Deflectometer.pdf (date of application: 03/15/2024).
10. Ponomarev A.B., Sazonova S.A., Rummyantsev S.D. On modern methods of express control of the characteristics of bulk soils. Journal of Geotechnics Founders: 2017, No.3, pp. 4-8.
11. Alexandrova N.P., Semenova T.V. Improvement of methods of express control of soil compaction in the roadbed of forest roads. Part 1. Generalizing mathematical model // International Scientific Research Journal. 2016. No. 6-2(48). pp. 10-14.
12. Pankova, T. A. Application of modern methods for determining soil moisture / T. A. Pankova // Scientific life. - 2016. – No. 4. – pp. 130-137.
13. Research of precision agriculture using soil maps describing the environmental load using a soil sensor in real time / H. Umeda, S. Shibusawa, T. Okayama, D. Y. Sakuma, T. Kaho, K. Ninomiya // Japan. Sokr. agr. Max. – 2011. – Vol. 73, No. 1. – pp. 37-44.
14. Askerov K.A., Mardadaev A.V., Idivov A.Sh. On the digital method of measuring air humidity (TDR method) DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122 Bulletin of the Azerbaijan Academy of Sciences 2022, vol. 14, No. 3, pp. 104-122.
15. Robinson D.A., Jones S.B., Reith J.M., Or D. and Friedman S.P. Review of achievements in the field of measuring dielectric and electrical conductivity in soils using time domain reflectometry // Vadose Zone J., volume 2, pp. 444-475, 2003 (in English)
16. Roth A., Weiss V., Kreutzer K., Mattis D., Hess U., Ansorg B. Changes in soil structure caused by the installation of reflectometric sensors in the time domain and their effect on soil moisture measurement // Water Resources. Res., volume 33, volume 7, pp. 1585-1593, 1997.

Authors of the publication

Marat F. Sadykov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6816-0148>. sadykov@kgeu.ru

Aleksander V. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7334-7775>. alex.kutuzov@mail.ru

Dmitriy A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>. Ivanov.da@mail.ru

Tatyana G. Galieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5244-1110>. 79534929817@ya.ru

Azaliya A. Kochetkova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. azalkakarimova.16@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено 15.04.2024 г.

Отредактировано 30.07.2024 г.

Принято 15.11.2024 г.