

The Dielcometric Method of Measurement of Soil Moisture (TDR method)

K.A. Asgarov¹, A.V. Mardakhayev¹, A.Sh. Khidirov²

¹ *Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerospace Agency of Azerbaijan
(S.S. Akhundov str. 1, Baku, AZ 1115, Azerbaijan)*

² *Azerbaijan State University of Oil and Industry (Azadlig ave. 16/21, Baku, AZ1010, Azerbaijan)*

For correspondence:

Mardaxayev Anatoliy / e-mail: mavica@yandex.ru

Abstract

Taking into account the fact that the TDR (Time Domain Reflectometry) - method is based on the technique of fault detection in cable lines, the article briefly describes the methodology of fault location in them, specifies the composition of the equipment, considers classical variants of TDR probe designs, gives the equations recommended for conducting the geometric coefficient analysis of probes, gives recommendations for probe design and their application. The calibration equations obtained by G. Topp in co-authorship and Maxwell De Loor for calculations for determination of soil moisture content are presented and recommendations for application of these equations are given. We consider it necessary to note that the recommendations stated in the article will serve as an informative guide to the technical aspects in conducting measurements of soil dielectric permittivity and volumetric water content using TDR equipment both for novice researchers and for experts.

Keywords: reflectometr, geometric coefficient, dielectric permittivity, volumetric water content, equations G. Topp coauthored and Maxwell De Loor.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122

Received 15.04.2022

Revised 16.09.2022

Accepted 23.09.2022

For citation:

Asgarov K.A., Mardakhayev A.V., Khidirov A.Sh.

[The dielcometric method of measurement of soil moisture (TDR method)]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 104-122 (in English)

Torpaqların rütubətliliyinin ölçülməsinin dielkometrik metodu (TDR metod)

K.Ə. Əsgərov¹, A.V. Mardaxayev¹, A.Ş. Xidirov²

¹ *MAKA-nın Elmi-Tədqiqat Aerokosmik İnformatika İnstitutu (S.S. Axundov küç. 1, Bakı, AZ 1115, Azərbaycan)*

² *Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Azadlıq pr. 16/21, Bakı, AZ1010, Azərbaycan)*

Yazışma üçün:

Mardaxayev Anatoliy / e-mail: mavica@yandex.ru

Xülasə

TDR metodunun, elektrik kabel xətlərində zədələnmiş yerlərin aşkar edilməsi metodikasına əsaslandığını nəzərə alaraq, məqalədə, onlarda zədələnmələrin axtarışı metodikası şərh edilmiş və avadanlıqların tərkibi göstərilmişdir. TDR zondlarının konstruksiyalarının klassik variantlarına baxılmış, zondların həndəsi əmsalının analizini aparmaq üçün tövsiyə edilən tənliklər təsvir edilmiş, zondların layihələndirilməsi və onların tətbiqinə aid tövsiyələr verilmişdir. Torpağın rütubətliliyinin təyininə hasablamların aparılması üçün G. Topp-un həmmüəllifləri və Maxwell De Loor-un təklif etdikləri kalibrəmə tənlikləri təqdim edilmiş və bu tənliklərin tətbiqinə aid tövsiyələr verilmişdir. Qeyd etməyi lazım bilir ki, məqalədə şərh edilmiş tövsiyələr, həm gənc tədqiqatçılara və həm də ekspertlərə, TDR avadanlığın köməyiylə torpağın dielektrik nüfuzluğunun və ondakı suyun həcmi miqdarının ölçmələrinin aparılmasının texniki aspektlərini əks etdirən informativ bir rəhbərlik kimi xidmət göstərə bilər.

Açar sözlər: reflektometr, həndəsi əmsal, dielektrik nüfuzluğu, suyun həcmi miqdarı, G. Topp-un həmmüəllifləri və Maxwell De Loor-un tənlikləri.

DOI: DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122

УДК 631.421

О диэлькометрическом методе измерения влажности почвы (TDR метод)

К.А. Аскеров¹, А.В. Мардахаев¹, А.Ш. Хидиров²

¹ *Научно Исследовательский Институт Аэрокосмической Информатики НАНА (ул. С.С. Ахундова 1, Баку, AZ 1115, Азербайджан)*

² *Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (пр. Азадлыг 16/21, г. Баку, AZ 1010, Азербайджан)*

Для переписки:

Мардахаев Анатолий / e-mail: mavica@yandex.ru

Аннотация

Учитывая то, что TDR метод основан на методике по обнаружению повреждений в кабельных линиях, в статье кратко изложена методика проведения работ по поиску в них повреждений, указан состав оборудования, Рассмотрены классические варианты конструкций зондов TDR, приведены уравнения, рекомендуемые для проведения анализа геометрического коэффициента зондов, даны рекомендации по конструированию зондов и их применению. Приведены калибровочные уравнения, полученные G. Топп в соавторстве и Maxwell De Loor для проведения расчётов по определению влажности почвы и даны рекомендации по применению этих уравнений. Считаем необходимым отметить, что рекомендации, изложенные в статье, послужат информативным руководством по техническим аспектам при проведении измерений диэлектрической проницаемости почвы и объёмного содержания воды с использованием TDR оборудования как для начинающих исследователей, так и для экспертов.

Ключевые слова: рефлектометр, геометрический коэффициент, диэлектрическая проницаемость, объёмное содержание воды, уравнения G. Топп в соавторстве и Maxwell De Loor.

Введение

Последние достижения в области спутниковых измерений влажности почвы играют важную роль в экологических приложениях, таких как метеорология, гидрология, сельское хозяйство, управление водными ресурсами и климатология. Тем не менее, для обеспечения проведения качественных измерений по-прежнему необходимо подтверждать данные спутникового дистанционного зондирования данными, полученными *in situ*.

Среди методов получения данных о влажности почвы *in situ*, привлекающих широкое внимание исследователей, можно назвать **рефлектометрию во временной области (Time-Domain Reflectometry - TDR)**, ставшую одним из наиболее используемых методов. Согласно названию, метод TDR основан на определении времени распространения электромагнитного (ЭМ) импульса вдоль датчика (зонда), проложенного в почве или другой измеряемой среде. ЭМ сигнал в виде ступенчатого напряжения, составляющего около 0,6 В [1], подается в линию электропередачи (зонд) от TDR-модуля, который затем измеряет время прохождения сигнала по линии электропередачи. Это время прохождения импульса напрямую связано со скоростью распространения сигнала в почве, когда длина линии электропередачи известна (длина зонда, расположенного в почве).

Цель работы – обобщить и изучить рекомендации, разработанные исследователями в процессе проведения исследований по измерению диэлектрической проницаемости почвы ϵ и объемного содержания в ней воды θ .

Методика проведения работ по обнаружению повреждений в кабельных линиях

Рефлектометрия во временной области – это быстрая, точная и безопасная технология с использованием кабельного тестера. В 30-х годах XX века указанный метод был разработан и применен для проведения работ по поиску повреждений в кабельных линиях, в том числе и для определения расстояния до места обрыва кабеля. Оборудование, используемое для тестирования кабеля, измеряет время между запуском ЭМ волн и обнаружением на графике точек расположения их отражений.

Генератор импульсов генерирует ЭМ волны, которые распространяются по коаксиальному кабелю. Их отражения синхронизируются с помощью сэмплера, смежного с генератором импульсов, а данные в виде сигнала TDR отображаются на осциллографе. Обычно генератор, сэмплер и осциллограф размещаются в одном приборе, называемом «**рефлектометр**», или «**кабельный тестер**». Последний термин используется электротехниками, как правило, при тестировании коаксиальных кабелей. Наиболее распространенными рефлектометрами, используемыми на сегодняшний день, являются модели 1502B и 1502C (цифровые модели) производства Tektronix из Бивертон, штат Орегон (рис.1). Указанные генераторы генерируют импульсы напряжения от 0 до 0,225 В за время нарастания < 200 нс.

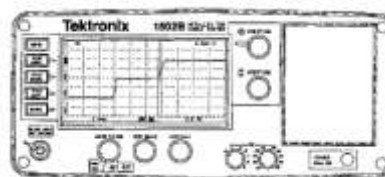


Рисунок 1 – Кабельный тестер (рефлектометр)
Figure 1 - Cable tester (reflectometer)

На рис. 2 приведена схема рефлектометра во временной области (TDR) и внутренние соединения между компонентами: генератор ступенчатых импульсов (step pulse generator), коаксиальный кабель (coaxial cable), сэмплер (sampler) и осциллограф (oscilloscope) или любой другой прибор для отображения и записи диаграммы [2].

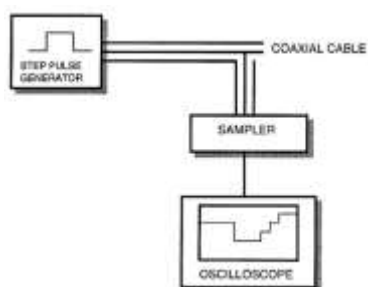


Рисунок 2 – Схема рефлектометра во временной области и внутренние соединения между компонентами [2]

Figure 2 - Time domain reflectometer diagram and internal connections between components [2]

Следует отметить, что ЭМ волна состоит из электрической и магнитной частей. Электрическая часть ЭМ волн состоит из синусоидальных волн, охватывающих большой частотный диапазон, и поэтому важно какие частоты вырабатывает генератор. Если синусоидальную волну наложить на гармонические синусоидальные волны, вырабатываемые генератором, в котором самая высокая частота стремится к бесконечности, то в результате будет получена идеальная периодическая прямоугольная волна. Это то, что происходит в генераторе ступенчатых импульсов, то есть электрические части ЭМ волн создают периодическую прямоугольную волну, называемую **шагом напряжения**. В действительности же, существует технически зависимый верхний предел для самой высокой частоты, который может быть получен генерато-

ром ступенчатых импульсов, и поэтому прямоугольные волны становятся приблизительно квадратными [2]. Для кабельных тестеров Tektronix 1502B или 1502C, наиболее часто используемых в почвоведении, амплитуда электрической части ЭМ волн (ступени напряжения) в зависимости от времени выглядит так (рис. 3) [2]:

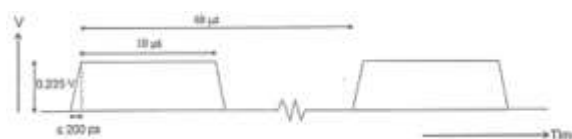


Рисунок 3 – Амплитуда электрической части ЭМ волн (ступеней напряжения), создаваемые Tektronix 1502B или 1502C, в зависимости от времени

Figure 3 - Amplitude of electric part of EM waves (voltage stages) created by Tektronix 1502V or 1502C, depending on time

Ступени напряжения, создаваемые Tektronix 1502B или 1502C, в зависимости от времени, производятся по следующей схеме (рис. 3): один шаг напряжения передается в течение периода 10 мкс, после чего возникает пауза в передаче, продолжающаяся 50 мкс. При этом требуется менее 200 нс, чтобы напряжение поднялось с 0 В до 0,225 В или упало с 0,225 В до 0 В. Это время, называемое временем нарастания ступеней напряжения, является функцией самой высокой частоты синусоидальных волн, которые создают ступени напряжения [2].

Генератор ступенчатых импульсов и сэмплер, соединённые между собой коаксиальным кабелем (рис. 2), также известным как антенный провод. Для справки: разработчиком коаксиального кабеля был С.А. Щелкунов (Sergey Alexander Schelkunoff, 1897-1992) – американский математик и теоретик электромагнетизма рус-

ского происхождения, внесший значительный вклад в теорию антенн.

Согласно ЭМ теории, «структура, предназначенная для направления волны по заданному пути, называется **волноводом**» [3]. Простейшим типом волновода является коаксиальная линия, изображённая на рис. 4. Проводники кабеля (рис. 4 (б)) состоят из сердечника, расположенного по оси, и коаксиально расположенной металлической цилиндрической трубки (экран). Для того чтобы кабель был гибким, экран обычно изготавливают из металлических плетёных нитей. Как правило, экран и сердечник разделены материалом, в качестве которого обычно применяют диэлектрик (полиэтилен), являющийся средой распространения ЭМ волн. Коаксиальная линия, используемая в рефлектометре Tektronix 1502В или 1502С, имеет характеристическое сопротивление $Z = 50 \text{ Ом}$ [2].

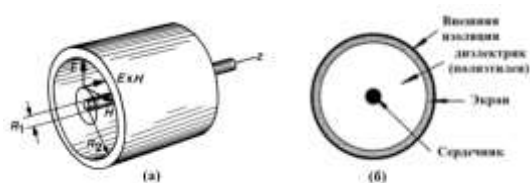


Рисунок 4 – Коаксиальная линия: (а) - предполагается, что волна распространяется в положительном направлении по оси Z ; E - напряженность электрического поля; H - напряженность магнитного поля; R_1 и R_2 - соответственно, радиусы сердечника (центральный проводник) и экрана (внешний проводник); (б) – сечение коаксиального кабеля [3].

Figure 4 - Coaxial line: (a) - it is assumed that the wave propagates in the positive direction along the axis; - electric field strength; - magnetic field strength; and - respectively, the radii of the core (price-minesweeper) and the screen (external conductor); (b) - section of coaxial cable [3].

Коаксиальные кабели можно использовать как с постоянным, так и с переменным током. За пределами линии существует нулевое электрическое поле. По причине

того, что по внешнему проводнику проходит тот же ток, что и по сердечнику, магнитное поле также равно нулю (рис. 5) [3].



Рисунок 5 – Коаксиальная линия: E - напряженность электрического поля; B - магнитная индукция; I - электрический ток

Figure 5 - Coaxial line: E - electric field strength; B - magnet-nation induction; I - electric current

Когда генератор начинает передавать ЭМ волны, то они, распространяясь в кольцевой области между двумя коаксиально расположенными проводниками, поступают в сэмплер. Необходимо отметить, что ЭМ волны в кабеле движутся с огромной скоростью. Так, если бы между проводником и экраном был вакуум, то ЭМ волны в кабеле распространялись бы со скоростью света: $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ (свет - это ЭМ волна, скорость распространения в вакууме которой постоянна) [3]. Так как диэлектрик, используемый в коаксиальном кабеле, представляет собой полиэтилен, то волны в нём распространяются со скоростью равной 66 % от скорости света [2]. Именно поэтому временной интервал между передачей волн и их обнаружением сэмплером весьма короткий.

Сэмплер обычно состоит из двух компонентов: высокоточного устройства синхронизации и высокоточного вольтметра. Когда ЭМ волны, запускаемые генератором, обнаруживаются сэмплером, то высокоточный вольтметр начинает измерять напряжение между экраном и сердечником коаксиального кабеля через определенный промежуток времени, получая таким обра-

зом набор данных, представляющих собой значение напряжения, как функцию во времени. Экран коаксиального кабеля соединен с Землей, и его электрический потенциал равен 0 В . ЭМ волны, создаваемые генератором ступенчатых импульсов, запускаются в коаксиальный кабель с падением напряжения между проводником и экраном и составляют всего несколько десятых долей Вольта.

Для проведения диагностики повреждённого кабеля к нему подключается кабельный тестер. Здесь необходимо отметить, что одной из важнейших характеристик тестируемого кабеля является его **волновое сопротивление (импеданс кабельной линии)**. Оценка данных, полученных кабельным тестером, основывается на следующих основных принципах: любое изменение импеданса в системе «кабельный тестер – тестируемый кабель» вызывает частичное или полное отражение импульса. Поэтому одно отражение будет находиться на интерфейсе «кабельный тестер – вход в тестируемый кабель», в котором диэлектрик изменён, по причине чего импеданс также будет изменён, в то время как второе отражение будет находиться в месте, где изменены электрические свойства тестируемого кабеля. Отраженные импульсы могут находиться или в фазе с падающим импульсом, что происходит в случае, когда ЭМ волны проходят увеличение импеданса, или в противофазе, когда происходит уменьшение импеданса. Осциллограф графически, в виде кривой, отображает на жидкокристаллическом дисплее изменения напряжения во времени, выявленные сэмплером. При необходимости данные в цифровом виде могут быть отправлены непосредственно на ПК и отображены

на его дисплее. Кривую, отображённую на дисплее осциллографа или ПК, называют **следом**. Считаем необходимым отметить, что осциллограф позволяет контролировать не только исходный импульс, но и отражения, возникающие от всех неоднородностей линии от её начала до конца. Если кабель исправен и его волновое сопротивление не меняется, то сигнал проходит по кабелю без отражений. Если имеет место обрыв, короткое замыкание или иная неоднородность, то сигнал отражается полностью или частично. Дело в том, что импульсный рефлектометр не отображает изменения сопротивления шлейфа или сопротивление изоляции. Фактически он обнаруживает и визуализирует наличие отражения от неоднородности волнового сопротивления, при этом по характеру отражения можно судить о его природе. Так, локальное увеличение индуктивной составляющей приводит к росту волнового сопротивления в этой точке и возникновению отклика положительной полярности, а увеличение ёмкостной составляющей приводит к уменьшению волнового сопротивления в точке отражения и, соответственно, к образованию отклика отрицательной полярности. В точке, где имеет место обрыв кабеля ($R = \infty$), коэффициент отражения $K = 1$, т.е. имеем полное отражение в виде импульса положительной полярности. В точке короткого замыкания ($G = \infty$) $K = -1$, т.е. возникает такое же отражение, только в виде импульса противоположной полярности (G – межпроводная проводимость). Что же касается амплитуд импульсов, то они зависят не только от коэффициента отражения, но и от ослабления исходного импульса в кабеле на длине равной расстоянию от источника импульсов до точки отражения и обратно [4].

Решение задачи

Как отмечено в работе [5], если бы кто-то пожелал определить влажность почвы, то он использовал бы коаксиальный кабель аналогично тому, как это происходит при тестировании кабельных линий. Для этого он загрузил бы образец почвы в коаксиальный кабель и направил в него импульс напряжения. Когда импульс достиг бы образца почвы (до точки, от которой начинает располагаться почва, импульс проходит по воздуху), то часть импульса была бы отражена, а остальная часть импульса продолжала бы двигаться дальше. Или, если бы в кабеле имел место обрыв, то в точке обрыва кабеля импульс прекратил бы своё движение и отразился с задержкой или интенсивностью, в зависимости от свойств почвы.

Диэлькометрический метод измерения влажности почвы

Конечно же, размещать образец почвы в коаксиальном кабеле для определения влажности почвы нецелесообразно. Поэтому, используя аналогичные принципы с целью определения влажности почвы, нам необходимо в первую очередь иметь оборудование TDR (рис. 6) [5].

Сюда входит генератор импульсов напряжения; пробоотборник, который принимает как входящий, так и отражённый от почвы импульсы; сэмплер - приёмно-передающий прибор, обеспечивающий совместно с устройством синхронизации обработку и передачу на дисплей исходящих от генератора и отражённых импульсов, в том числе и от почвы, в которую внедрён зонд; дисплей, служащий для визуализации и отображения данных, показывающих время прохождения генерируемой

кабельным тестером TDR ЭМ волн по проводнику известной длины (зонду), а также величину напряжения в течение всего процесса исследования (необходимо отметить, что коммерческие кабельные тестеры Tektronix 1502 отображают кажущуюся длину, а не время). Кабельный тестер TDR посылает прямоугольные импульсы напряжения в зонд с высокой частотой (в диапазоне гигагерц) и сохраняет на экране их суперпозиции так, что наблюдается единственная «форма», тогда как на самом деле это результат наложения многих форм [5].

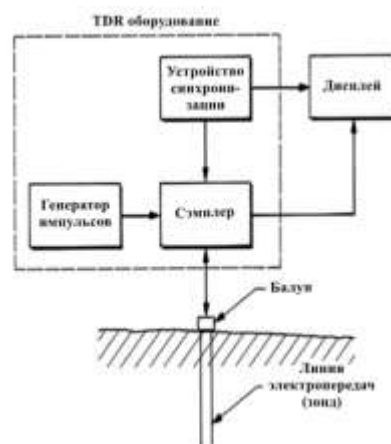


Рисунок 6 – Блок-схема TDR оборудования для измерения влажности почвы [5]

Figure 6 - TDR block diagram of soil moisture measurement equipment [5]

Во-вторых, необходимы стержни, называемые **зондом** (рис. 6). TDR зонд для измерения влажности почвы фактически является линией электропередачи, диэлектрической средой для которой служит почва, куда внедрён этот зонд. TDR зонды (датчики) могут иметь различные конфигурации, в зависимости от того, где они будут применены: в лабораторных или в полевых условиях.

Коаксиальный тип зондов используется в лабораторных условиях для исследовательских целей. В полевых условиях ча-

ще всего применяют многостержневые зонды (в основном двух- и трёхстержневые) – это параллельные линии электропередач, которые погружаются в почву на необходимую глубину. Расстояние между стержнями и их геометрия (цилиндрические или из параллельных пластин) могут быть различны. Некоторые классические варианты конструкций зондов представлены на рис. 7.

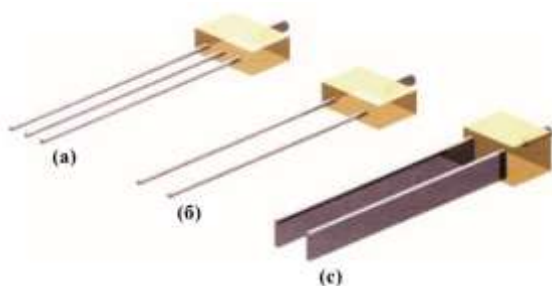


Рисунок 7 – Классические варианты конструкций зондов TDR: (а) – трехстержневой зонд; (б) – двухстержневой зонд; (с) – двухстержневой зонд, в котором в качестве стержней используются параллельно расположенные пластины [6]

Figure 7 - Classic versions of TDR probe design: (a) - three-rod probe; (b) - two-rod probe; (c) - a two-rod probe, in which parallel plates are used as rods [6]

Учитывая то, что метод рефлектометрии во временной области, предназначенный для измерения объёмного содержания воды в почве, весьма чувствителен к конструкции зонда и эффектам, происходящим при его расположении в почве, при проектировании зондов необходимо, чтобы конструкция зонда была прочной и практичной, обеспечивающей в процессе проведения измерений получение достоверных данных о состоянии почвы при минимальном воздействии электропроводности почвы на стержни [6].

Влияние электропроводности почвы на измерения рефлектометром зависят от

геометрических параметров стержней зонда. При этом обнаружено, что в основном затухания происходят при использовании зондов с длинными, близко расположенными стержнями. В связи с этим необходимо учитывать следующие факторы:

а) увеличенное расстояние между стержнями обеспечит лёгкость введения зонда в почву, появится возможность увеличить жёсткость стержней за счёт увеличения площади их поперечного сечения, однако это может привести к тому, что вокруг поверхностей стержней почва будет изменять свою структуру (становиться более плотной), и поэтому простое вдавливание зонда в почву повлечет за собой значительное снижение измеренного содержания воды по сравнению с ненарушенными участками почвы;

б) для зондов с короткими стержнями сжатие вокруг них будет минимальным, что указывает на более благоприятную взаимосвязь между объемом выборки и компрессией [6].

Авторами исследования [7] было показано, что эффект сжатия почвы вокруг стержней может быть сведен к минимуму, если применить бур или какое-либо другое устройство для удаления почвы в точках, где будет установлен зонд. Как отмечено в [6], факторы «а» и «б» не являются взаимодополняющими, и поэтому в процессе проектирования и изготовления зондов могут быть допущены некоторые компромиссы. Для справки: электропроводность почвы показывает, насколько хорошо почва способна проводить электрический ток. Мелкие заряженные частицы, присутствующие в почве, называемые ионами, помогают переносить электрический заряд через вещество. Эти ионы могут быть заряжены поло-

жительно или отрицательно. Чем больше ионов, тем выше проводимость; меньшее количество ионов приведет к снижению проводимости. Электропроводность обычно измеряется в миллисименсах на сантиметр.

Таким образом, можно заключить, что влияние электропроводности на измерения TDR методом зависит от геометрических параметров стержней зонда, а именно, от **константы зонда**. Следует отметить, что **константа зонда** – это, по существу, **геометрический коэффициент $g(m)$** , значения для которого в приближении могут быть аппроксимированы с учётом базовой геометрии стержня – его длины l . Эта аппроксимация основана на таких принципах, как *две бесконечные параллельные пластины, два бесконечных параллельных стержня и бесконечная коаксиальная линия* [6].

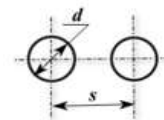
Как отмечено в [6], наибольшая погрешность между измеренными геометрическими параметрами и рассчитанными константами зонда возникает при работе с параллельными пластинами, так как краевой эффект является существенным, если учитывать, что рассматриваемые пластины имеют конечные размеры. Для бесконечно длинных пластин, когда $l \rightarrow \infty$ и $h/s \rightarrow \infty$, уравнение (1) является точным, а для случая, когда $h/s \rightarrow 0$, R.P. Feynman в соавторстве [8] для геометрического коэффициента g предложили аппроксимацию, согласно которой желательно принять площадь пластины зонда, которая получилась бы, если бы пластины были искусственно расставлены на расстояние, равное $3/8$ от расстояния между пластинами.

- Бесконечные параллельные пластины (м):



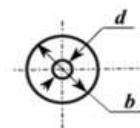
$$g = \frac{lh}{s} \quad (1)$$

- Двухстержневые (м):



$$g = \frac{12,1l}{\ln \left(\frac{s}{d} + \sqrt{\left(\frac{s}{d} \right)^2 - 1} \right)} \quad (2)$$

- Коаксиальная линия (м):



$$g = \frac{2\pi \cdot l}{\ln \left(\frac{b}{d} \right)} \quad (3)$$

Здесь необходимо отметить, что все три уравнения (1)-(3) не могут быть использованы для расчёта геометрических коэффициентов, т. к. параметры зондов (и двухстержневого, и коаксиального) не предполагают конечных эффектов, но они, конечно же, существуют для зондов TDR и могут быть использованы для более коротких стержней [6]. Эти уравнения не должны применяться для расчётов геометрических коэффициентов, но, тем не менее, могут быть весьма полезны при проведении анализа геометрических коэффициентов.

Важным следствием описанного метода по определению параметров TDR зондов является то, что исследователь, анализируя принятые параметры стержней, может увидеть эффект от увеличения или уменьшения длины стержней или расстояния между ними. Так, уменьшение длины стержней приводит к уменьшению геометрического коэффициента g , делая стержни менее восприимчивыми к помехам на электропроводность. Наряду с этим уменьшение длины стержней сокращает время прохождения ЭМ сигнала, что, в свою очередь, снижает точность измерения диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

D.A. Robinson в соавторстве отмечают, что для проведения качественных измерений в полевых условиях, с целью обеспечения компромисса между временем прохождения ЭМ сигнала, точностью измерения диэлектрической проницаемости и электропроводностью, а также с целью создания удобства для введения стержней зонда в почву предлагается применять в основном зонды с длиной стержней от 0,15 до 0,30 м. Согласно информации, изложенной в работе [5], *M.B. Kirkham* отмечал: «...обычно, на практике, применяют зонды с длиной стержней от 100 мм до 1 м. Самая короткая глубина, которую я встречал в публикациях, составляла 50 мм. Зонды со стержнями длиной менее 50 мм не дают хороших следов».

Не менее интересным является эффект расстояния между стержнями: так, чем дальше друг от друга расположены стержни, тем меньше становится геометрический фактор. При этом увеличение расстояния между стержнями приведёт к тому, что при погружении зонда в почву почва

вокруг поверхностей стержней, уплотняясь, будет изменять свою структуру, влияя тем самым на измерение её диэлектрической проницаемости.

Приведённый анализ показал, что то, что благотворно влияет на снижение воздействия на электропроводность, является вредным для измерения содержания воды в почве.

Что касается длины стержней зонда, необходимо принять к сведению, что зонды длиной менее 0,1 м не обеспечивают возможность получения хороших следов. Зонды длиной более 0,3 м при введении в почву могут сильно изгибаться, отклоняясь от вертикали, при этом внедрение их на большую глубину требуют применения больших физических усилий.

Работая с короткими зондами (за исключением самых твёрдых почв), исследователь, погружая их в почву вручную, проводит необходимые измерения и переходит к следующему участку. Получив большое количество результатов, исследователь может быстро оценить изменчивость влажности почвы на исследуемом участке. При использовании более длинных зондов (до 1 м), чаще всего с помощью специальных технологических устройств, приходится подготавливать для них скважину. После установки длинных зондов скважина заполняется почвой и уплотняется (притоптывается), чтобы избежать образования воздушных промежутков между почвой и поверхностью стержней. Иногда, после того как более длинные зонды установлены и с их помощью проведены необходимые измерения, зонды не извлекают, оставляя их на месте для повторных измерений с установленными на коаксиальном разъёме колпачками [5].

Если зонды двухстержневые, то необходимо использовать **балун** (рис. 8), который является согласующим трансформатором импеданса (сопротивления) между TDR тестером и зондом. Объясняется это тем, что для обвязки компонентов внутри кабельного TDR тестера и на выходе из него используется коаксиальный кабель с характеристическим сопротивлением $Z = 50 \text{ Ом}$. Поэтому для получения «сбалансированной линии» между кабельным тестером и зондом коаксиальный кабель TDR тестера подключают к балуну и через него, используя экранированный телевизионный кабель $Z = 185 \text{ Ом}$, подключаются к зонду [5].



Рисунок 8 – Основные компоненты, применяемые для определения влажности почвы TDR методом с помощью двухстержневого зонда [10]

Figure 8 - Main components used to determine soil moisture TDR by two-rod probe [10]

Если используются трёхстержневые зонды, то, благодаря тому, что они самостоятельно моделируют коаксиальную линию, отпадает необходимость применения балуна [5].

Что касается определения содержания влаги в почве, то оно основано на уникальных свойствах молекулы воды. Дело в том,

что диэлектрическая проницаемость воды при 20°C , равна приблизительно 80,4, в то время как большинство сухих твёрдых компонентов почвы имеют диэлектрические постоянные в диапазоне 2 – 7, а у воздуха диэлектрическая постоянная фактически равна 1 ($\epsilon_{\text{возд.}} = 1,00059$) [5]. Учитывая такое большое отличие между показателями диэлектрической проницаемости воды, сухих компонентов почвы и воздуха, становится ясным, что диэлектрическая проницаемость почвы является весьма хорошим показателем для измерения объёмного содержания воды в почве.

Следует отметить, что почва, расположенная между стержнями зонда и вокруг них, является диэлектриком, окружающим линию электропередачи (стержни зонда), т. е. фактически является волноводом [3]. Именно этот факт и позволяет применить кабельный тестер для вычисления объёмной диэлектрической проницаемости почвы (термины диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость являются синонимами).

Учитывая изложенное, для реализации измерительного процесса по определению влажности почвы с помощью рефлектометрии во временной области, подключают TDR модуль к зонду, расположенному в почве, при этом генератор ступенчатых импульсов запускает по коаксиальному кабелю непосредственно в TDR зонд ЭМ волны в диапазоне частот $1 \text{ МГц} - 1 \text{ ГГц}$ [5]. Как только этот сигнал достигает начала зонда, из-за несоответствия импеданса между кабелем и почвенным зондом часть сигнала, отражаясь, возвращается обратно в TDR устройство. Оставшаяся часть сигнала доходит до конца зонда, после чего происходит ещё одно отражение сигнала. Эти два

отражения приводят к двум разрывам в результирующем сигнале, которые обнаруживаются сэмплером и отображаются на дисплее рефлектометра и, при необходимости, на экране ПК. Разница во времени между этими двумя разрывами представляет собой время t , которое необходимо импульсу для прохождения пути в два раза превышающему длину зонда l , расположенного в почве. Здесь необходимо отметить, что доля импульса, рассеиваемая в почве, связана с её электропроводностью, а время прохождения импульса вдоль зонда зависит от содержания влаги в почве.

На основании анализа времени прохождения ЭМ волны вдоль всей длины зонда можно рассчитать объемную относительную диэлектрическую проницаемость почвы ε , по результатам которой определить объемное содержание в ней влаги θ .

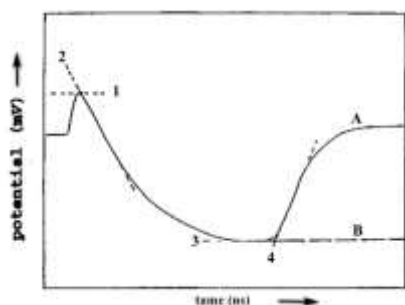


Рисунок 9 – След формы ЭМ волны с экрана TDR тестера с касательными к кривой, построенной для определения расстояния, пройденного импульсами, исходящими от генератора и отражёнными, в том числе и от почвы, в которую внедрён зонд [2]

Figure 9 - Trace of the EM wave shape from the tester TDR screen with tangents to the curve built to determine the distance traveled by pulses emanating from the generator and reflected, including from the soil into which the probe is embedded [2]

Для выполнения необходимых расчётов следует иметь информацию, полученную в процессе проведения TDR измерения, состоящую из выходной кривой (след

формы ЭМ волны TDR), изображённой на экране осциллографа TDR тестера или ПК. След формы ЭМ волны (рис. 9) может быть проанализирован непосредственно с экрана TDR тестера, или с распечатанного и сохранённого для последующего анализа документа, или с использованием соответствующей информации, хранящейся в ПК [1]. Точки отражения определяются с помощью касательных, прорисованных к кривой (рис. 9), в т. ч. в точке 1 – в точке пересечения касательных к кривой с горизонтальной линией, характеризующей максимальное отражение; в точке 2 – в точке перегиба кривой, следующей за максимумом; в точке 3 – в точке пересечения горизонтальной линии с точкой отражения минимума; в точке 4 – в точке перегиба кривой, следующей после минимума. Пересечение точек 1 и 2 идентифицирует отражение, происходящее перед входом ЭМ волны в зонд (начальное отражение), а пересечение в точках 3 и 4 идентифицирует отражение волны от конца зонда (конечное отражение). Расстояние между точками 1 и 4 определяется по шкале, изображённой на экране осциллографа TDR-тестера.

Для каждого измерения кабельный тестер TDR 1502B или 1502C можно «обнулить» при визуализации начального отражения, происшедшего перед входом ЭМ волны в зонд, после чего переместить циферблат в положение, когда волна отразится от конца зонда, что обеспечит прямое считывание с экрана осциллографа расстояния, пройденного импульсом.

На отображение сигнала также влияет настройка на кабельном тестере параметра V_p , устанавливаемого на приборе перед началом проведения измерений (V_p - постоянная скорости распространения им-

пульса, зависящая от типа кабеля, используемого в процессе проведения измерения; V_p выбирается оператором из перечня, указанного на панели кабельного тестера). Для 50 Ом кабелей $V_p = 0,66$. Это значение должно быть включено в формулу при расчете времени пробега импульсом за весь путь, считанный с экрана осциллографа. Для определения диэлектрической проницаемости выполняют определенные расчеты [1].

Время в пути рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{L_s}{V_p \cdot c} \quad (4)$$

здесь t - время пробега ЭМ волны за весь путь (s); L_s - расстояние, пройденное импульсом, считанное с экрана кабельного тестера (m); V_p - постоянная скорости распространения импульса, зависящая от типа кабеля, используемого в процессе проведения измерения, выбирается оператором из перечня, указанного на панели кабельного тестера; c - скорость света в свободном пространстве ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).

Скорость распространения импульса вычисляется по формуле:

$$V_s = \frac{L_p}{t} \quad (5)$$

здесь V_s - скорость распространения импульса (m/c); L_p - длина стержней зонда, введенного в почву (m).

Диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \left(\frac{c}{V_s} \right)^2 \quad (6)$$

или

$$\varepsilon = \left(\frac{ct}{L_p} \right)^2 \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (7)$$

Как отмечено в работе [1], для оригинального кабельного тестера Tektronix 1502 не был предусмотрен V_p для оператора в качестве опции, и поэтому при проведении расчетов исследователи принимали $V_p = 1$. В этой же работе отмечено, что авторами работы [9] для определения ε была применена формула: $\varepsilon = \left(\frac{ct}{2L_p} \right)^2$, а t

задается как $t = \frac{2L_s}{V_p \cdot c}$. В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [10], в случае, когда $V_p = 0,66$, расчет должен быть выполнен, как предлагалось выше, с использованием L_p , а не $2L_p$.

В 1980 году, исследуя четыре типа минеральных почв с различной текстурой, от песчаного суглинка до глины (табл. 1), G. Topp - J. Davis - A. Annan [11] предположили, что для большого количества разнообразных почв и почв подобных материалов существует уникальная связь между кажущейся относительной диэлектрической проницаемостью ε и объемным содержанием воды θ , «которая не зависит от типа почвы, плотности почвы, температуры почвы и содержания растворимой соли».

На основании проведенных экспериментов G. Topp в соавторстве [11] предложил эмпирическое калибровочное уравнение, выражающее зависимость между диэлектрической проницаемостью ε и объемным содержанием воды θ , которое, по их мнению, может быть применено для большинства типов почв:

Таблица 1 – Тип почвы, гранулометрический состав и процентное содержание органического материала в четырех минеральных почвах, исследованных Г. Топп в соавторстве [11]

Table 1 - Soil type, grain size distribution and percentage of organic material in four mineral soils, co-authored by G. Topp [11]

Soil type, depth in centimeters	Percentage of clay, <0.002 mm	Percentage of silt, 0.002-0.05 mm	Percentage of sand, 0.05-2.0 mm	Percentage of organic material	Textural class
Rubicon (0-20 cm)	9	26	65	3	sandy loam
Bainsville (0-20 cm)	34	36	30	6	clay loam
Bainsville (40-50 cm)	36	42	22	1	clay loam
Bainsville (90-110 cm)	66	31	3	0	heavy clay

(soil type, depth in centimeters – тип почвы, глубина в см; percentage of clay – процентное содержание глины; percentage of silt – процентное содержание ила; percentage of sand – процентное содержание песка; percentage of organic material – процентное содержание органического материала; textural class - текстурный класс; sandy loam – супесь; clay loam – суглинок; heavy clay – тяжёлая глина)

$$\varepsilon = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3$$

или

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (8)$$

Здесь необходимо отметить, что анализ эмпирического калибровочного уравнения (5), выполненный другими исследователями, показал как положительные [12], так и отрицательные [13] результаты, свидетельствующие о том, что не для всех типов почв может быть использовано это уравнение.

Авторы работы [13] отмечали: «Наша цель состояла в том, чтобы получить единую зависимость, пригодную для калибровки, включающую только свойства почвы или параметры, которые общеизвестны или могут быть легко оценены с достаточной точностью. Более ранние попытки моделирования соотношения $\varepsilon(\theta)$ предполагали наличие четырехкомпонентных систем твердой фазы, воздуха, свободной воды и связанной воды, в которых связанная вода имеет меньшее значение ε , чем свободная

вода из-за ее близости к активным коллоидным поверхностям».

Для подобных моделей смешивания имеются два основных подхода: **теоретическая (Maxwell De Loor) и эмпирическая модели смешивания** для четырех компонентов: твердой фазы (S), плотно связанной воды (bw), свободной воды и воздуха.

1. Теоретическая модель, основанная на уравнении Maxwell De Loor описывает однородную смесь одного или нескольких веществ случайно распределенных в среде с различной ε [14, 15]. Основное уравнение этой модели было переписано М.С. Dobson в соавторстве [16] для четырехкомпонентной системы с пластинчатыми частицами почвы в качестве основной среды. Это уравнение имеет вид:

$$\varepsilon = \frac{3\varepsilon_s + 2(\theta - \theta_{bw})(\varepsilon_{fw} - \varepsilon_s) + 2\theta_{bw}(\varepsilon_{bw} - \varepsilon_s) + 2(\phi - \theta)(\varepsilon_a - \varepsilon_s)}{3 + (\theta - \theta_{bw})(\varepsilon_s/\varepsilon_{fw} - 1) + \theta_{bw}(\varepsilon_s/\varepsilon_{bw} - 1) + (\phi - \theta)(\varepsilon_s/\varepsilon_a - 1)} \quad (9)$$

здесь ϕ - пористость, а индексы bw , fw , a и s , соответственно, относятся к связанной воде, свободной воде, воздуху и твердой фазе.

2. Эмпирическая модель, предложенная J.R. Birchak в соавторстве [17], имеет вид:

$$\varepsilon^\alpha = (1-\phi) \cdot \varepsilon_s^\alpha + (\phi-\theta) \cdot \varepsilon_a^\alpha + (\theta-\theta_{bw}) \cdot \varepsilon_{fw}^\alpha + \theta_{bw} \cdot \varepsilon_{bw}^\alpha \quad (10)$$

В этом уравнении параметр подгонки кривой α можно интерпретировать как меру геометрии среды по отношению к приложенному электрическому полю. Для двухфазных систем (электрическое поле параллельно слоистому слою почвы, электрическое поле перпендикулярно слоистому слою почвы), K. Roth в соавторстве [18] показали, что значение α находится в диапазоне $-1 < \alpha < +1$. Предполагая трёхфазную систему (без связанной воды) для различных почв, эти авторы установили среднее значение для α , равное $\alpha = 0,50$. Для четырёхфазных систем M.C. Dobson в соавторстве [16] установили, что среднее значение $\alpha = 0,65$.

Анализ эмпирической модели (уравнение (10)), проведённый авторами [13], показал, что, поскольку значение не известно и должно быть подобрано, модель не имеет преимуществ перед моделью Maxwell De Loor и поэтому не рассматривается.

Что касается теоретической модели, основанной на уравнении Maxwell De Loor, то необходимо отметить, что теоретическая модель (9) содержит только физические параметры, без дополнительных параметров подгонки.

Для подтверждения своих выводов исследователями было выполнено сравнение калибровочного уравнения (8) с теоретической моделью Maxwell De Loor (9).

С этой целью авторами [13] была проделана следующая работа.

Диэлектрическая проницаемость содержания воды измерялась гравиметрическим и TDR методами на упакованных колонках для 11 типов почв. C. Dirksen и S. Dasberg [13] сообщали: «...В нашей лаборатории были доступны четыре голландские почвы: Леесс Groesbeek (Типичный Hapludalf), Донная супесь долины Wichmond (Типичный Haplaquent), Речной илистый суглинок Munnikenland (Типичный Haplaquept) и морская илистая глина Y-Polder (Типичный Haplaquept). Четыре глинистые почвы нами были получены от Международного справочно-информационного центра почвы (ISRIC) в Wageningen: А и В горизонты Бразильских гуминовых Ferralsol (Типичный Acrortox), французская Средиземноморская красная почва (Типичный Rhodoxeralf) и кенийский pellic Vertisol (Типичный Pellustert).

Три чистых глинистых минерала были получены от кафедры почвоведения и питания растений Вагенингенского сельскохозяйственного университета: bentonite (smectite, from Osage, WY), illite (Grundite Co.) и attapulgite (источник неизвестен). Attapulgite, также называемый palygorskite, представляет собой глинистый минерал с высокой водопоглощающей способностью, редко встречающийся в почвах с волокнистой морфологией».

Измеренные C. Dirksen и S. Dasberg в процессе проведения исследований параметры почв и объемная доля мономолекулярного слоя прочно связанной воды приведены в таблице 2.

В числе исследованных рассматривались почвы от лёсса до чистого бентонита.

Таблица 2 – Измеренные параметры почв и объемная доля мономолекулярного слоя прочно связанной воды [13]

Table 2 - Measured soil parameters and volume fraction of monomolecular layer of strongly bound water [13]

Soil or pure mineral	Bulk density + (ρ_b) $g \cdot cm^{-3}$	Specific surface (S) $m^2 \cdot g^{-1}$	Bound water ** (θ_{bw})	Hygroscopic water $cm^3 \cdot cm^{-3}$	Wilting point §
Groesbeek	1,49	25	0,011	0,017	0,077
Wichmond	1,36	41	0,017	0,022	0,120
Ferralsol-A	1,14	61	0,021	0,025	0,260
Ferralsol-B	1,13	61	0,021	0,028	0,245
Munniken-land	1,13	79	0,027	0,035	0,177
Mediterranean	1,38	93	0,039	0,043	0,185
Y-Polder	1,08	107	0,035	0,040	0,200
Illite	1,30	147	0,057	0,050	0,290
Attapulgit	0,55	270	0,045	0,039	0,320
Vertisol	0,92	428	0,118	0,118	0,375
Bentonite	0,94	665	0,187	0,114	-

+ среднее количество цилиндрических сосудов (насадных колонок); ** мономолекулярный слой, $\theta_{bw} = \delta \cdot \rho_b \cdot S$; § усилие прижимной пластины, 1,5 МПа. (soil or pure mineral – почва или чистый минерал; bulk density – объемная плотность; specific surface – удельная поверхность; bound water – связанная вода; hygroscopic water – гигроскопическая вода; wilting point – точка увядания).

Таблица 3 – Состав почв, использованных в данном исследовании [13]

Table 3 - Composition of soils used in this study [13]

Soil	Clay	Silt	Sand	Organic matter	Clay minerals
Groesbeek	10	70	20	0,95	
Wichmond	14	31	55	4,3	smectite vermiculite
Ferralsol-A	63	26	11	0	gibbsite + kaolinite
Ferralsol-B	57	33	10	0	gibbsite + kaolinite
Munniken-land	40	56	3	5,0	illite + kaolinite
Mediterranean	40	34	27	0,4	illite + kaolinite
Y-Polder	45	42	13	4,6	illite + kaolinite
Vertisol	86	10	4	1,4	smectite

(soil - почва; clay – глина; silt – ил; sand – песок; organic matter – органическое вещество; clay minerals глинистые минералы)

Измеренные удельные поверхности (S) исследованных типов почв составляли от 25 до 665 m^2/g , а насыпная плотность ρ_b - от 0,55 до 1,49 g/cm^3 .

Для справки:

- лёсс (нем. *löss*) - осадочная горная порода, неслоистая, однородная известковистая, суглинисто-супесчаная, имеет светло-жёлтый или палевый цвет;
- бентонит назван по месторождению Бентон, (США) – природный глинистый мине-

рал, гидроалюмосиликат, обладает свойством разбухать при гидратации в 14-16 раз. Бентонит является биологически активным веществом.

Содержание глины, ила, песка и органического материала, а также основные типы глинистых материалов, определённые методом рентгеновской дифракции, приведены в таблице 3.

Все измерения повторялись дважды. Воздушно-сухой почвенный материал (при необходимости предварительно просеянный сквозь сито с ячейками до 2 мм) по-

этапно доводился до желаемой влажности с помощью устройства, включающего в себя распылитель воды. Каждый раз после тщательного перемешивания почвы и воды, при получении смеси с определённой влажностью, два предварительно взвешенных акриловых цилиндрических сосуда (диаметр сосуда - 50 мм, высота 125 мм) упаковывались до насыпной плотности таким образом, чтобы в каждом из них почва, по возможности, располагалась равномерно распределённой по всему объёму. Затем подготовленные образцы взвешивали и вычисляли соотношение массы почвы к объёму.

На следующем этапе, используя подготовленные образцы, проводили измерения влажности почв TDR методом. TDR измерения выполнялись с помощью кабельного тестера TDR (модель 1502B) с первичным диапазоном частот от 10 МГц до 1 ГГц. Для всех измерений влажности почв использовался один и тот же трёх-стержневой зонд (длина – 100 мм, диаметр стержней – 2 мм, расстояние между стержнями – 10 мм), напрямую подключённый к кабельному тестеру посредством коаксиального кабеля длиной 3,5 м, с характеристическим сопротивлением 50 Ом. Форма сигнала, полученная в процессе проведения измерений с помощью кабельного тестера, передавалась и сохранялась на IBM, совместимом с ПК для последующего извлечения и анализа в соответствии с программой [19]. После выполненных TDR измерений грунт удаляли из акриловых цилиндрических сосудов, отбирая при этом пробы для гравиметрического определения содержания в них воды, по результатам которых рассчитывали объемное содержание воды θ , на основе средней насыпной плотности

упакованных цилиндров ρ_b . Эти измерения повторялись 8-12 раз для каждой почвы, что позволяло измерить θ с точностью от 0,02 до 0,03 $\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$.

Закключение

Проведённые в процессе исследований измерения показали, что эмпирическое калибровочное уравнение (8), выведенное G. Торр в соавторстве, оказалось точным только для четырёх типов почв, у которых $\rho_b > 1,30 \text{ г/см}^3$, включая иллит ($S = 147 \text{ м}^2/\text{г}$). Что касается почв, у которых $\rho_b < 1,30 \text{ г/см}^3$, то для них справедлива теоретическая модель, основанная на уравнении Maxwell De Loor, описывающая однородную смесь одного или нескольких веществ, распределённых случайным образом в среде с различными ε . Уравнение Maxwell De Loor (9) показало точность для семи типов почв, у которых $\rho_b < 1,30 \text{ г/см}^3$, включая аттапульгит ($\rho_b = 0,55 \text{ г/см}^3$, $S = 270 \text{ м}^2/\text{г}$), предполагая наличие мономолекулярного плотно связанного слоя воды (толщина слоя $\rho_b = 0,55 \text{ г/см}^3$, $S = 270 \text{ м}^2/\text{г}$, $\varepsilon_{bw} = 3,2$ и $\varepsilon_s = 5,0$). Точность, полученная для семи типов почв с помощью уравнения Maxwell De Loor (9), оказалась аналогичной точности, полученной G. Торр в соавторстве. Кривая $\varepsilon(\theta)$ для этих почв имела такую же форму, как и для почв, исследованных G. Торр в соавторстве. Объясняется это тем, что отклонения от результатов, полученных G. Торр в соавторстве с помощью уравнения (8), как правило, происходят в большей степени по причине более низкой насыпной плотности ρ_b и, соответственно, более высокой объёмной доли воздуха при

том же θ , связанном с мелкотекстурированной почвой по сравнению с плотно связанной водой с низким ε_s . Оба эти эффекта, а также очевидное аномальное поведение, такое как снижение эффективности диэлектрической проницаемости ε с увеличением ε_s могут быть учтены уравнением Maxwell De Loor (9), что делает уравнение лучше уравнения (8). Здесь необходимо отметить, что эмпирическая α модель

чувствительна к непредсказуемому значению α и не может учитывать аномальные значения. Как отмечали С. Dirksen и S. Dasberg, при исследовании отдельных типов почв может потребоваться проведение калибровки и решение о возможности использования эмпирической зависимости (8) к конкретному типу почвы, и каждый исследователь должен будет принимать решение самостоятельно.

REFERENCES

1. **Slik P.C.** Time Domain Reflectometry for measuring bulk soil electrical conductivity and comparison with the EM38 instrument // RAPPORT 35. Vakgroep Waterhuishouding Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen. 65p. 1993 (*in English*)
2. **Nissen H.H., Moldrup P.** Theoretical background for the TDR methodology // Proc. of the Symposium: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science, 16 September 1994, Tjele, Denmark. SP Report, vol. 3, no. 11, p.9-23, 1995 (*in English*)
3. **Lorrain P., Corson D.R.** Electromagnetism: principles and applications // W. H. Freeman and Company. San Francisco. 1979. P. 508 (*in English*)
4. **Mitrofanov S.V., Pozdnyakov N.V.** Metodika opredeleniya povrezhdenij kabelnyh linij (*in English*)
[//http://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya](http://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/impulsnaya-reflektometriya)
5. **Kirkham M.B.** Principles of soil and plant water relations // Academic Press is an imprint of Elsevier. Second edition 2014. P. 599 (*in English*)
6. **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*)
7. **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 (*in English*)
8. **Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.** The Feynman lectures on physics. Mainly electromagnetism and matter. Vol. II. P. 566. Published by Addison-Wesley, Reading 2010 (*in English*)
9. **Dasberg S., Dalton F.N.** Time Domain Reflectometry Field Measurements of Soil Water Content and Electrical Conductivity // Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 49, iss. 2, pp 293-297, 1985 (*in English*)
10. **Bonnell R.B., Broughton R.S. and Enright P.** The measurement of soil moisture and bulk soil salinity using time domain reflectometry // Canadian Agricultural Engineering, vol. 33, pp 225-229, 1991 (*in English*)
11. **Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.** Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // Water Resour. Res., vol. 16, iss. 3, pp 574-582, 1980 (*in English*)
12. **Drungil C.E.C., Gish T.J., Abt K.** Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry // Am. Soc. of Agric. Engineers, vol. 32, iss. 1, pp 177-180, 1989 (*in English*)

13. **Dirksen C., Dasberg S.** Improved Calibration of Time Domain Reflectometry Soil Water Content Measurements // Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 57, iss. 3, pp 660-667, 1993 (*in English*)
14. De Loor **G.P.** Dielectric properties of heterogeneous mixtures // Appl. Sci. Res., B3, pp 479–482, 1964 (*in English*)
15. **De Loor G.P.**, 1990. The dielectric properties of wet soils. BCRS (Netherlands Remote Sensing Board) Report no. 90-13. TNO Physics and Electronics Laboratory, the Hague, the Netherlands (*in English*)
16. **Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., Elrayes M.A.** Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-23, no. 1, pp 35-46, 1985 (*in English*)
17. **Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., and Victor J.M.** High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // Proc. IEEE, vol. 62, iss. 1, pp 93-98, 1974 (*in English*)
18. **Roth K., Schulm R., Flüher H., Attinger W.** Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach // Water Resour. Res., vol. 26, iss. 10, pp 2267-2273, 1990 (*in English*)
19. **Heimovaara T.J., Bouten W.** A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents // Water Resour. Res., vol. 26, iss. 10, pp 2311-2316, 1990 (*in English*)

*К.А. Аскеров, А.В. Мардахаев, А.Ш. Хидиров выражают благодарность Фонду
Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики за финансовую поддержку
(Грант № EIF -MQM-ETS-2020-1(35)-08/04/1-M-04*