

УДК 620.171.33

Т.Д. Кочеткова, В.И. Суляев, Е.Ю. Коровин, В.А. Журавлёв

Мобильный прибор на основе нерегулярного микрополоскового резонатора для измерения влажности почв

Предлагается использовать мобильный прибор «Аквасенсор» на основе нерегулярного микрополоскового резонатора для измерения влажности почв. Приведены результаты тестовых измерений на модельном грунте – кварцевом песке. Чётко определяется переход воды в песке из связанного состояния в рыхлосвязанное и свободное. Получено хорошее согласие с измерениями других авторов.

Ключевые слова: влажность почв, связанная вода, нерегулярный микрополосковый резонатор.

Измерение влажности в многофазных дисперсных средах имеет богатую историю. Обширную нишу в этой области занимают радиофизические методы благодаря своей привлекательной простоте, мобильности, возможности дистанционного получения информации и неразрушающего контроля [1]. Несмотря на значительное количество разработанных конструкций, описанных в научных публикациях и защищенных патентами, разработка влагомеров не потеряла актуальности при производстве измерительной техники в настоящее время. Это связано, прежде всего, со сложностью объекта исследования. Незначительные вариации состава, температуры, размеров частиц или формы включений могут привести к большой погрешности или неоднозначности результатов, поэтому, как правило, всегда требуется калибровка для каждой разновидности измеряемого материала. В настоящей работе в целях измерения влажности почв был использован прибор контроля качества воды тепловых электростанций и природных водоисточников «Аквасенсор». Данный прибор разработан в Центре радиоизмерений Национального исследовательского Томского государственного университета и производится на одноименном предприятии при ТГУ ООО «Аквасенсор».

Принцип действия. Прибор представляет собой автодин, в частотозадающую цепь положительной обратной связи которого включён нерегулярный микрополосковый резонатор (НМПР) [2]. НМПР хорошо зарекомендовал себя при исследовании электрофизических характеристик воды и других полярных жидкостей [3–5]. Известно, что резонаторные сверхвысокочастотные методы отличаются высокой чувствительностью, малой инерционностью; удобной формой представления сигнала, а устройства на их основе миниатюрны, имеют малую массу, экономичны, что является необходимым для создания мобильной аппаратуры, позволяющей проводить исследования как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Резонатор расположен в выносном корпусе и является чувствительным элементом в данном приборе. При помещении датчика в исследуемую среду в резонаторе происходит потеря электромагнитной энергии вследствие поглощения её в веществе в процессе переполаризации либо за счёт возникновения наведённых токов, т.е. за счёт проводимости. При этом амплитуда выходного сигнала автодина уменьшается из-за частичного нарушения условия генерации. Все изменения амплитуды отслеживаются компьютером, записываются в память и отображаются на экране монитора, обеспечивая возможность визуального контроля в режиме реального времени. В состав прибора введен навигатор GPS, с помощью которого отмечаются на карте местности точки замеров воды или влажности почвы. Блок-схема прибора изображена на рис. 1.

Объект исследования. Объектом исследования, на который нацелена данная работа, являются гетерогенные среды, представляющие собой дисперсные смеси, состоящие из твердой фазы, воды и воздуха. В природе такими средами являются почвогрунты, электрофизические свойства которых необходимы

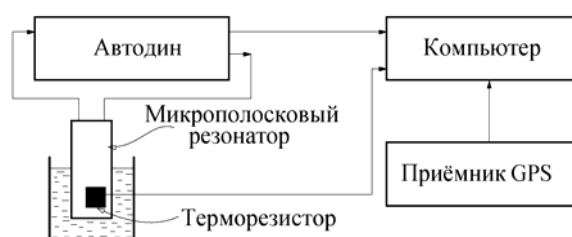


Рис. 1. Блок-схема прибора контроля качества воды

для достоверной расшифровки сигналов, получаемых при дистанционном зондировании поверхности Земли [6]. Информация об электрофизических характеристиках почв необходима для проведения электромелиорации, которая изменяет энергетическое состояние почвы [7]. Наиболее практически важную информацию дает изучение влажности, которая необходима для эффективного использования сельскохозяйственных угодий, проведения мелиоративных мероприятий; для выбора расположения радиорелейных станций. Влажность почвогрунтов исследуется геологами и биологами для получения новых знаний о строении поверхности Земли.

Методика эксперимента. Прибор фиксирует время измерений, уровень потерь в среде и температуру в среде. Все данные записываются в файл. Перед каждым измерением датчик прибора промывается этиловым спиртом и осушается сжатым воздухом. Сначала проводится запись показаний прибора на воздухе, затем датчик вертикально погружается в образец исследуемой среды и плотно прижимается к поверхности образца так, чтобы в рабочей зоне датчика грунт был плотным, без воздушных пустот. Записываются показания прибора, когда датчик контактирует с образцом. Затем датчик извлекается из среды, промывается водой, осушается спиртом и воздухом.

Было замечено, что от измерения к измерению датчик в исходном положении на воздухе даёт близкие, но неодинаковые показания. Это объясняется влиянием разнообразных трудновоспроизводимых внешних факторов, например: неодинаковый нагрев от руки оператора или неодинаковое охлаждение при промывании водой, случайное изменение напряжения питания прибора. Для исключения этих погрешностей в каждом эксперименте измеряемой величиной бралась разность показаний прибора с датчиком на воздухе и в исследуемой среде.

Приготовление образцов. Для апробации метода был выбран хорошо изученный кварцевый песок, который наилучшим образом подходит в качестве модельного материала. В реальной почве возможно изменение электромагнитных характеристик при циклическом процессе увлажнения – просушивания, необходимого для набора статистических данных, за счет гниения органики или выщелачивания. Кварцевый песок сохраняет свои свойства при любом количестве циклов.

Песок тщательно промывался дистиллированной водой и высушивался при комнатной температуре до достижения естественной влажности. Из подготовленного таким образом песка были сделаны образцы с различной влажностью. В пластиковую ёмкость (предварительно взвешенную) насыпалось такое количество песка, чтобы датчик можно было полностью погрузить в песок, не задевая дна и стенок ёмкости. Это составило около 70 мл. Ёмкость с песком взвешивалась на аналитических весах. Затем к песку добавлялось некоторое количество воды, ёмкость с влажным песком также взвешивалась. Ёмкость плотно закрывалась до начала измерений во избежание испарения влаги. Влажность песка находилась в весовых долях как отношение разности массы влажного и сухого песка к массе сухого песка. Для увлажнения песка использовалась вода с разной проводимостью, чтобы оценить влияние засоленности или загрязнения почвы на измерение её влажности.

Описание установки для измерения проводимости жидкости. Для контроля проводимости была собрана установка, блок-схема которой изображена на рис. 2. Измерительная ячейка представляет собой мерную стеклянную трубку с латунными электродами на концах. Один электрод герметично закрывает трубку снизу, а второй – верхний – остаётся подвижным, что позволяет устанавливать его на разных уровнях. Исследуемая жидкость наливается в трубку, электроды присоединяются к клеммам измерителя E7-8 и таким образом находится значение проводимости G столба жидкости известной длины L и площади поперечного сечения S . Удельная проводимость вычисляется по известной формуле $\sigma = GL/S$. Кроме того, к верхнему электроду прикреплен терморезистор, по сопротивлению которого можно определить температуру исследуемой жидкости. Значение сопротивления терморезистора измеряется тем же прибором E7-8.

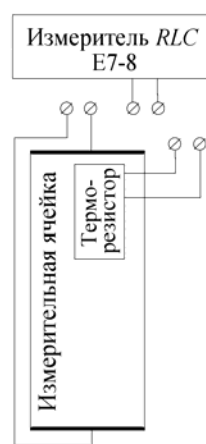


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения удельной проводимости

Обсуждение результатов. График зависимости относительного изменения показаний прибора от влажности приведён на рис. 3. Три линии относятся к различным значениям проводимости воды, использованной для увлажнения песка.

Концентрационная зависимость имеет область слабой чувствительности до значений влажности песка 0,1 весовой доли. Это согласуется с представлениями о том, что вода в малых концентрациях, до порога протекания, нахо-

дится в грунте в связанном состоянии, молекулы воды не ориентируются под действием электромагнитного поля, эффективная диэлектрическая проницаемость не получает дополнительного вклада от присутствия воды и определяется поляризационными способностями частиц кварцевого песка.

В связи с этим диэлектрическая проницаемость влажного песка составляет величину порядка 3–4 отн. ед. При таких значениях диэлектрической проницаемости, которая соответствует электронной поляризации, невелики и потери на переполяризацию на рабочей частоте микроволнового датчика. Именно поэтому отклик прибора при концентрациях воды до 0,1 меняется слабо. После того, как в грунте появляется «рыхлосвязанная» вода, молекулы которой более активно взаимодействуют с микроволновым излучением, потери растут. При появлении «свободной воды», способной протекать через субстрат, потери значительно возрастают, достигая максимального значения, соответствующего значению мнимой составляющей диэлектрической проницаемости воды на данной частоте при данной температуре. Возрастает при этом и электромагнитный отклик прибора. Именно эти переходы отражают изломы на концентрационных зависимостях, представленных на рис. 3.

Полученные нами результаты на кварцевом песке сравнивались с результатами, полученными другими исследователями. Результаты, полученные на природном песке в работе [6], подтверждают полученные нами закономерности. На дильковлажностных зависимостях почвы другого типа – хвойного опада [8] – определяется переход воды в рыхлосвязанное состояние при другой весовой влажности – 0,15. Различие значений порога можно объяснить разным составом почвы и, следовательно, разной степенью связанности воды.

Проведенное исследование с выбором воды, по-разному очищенной от проводящих примесей, показало, что при калибровке прибора следует учитывать проводимость воды, предваряя исследования влажности почвы измерением проводимости почвенной вытяжки для корректной интерпретации показаний прибора.

Заключение. Проведённые измерения показывают, что датчик на основе микрополоскового резонатора применим для измерения влажности почвы. Мобильность прибора позволяет использовать его в полевых условиях для оперативной оценки характеристик почв, например на учебной практике студентов-геологов и почвоведов.

Дополнение прибора измерителем изменения частоты автодина, которая неизбежно возникает за счет отличия действительной составляющей диэлектрической проницаемости влажного и сухого субстрата может устранить неопределенности (концентрация воды и проводимость), которая возникает при использовании измерения только амплитуды сигнала.

Работа выполнена при частичной поддержке проектами: АВЦП № 2.1.1/13220 «Разработка физических основ создания методов и средств терагерцовой диагностики фундаментальных характеристик материалов искусственного и природного происхождения»; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Литература

1. Микроволновая термовлагометрия / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, А.А. Воробьев, В.Н. Чернышов; под общ. ред. П.А. Федюнина. – М.: Машиностроение-1, 2004. – С. 6–8.
2. А.с. 1720032 СССР, G 01 R 27/26. Ячейка для измерения диэлектрической постоянной жидкости / Б.А. Беляев, В.А. Журавлев, В.В. Тюрнев, В.И. Кириченко, В.И. Сусяев (СССР). – № 4746169/09: заявл. 30.10.1989; опублик. 15.03.1992. Бюл. № 10. – 3 с.

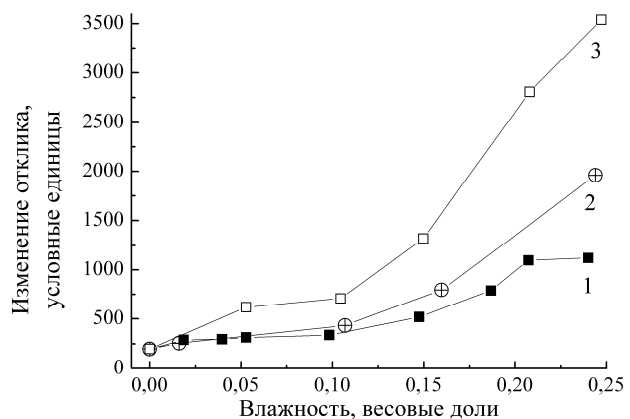


Рис. 3. Концентрационная зависимость относительного изменения отклика от песка, увлажненного: 1 – кипячёной водой, $\sigma = 32,18$ мкСм/мм; 2 – дистиллированной водой, $\sigma = 224,45$ нСм/мм; 3 – водопроводной водой, $\sigma = 67,41$ мкСм/мм

3. Сусяев В.И. Температурные зависимости спектров диэлектрической проницаемости водных смесей метилового спирта в области диэлектрической релаксации / В.И. Сусяев, Т.Д. Кочеткова // Вестник ТГУ. – 2003. – Т. 278, сентябрь. – С. 73–75.

4. Автоматизированная установка для исследования температурной зависимости спектров диэлектрической проницаемости полярных жидкостей в диапазоне 0,1–1,25 ГГц / В.И. Сусяев, В.А. Журавлев, Т.Д. Кочеткова, С.В. Судаков // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – №5. – С. 101–105.

5. Сусяев В.И. Радиофизический метод исследования и диагностики качества воды и водосодержащих веществ // Экологические, гуманитарные и спортивные аспекты подводной деятельности: матер. III Междунар. науч.-практ. конф.; под ред. В.И. Сусяева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 158–161.

6. Перфильева В.Д. Электрофизические свойства почв / В.Д. Перфильева, М.Г. Танзыбаев. – Томск: Изд-во ЦНТИ, 1998. – 186 с.

7. Комаров С.А. Микроволновое зондирование почв / С.А. Комаров, В.Л. Миронов. – Новосибирск: Научно-издательский центр СО РАН, 2000. – 289 с.

8. Савин И.В. Диэлектрические СВЧ-спектры талого хвойного опада / И.В. Савин, В.Л. Миронов // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9/3. – С. 251–254.

Кочеткова Татьяна Дмитриевна

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники

Национального исследовательского Томского государственного университета (НИТГУ)

Тел. 41-39-73

Эл. почта: tdk_tomsk@mail2000.ru

Сусяев Валентин Иванович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-89

Эл. почта: susl@mail.tsu.ru

Коровин Евгений Юрьевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-89

Эл. почта: korovin_ey@mail.tsu.ru

Журавлев Виктор Алексеевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиоэлектроники НИТГУ

Тел.: (382-2) 41-39-89

Эл. почта: ptica@mail.tsu.ru

Kotchetkova T.D., Suslyaev V.I., Korovin E.Yu., Zhuravlev V.A.

The mobile device on the basis of the irregular microstrip resonator for measurement of soil humidity

In the article we describe the usage of a mobile device «Aquasensor» based on the irregular microstrip resonator for measurement of soil humidity. There are given the results of test measurements on the modeling ground – quartz sand. The conversion of bound moisture in sand to free water is accurately defined. The results correspond to the results received by other scientists.

Keywords: soil humidity, bound moisture, irregular microstrip resonator.