

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

Садыков М. Ф., Голенищев-Кутузов А. В. ORCID ID 0000-0001-7334-7775,  
Потапов А. А. ORCID ID 0000-0002-4497-5796

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация,  
e-mail: aapot@ya.ru*

Актуальность работы обусловлена необходимостью оперативного контроля качества грунтов при дорожном строительстве. Существующие лабораторные методы отличаются высокой трудоемкостью и длительностью измерений, требуют транспортировки проб, что исключает возможность оперативного принятия решений непосредственно на строительной площадке. В работе рассматривается автоматизированное устройство для измерения влажности грунта в полевых условиях, реализующее диэлектрический метод. Разработана структурная схема микроконтроллерного устройства, включающая емкостной датчик, измерительный блок, микроконтроллер и блок индикации. Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости емкости грунта от влажности в диапазоне частот 100 Гц – 100 кГц при различных температурах. Выявлена проблема температурной зависимости влажности грунта на низких частотах. Для решения этой проблемы предложен и реализован алгоритм двухчастотной компенсации температурной погрешности, основанный на измерении разности емкостей на низкой (100 Гц) и высокой (100 кГц) частотах. Экспериментально подтверждено, что разработанное устройство обеспечивает автоматическое измерение влажности и плотности скелета грунта с погрешностью не более 2,5 %. Разработанная система позволяет автоматически вычислять влажность и плотность скелета грунта, что существенно сокращает время полевых испытаний и повышает достоверность контроля. При этом устройство автономно и может питаться от бортовой сети автомобиля (12 В) или встроенного аккумулятора.

**Ключевые слова:** автоматизация измерений, влажность грунта, плотность скелета грунта, диэлектрическая проницаемость, диэлектрический метод, микроконтроллерная система, двухчастотная компенсация, дорожное строительство

## AUTOMATION OF SOIL MOISTURE CONTROL IN THE FIELD BASED ON THE DIELECTRIC METHOD

Sadykov M. F., Golenischev-Kutuzov A. V. ORCID ID 0000-0001-7334-7775,  
Potapov A. A. ORCID ID 0000-0002-4497-5796

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
“Kazan State Power Engineering University”, Kazan, Russian Federation,  
e-mail: aapot@ya.ru*

The relevance of the work is due to the need for operational control of soil quality during road construction. Existing laboratory methods are characterized by high labor intensity and duration of measurements, require the transportation of samples, which excludes the possibility of prompt decision-making directly on the construction site. The paper discusses an automated device for measuring soil moisture in the field, which implements the dielectric method. A structural diagram of a microcontroller device has been developed, including a capacitive sensor, a measuring unit, a microcontroller and an indication unit. The results of experimental studies of the dependence of soil capacity on humidity in the frequency range of 100 Hz – 100 kHz at various temperatures are presented. The problem of temperature dependence of soil moisture at low frequencies is revealed. To solve this problem, an algorithm for dual-frequency temperature error compensation based on measuring the difference in capacitance at low (100 Hz) and high (100 kHz) frequencies has been proposed and implemented. It has been experimentally confirmed that the developed device provides automatic measurement of moisture and density of the soil skeleton with an error of no more than 2.5%. The developed system allows you to automatically calculate the moisture and density of the soil skeleton, which significantly reduces the time of field tests and increases the reliability of control. At the same time, the device is autonomous and can be powered from the car's on-board network (12 V) or the built-in battery.

**Keywords:** measurement automation, soil moisture, soil skeleton density, dielectric constant, dielectric method, microcontroller system, dual-frequency compensation, road construction

### Введение

Современное дорожное строительство и возведение высотных зданий предъявляет высокие требования к качеству грунтовых оснований. Одними из ключевых пара-

метров, определяющих несущую способность, долговечность и устойчивость земляного полотна, являются плотность скелета грунта и его влажность. Плотность скелета грунта (отношение массы твердых частиц

к объему образца ненарушенной структуры) находится в нелинейной зависимости от влажности. Существует узкий диапазон оптимальной влажности, при котором достигается максимальная плотность скелета, что обеспечивает наилучшие условия для уплотнения и, как следствие, высокую прочность и надежность дорожного покрытия [1, 2]. Отклонение от этого диапазона ведет к снижению качества уплотнения, повышенной усадке и риску деформаций покрытия в процессе эксплуатации.

В связи с этим оперативный и достоверный контроль влажности грунта непосредственно на строительной площадке является критически важной задачей. В действующей нормативной документации РФ (ГОСТ 5180-2015) основным методом определения влажности является термостатно-весовой метод. Он заключается в отборе пробы грунта массой 15–50 г, ее взвешивании, последующем высушивании в сушильном шкафу при температуре  $105 \pm 2$  °С в течение 3 ч и повторном взвешивании [3]. Несмотря на высокую точность, данный метод обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих его применение для полевого экспресс-контроля:

- высокая трудоемкость и продолжительность цикла измерения (не менее 3–4 ч);
- необходимость транспортировки образцов в стационарную лабораторию, оснащенную громоздким оборудованием;
- невозможность оперативного принятия технологических решений (например, о необходимости дополнительного увлажнения или подсушки грунта) непосредственно на месте производства работ.

За рубежом для экспресс-оценки качества уплотнения все чаще применяются методы, основанные на анализе деформационных характеристик (легкие динамометрические установки LWD), а также электрофизические методы, такие как рефлектометрия во временной области (TDR) [4, 5]. Однако TDR-метод весьма чувствителен к конструкции зонда, его размещению в грунте и электропроводности почвы, что требует сложной калибровки и может приводить к значительным погрешностям при изменении плотности составного грунта [6, 7].

Анализ известных конструкций портативных влагомеров [8–10] показывает, что их основным недостатком является высокая погрешность измерений, обусловленная использованием стержневых датчиков или сорбционных блоков, погружаемых в грунт. Показания таких устройств существенно зависят от плотности грунта, которая, в свою очередь, варьируется в широких пределах и не поддается оперативному уче-

ту. Кроме того, многие из этих устройств не являются полностью автономными и требуют стационарного источника питания или сложного обслуживания.

Таким образом, существует объективная потребность в разработке автоматизированного средства измерения, которое сочетает преимущества лабораторной точности с оперативностью и автономностью полевого прибора. Перспективным направлением в решении этой задачи является применение диэлькометрического метода [11], основанного на корреляционной зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нем влаги, по следующим причинам:

- первичный преобразователь (емкостной датчик) имеет простую и надежную конструкцию, легко адаптируемую для полевых условий;
- выходной сигнал (емкость) может быть непосредственно преобразован в цифровую форму с помощью современных микроконтроллерных средств;
- метод обеспечивает высокое быстродействие, позволяя проводить измерения за время от нескольких секунд до минут.

**Цель исследования** – разработка автоматизированной системы контроля влажности грунта на основе диэлькометрического метода, обеспечивающей автоматическую компенсацию температурной погрешности и вычисление плотности скелета грунта в реальном времени.

#### Материалы и методы исследования

В основу работы измерительной системы положен диэлькометрический метод, регламентированный ГОСТ 21718-84. Данный метод основан на измерении емкости, у которой диэлектрическая проницаемость материала зависит от содержания в нем влаги [12]. Вода обладает высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon \approx 80$ ) по сравнению с минеральным скелетом грунта ( $\epsilon < 10$ ). Первичным измерительным преобразователем служит емкостной датчик, емкость которого линейно связана с диэлектрической проницаемостью грунта.

Разработанное устройство реализует автоматизированный цикл измерения. Проба грунта помещается оператором в измерительную ячейку, микроконтроллерная система последовательно проводит измерения емкости на двух частотах (низкой и высокой), одновременно фиксируя температуру образца [13]. На основе полученных данных и калибровочных коэффициентов, хранящихся в энергонезависимой памяти, в реальном времени вычисляются влажность

и плотность скелета грунта, а результаты выводятся на блок индикации. Весь цикл автоматического измерения занимает не более 1–2 мин.

В качестве объекта исследования использовались грунты, типичные для дорожного строительства в средней полосе РФ (супеси, легкие суглинки). Для верификации метода и калибровки устройства проводились лабораторные исследования на образцах грунта. Образцы готовились с заданной влажностью в диапазоне от 0 до 25 % с шагом 5 % методом сухого прессования с последующим увлажнением. Во время измерения поддерживалась постоянная температура образцов 18 и 24 °С, а сами измерения емкости проводились на частотах 100 Гц – 100 кГц с использованием прецизионного RLC-метра. Каждое измерение повторялось не менее трех раз для оценки воспроизводимости. Контрольное значение влажности каждого образца определялось термостатно-весовым методом по ГОСТ 5180-2015 до и после экспериментальной серии.

Полученные экспериментальные данные (зависимости емкости от влажности, частоты и температуры) анализировались для выявления оптимальных условий измерений и разработки алгоритма автоматической компенсации температурной погрешности, который реализован в программном обеспечении микроконтроллера.

### Результаты исследования и их обсуждение

В рамках выполнения работы был разработан и изготовлен лабораторный образец устройства для измерения влажности грунта диэлькометрическим методом, структурная схема которого включает измерительную ячейку с емкостным датчиком, измерительный блок, микроконтроллер и блок индикации и управления (рис. 1).

Разработанный лабораторный стенд предназначен для измерений влажности непосредственно в грунтовом массиве (рис. 2) [14]. Первичный преобразователь выполнен в виде системы заостренных алюминиевых стержней, покрытых двумя слоями эпоксидной смолы для создания диэлектрической изоляции. Центральный стержень является одним электродом, а два крайних, соединенных между собой, – вторым. Такая конструкция позволяет погружать датчик в грунт без нарушения его структуры и проводить измерения на различных глубинах. К электродам припаяны выводы, подключаемые к измерительному устройству (RLC-метр). Цифровой выход RLC-метра соединен с микроконтроллерным модулем, который осуществляет сбор данных, их обработку и вывод на жидкокристаллический дисплей. Блок питания обеспечивает автономную работу от аккумулятора или бортовой сети автомобиля (12 В).

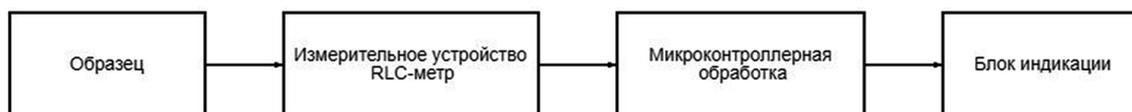


Рис. 1. Блок-схема устройства измерения влажности грунта

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования



Рис. 2. Измерительная система для контроля влажности грунта в полевых условиях

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

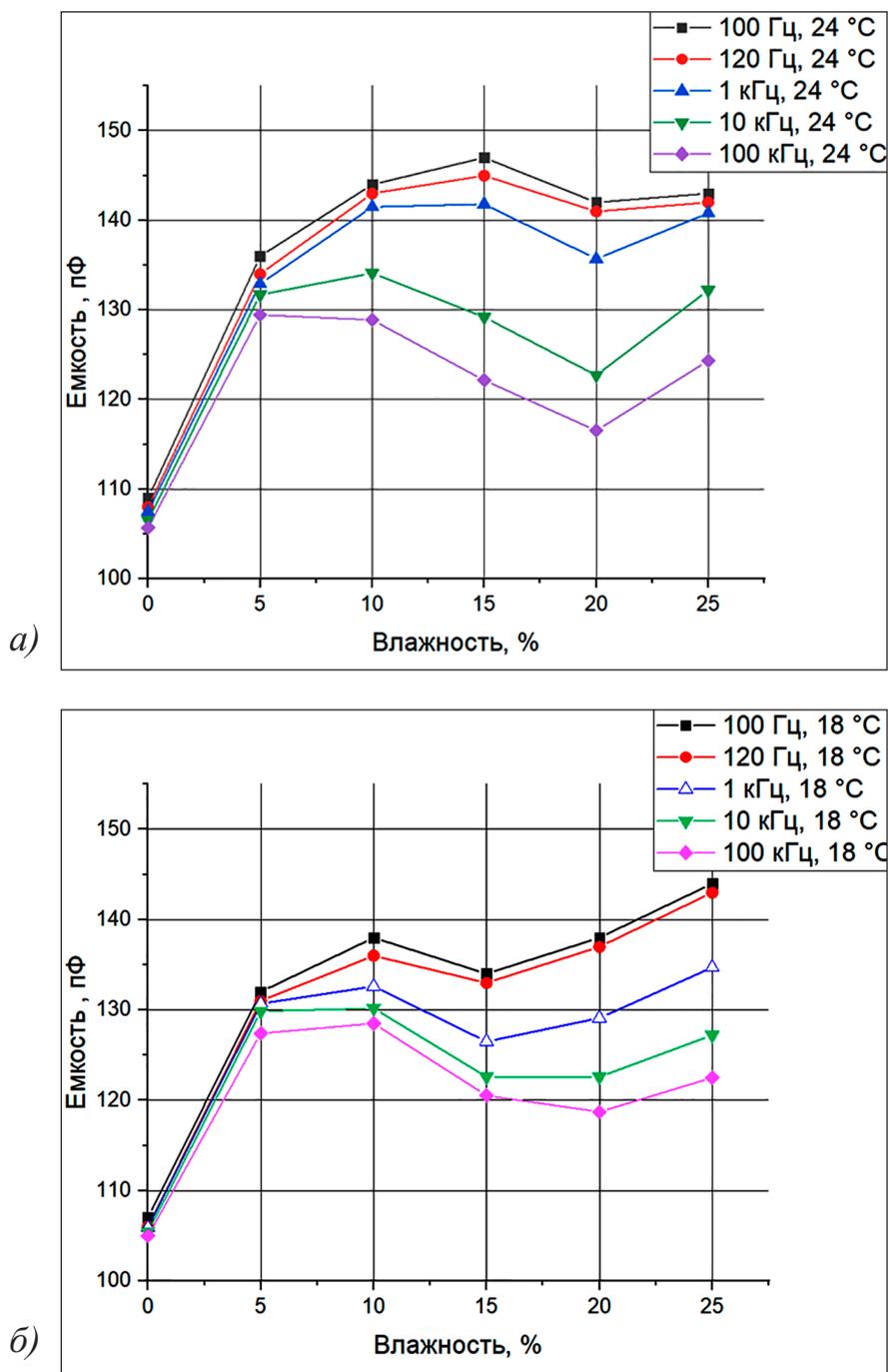


Рис. 3. Зависимости емкости от влажности для различных частот при температуре 24 °С (а) и 18 °С (б)

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для оценки работоспособности диэлькометрического метода и выявления влияния дестабилизирующих факторов (температура, частота) была проведена серия экспериментов на образцах грунта с контролируемой влажностью 0–25 % и термостабилизацией при частотах измерения емкости от 100 Гц до 100 кГц [15].

На рис. 3 представлены зависимости емкости от влажности для исследуемых частот при температурах 24 °С (рис. 3, а) и 18 °С (рис. 3, б). Анализ графиков показывает, что емкость закономерно возрастает с увеличением влажности на всех частотах, что подтверждает принципиальную применимость диэлькометрического метода.

Однако характер кривых и их взаимное расположение существенно зависят от частоты и температуры.

На рис. 3 отчетливо видно, что на низких частотах (до 1 кГц) в диапазоне влажности от 7 до 20 % наблюдается существенное расхождение кривых, соответствующих разным температурам. Разница показаний может достигать 15–20 %, что недопустимо для точных измерений. Это указывает на сильную температурную зависимость диэлектрических свойств грунта на низких частотах, которая, вероятно, обусловлена процессами поляризации на границах раздела фаз и ионной проводимостью. На более высоких частотах (10 кГц, 100 кГц) температурная зависимость выражена значительно слабее. Кривые для 18 и 24 °С практически совпадают в диапазоне влажности от 0 до 15 %. Однако в области малых влажностей (5–10 %) на высоких частотах наблюдается экстремум (изгиб) зависимости, что снижает чувствительность и точность измерений в этом важном диапазоне.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать выводы, что, во-первых, использование одной фиксированной частоты, особенно в низкочастотном диапазоне, не позволяет получить достоверные результаты в полевых условиях из-за сильной температурной зависимости влажности грунта, а, во-вторых, высокочастотные измерения (10–100 кГц) менее чувствительны к температуре, но характеризуются нелинейностью в области низкой влажности (5–10 %), что также ограничивает их применение для универсального контроля.

Для решения выявленной проблемы был предложен и реализован в программе микроконтроллера алгоритм двухчастотной компенсации. Идея алгоритма основана на анализе рис. 3, где видно, что разница значений емкости между крайними частотами (100 Гц и 100 кГц) имеет практически линейную зависимость от влажности и слабо чувствительна к температуре.

Алгоритм работает следующим образом:

1. Последовательно измеряется емкость на низкой частоте ( $f_1 = 100$  Гц) и на высокой частоте ( $f_2 = 100$  кГц).

2. Вычисляется относительная разность

$$\Delta C = (C_{100\text{Гц}} - C_{100\text{кГц}}) / C_{100\text{кГц}}$$

3. По предварительно рассчитанной и загруженной в память калибровочной характеристике

$$W = F(\Delta C)$$

определяется влажность грунта.

4. Плотность скелета грунта вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{ск}} = \rho / (1 + W),$$

где  $\rho$  – плотность грунта, г/см<sup>3</sup>;  $W$  – влажность грунта (в долях единицы).

Испытания алгоритма на экспериментальных данных показали, что максимальное расхождение с результатом термостатно-весового метода не превышает 2,5 % во всем диапазоне температур и влажностей, что соответствует техническому заданию. Разработанная система контроля влажности грунта в полевых условиях обеспечивает:

- автоматическую компенсацию температурной погрешности без участия оператора;
- вычисление не только влажности, но и производного параметра – плотности скелета грунта;
- возможность работы в автономном режиме от аккумулятора;
- хранение калибровочных данных для различных типов грунтов.

### Заключение

В результате исследования разработано автоматизированное устройство для контроля влажности грунта в полевых условиях. Применение диэлькометрического метода в сочетании с микроконтроллерной обработкой сигналов позволило:

1. Автоматизировать процесс измерения, исключив ручной труд и необходимость транспортировки проб в лабораторию.
2. Реализовать алгоритм двухчастотной компенсации температурной погрешности, что повысило точность измерений в реальных условиях эксплуатации.
3. Обеспечить автоматическое вычисление ключевого строительного параметра – плотности скелета грунта, что позволяет оперативно контролировать качество уплотнения земляного полотна.

Разработанное устройство может быть рекомендовано для использования дорожно-строительными организациями для экспресс-контроля качества грунтов, что позволит сократить время строительства и повысить надежность дорожных покрытий. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение базы калибровочных данных для различных типов грунтов и оптимизацию энергопотребления прибора.

### Список литературы

1. Федоров С. А. Разуплотнение глинистых грунтов в результате увлажнения // Инженерный вестник Дона. 2023. № 6 (102). С. 326–333. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54206674> (дата обращения: 24.02.2026).

2. 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 // Строительные и дорожные машины. 2023. № 4. С. 34–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60030528> (дата обращения: 24.02.2026).
3. Сазонова С. А., Пономарев А. Б. О некоторых результатах исследований насыпных грунтов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 2 (686). С. 109–116. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25910788> (дата обращения: 24.02.2026).
4. Duddu S. R., Chennarapu H. Quality control of compaction with lightweight deflectometer (LWD) device: a state-of-art // International Journal of Geo-Engineering. 2022. Vol. 13. Is. 1. P. 1–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=51495554> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.1186/s40703-021-00171-2.
5. Nguyen H. T., Lee Yu., Ahn Ja., Han T. H., Park Ju. K. A Low-Cost Lightweight Deflectometer with an Arduino-Based Signal Interpretation Kit to Evaluate Soil Modulus // Sensors. 2023. Vol. 23. Is. 24. P. 9710. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=64422350> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.3390/s23249710.
6. Duddu S. R., Kommanamanchi V., Chennarapu H., Balunaini U. Evaluating moduli of triaxial geogrid-stabilised sandy soil with lightweight deflectometer // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement. 2024. Vol. 177. Is. 1. P. 57–68. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61661309> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.1680/jgrim.22.00075.
7. Wang H., Qian J., Liu Ya., Zhang Ju. Evaluating Subgrade Compaction for Different Soils Using Nondestructive Lightweight Deflectometer // Journal of Materials in Civil Engineering. 2024. Vol. 36. Is. 5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=66168050> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.1061/jmcee7.mteng-16691.
8. Патент на полезную модель № 178608 U1 Российская Федерация, МПК G01N 15/08, G01N 33/24, A01G 25/00. Устройство для контроля увлажнения грунта: № 2017127588; заявл. 01.08.2017; опубл. 11.04.2018 / Гильдебрандт М. И., Грузин А. В., Иванов Р. Н.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет». URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38152403> (дата обращения: 24.02.2026).
9. Патент на полезную модель № 191283 U1 Российская Федерация, МПК G01N 33/24, G01N 27/22. Почвенный влагомер: № 2019114321; заявл. 07.05.2019; опубл. 01.08.2019 / Шушпанов И. А., Рыжко Н. Ф., Смирнов Е. С. заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Волжский научно-исследовательский институт гидро-техники и мелиорации» (ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39274491> (дата обращения: 24.02.2026).
10. Патент на полезную модель № 125344 U1 Российская Федерация, МПК G01N 27/02. Почвенный влагомер: № 2012138027/28; заявл. 06.09.2012; опубл. 27.02.2013 / Растегина Н. В., Пан В. В., Канникова К. В., Рыков С. В.; заявитель Государственное бюджетное образовательное учреждение города Москвы Средняя общеобразовательная школа № 929. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38412292> (дата обращения: 24.02.2026).
11. Аскеров К. А., Мардахаев А. В., Хидиров А. Ш. О диэлькометрическом методе измерения влажности почвы (TDR метод) // Вестник Азербайджанской инженерной академии. 2022. Т. 14. № 3. С. 104–122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49592254> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.52171/2076-0515\_2022\_14\_03\_104\_122.
12. Усманова Х. А., Тургунбаев А. Теоретические основы диэлькометрического метода измерения влажности // Приборы. 2017. № 8 (206). С. 34–40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29966400> (дата обращения: 24.02.2026).
13. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79712282> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-20-29.
14. Абдуллаязнов Э. Ю., Садыков М. Ф., Кочеткова А. А., Иванов Д. А., Галиева Т. Г., Голенищев-Кутузов А. В., Вассунова Ю. Ю. Экспериментальная установка для измерения влажности грунта диэлькометрическим методом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 7. С. 1–9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68489351> (дата обращения: 24.02.2026).
15. Егоров Ю. В., Кириченко А. В., Бобков А. В., Галицкий В. И. Использование диэлектрики на средних частотах для усредненной оценки влажности почвы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 206–212. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13725439> (дата обращения: 24.02.2026).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.