



УДК 621.317.33; 551.208.7; 631.363.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРМОВЫХ ТРАВ

БЛОХИН Ю.И.,
аспирант,

АНАНЬЕВ И.П.,
ДОКТ. техн. наук,

ЗУБЕЦ В.С.,
канд. техн. наук

Агрофизический научно-исследовательский институт, Гражданский пр., 14,
Санкт-Петербург, 195220, Российская Федерация, e-mail: office@agrophys.ru

В технологиях производства кормов из зеленой массы скошенных трав контроль влажности играет важную роль в обеспечении высокого качества и снижении потерь заготавливаемых кормов. Основной метод полевого контроля влажности – диэлькометрия, обеспечивающая быстроту, приемлемую точность, простоту использования и невысокую стоимость средств измерений. Представили экспериментальную лабораторную установку для определения влажности трав на основе емкостного датчика и прецизионного измерителя импеданса Agilent 4294A в диапазоне частот электромагнитного поля 1-30 МГц. Обосновали выбор и исследовали параметры плоского кольцевого емкостного датчика. Определили необходимое уплотняющее давление на образцы трав при расчете их диэлектрических характеристик. Решили задачу пересчета измеряемых прецизионным измерителем импеданса параметров кабеля с подключенным емкостным датчиком в параметры тестируемого материала. Разработали методику подготовки влажных трав к измерениям. Установили геометрическую постоянную датчика в диапазоне используемых частот. Определили глубину проникновения электромагнитного поля датчика в тестируемый материал, задающую минимальную толщину исследуемого слоя материала под датчиком. Экспериментально исследовали зависимость диэлектрической проницаемости и электропроводности трав в выбранном диапазоне частот при различных влажностях и уплотняющих давлениях. По результатам исследований диэлектрических свойств трав в 2013-2014 гг. обосновали выбор рабочей частоты измерений в диапазоне 10-15 МГц и создаваемого прибором давления уплотнения 0,31-0,5 Н на 1 кв. см исследуемых трав.

Ключевые слова: кормовые травы, двухкомпонентная диэлькометрия, объемное влагосодержание, электропроводность, электромагнитное поле.

Для инструментального контроля влажности трав в технологиях производства кормов из зеленой массы необходимы полевые приборы с диапазоном измерения весовой влажности от 17-18% (сено) до 85% (свежескошенные травы) [1]. Отклонение от рекомендуемых требований к влажности приводит к потерям корма и снижению его качества, при этом потери питательных веществ составляют, по данным разных источников, от 10 до 25%. В кормовом балансе животноводства России на объемистые корма (сено, силос, сенаж) приходится более 60% [2].

В настоящее время на рынке приборов присутствуют полевые влагомеры ВЛК-01 и Wile 25/26 (с датчиком W253), в которых образцы трав необходимо помещать в измерительную камеру. Эти устройства не позволяют измерять влажность и электропроводность свежескошенных трав в валках и силоса при закладке. Поэтому разработка полевого

влагомера, обладающего такими функциями, стала актуальной задачей приборного обеспечения технологий заготовки кормов.

Цель исследования – разработка экспериментальной лабораторной установки с емкостным измерительным датчиком и исследование диэлектрических характеристик трав в широком диапазоне частот ЭМП (электромагнитного поля), влажностей и плотностей.

Материалы и методы. Экспериментальная установка основана на использовании планарного емкостного датчика, накладываемого сверху на исследуемый образец травы и прижимаемого к ней электродами с помощью груза, создающего уплотняющее давление. Геометрические параметры датчика выбраны совпадающими с параметрами датчика, который будет применен в полевом приборе. Он выполнен в виде дискового центрального электрода диаметром 80 мм и охватывающего его кон-

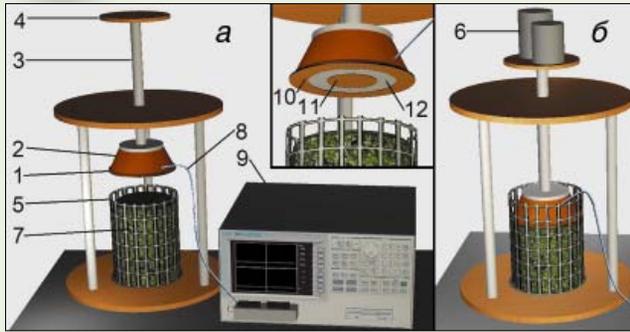


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования диэлектрических свойств трав: а – с поднятым уплотняющим поршнем; б – с опущенным уплотняющим поршнем: 1 – изолирующий диск с измерительными электродами емкостного датчика; 2 – уплотняющий поршень; 3 – осевой стержень; 4 – тарелка для уплотняющих грузов; 5 – цилиндрическая измерительная камера; 6 – уплотняющие грузы; 7 – тестируемый образец; 8 – соединительный кабель; 9 – прецизионный измеритель импеданса Agilent 4294A; 10 – кольцевой электрод емкостного датчика; 11 – центральный электрод датчика; 12 – изолирующее основание емкостного датчика

центрического кольцевого электрода внутренним диаметром 140 мм и наружным 200 мм (рис. 1). Датчик соединен коаксиальным кабелем с прецизионным измерителем импеданса Agilent 4294A [3]. Методы исследований диэлектрических характеристик трав включают: подготовку образцов трав для проведения измерений; измельчение проб; измерение массовой W и объемной θ влажностей при ступенчатом уменьшении влажности подсушиванием в сушильном шкафу – от максимальной полевой до воздушно-сухого состояния травы.

Основной метод диэлькометрии – измерение диэлектрических свойств материалов в частотной области (*frequency domain*), при котором на материал воздействуют гармоническим ЭМП, а диэлектрическую проницаемость определяют как комплексную величину:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

где действительный компонент ϵ' комплексной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$ (КДП) характеризует способность вещества обратимо поляризоваться в электрическом поле. Вода является полярным диэлектриком с высоким значением $\epsilon' = 81$. Это свойство используется для определения влажности материалов. Мнимый компонент КДП (фактор потерь ϵ'') характеризует необратимые тепловые потери при поляризации и связан с электропроводностью σ материала соотношением: $\epsilon'' = \sigma / (2\pi f \epsilon_0)$, где f – частота ЭМП, а $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная. Электропроводность σ определяется биохимическим составом органического вещества, наличием электролитов, содержанием вла-

ги и может использоваться для оценки качества трав.

Для исследования свойств высоковлажных трав и силоса предварительно выбрана частота ЭМП в диапазоне 0,1–30 МГц с целью экспериментального установления значений рабочих частот, при которых не проявляются аномально высокие значения диэлектрической проницаемости $\epsilon' > 81$.

Для исследования диэлектрических свойств трав путем наложения емкостного датчика на тестируемый образец необходима минимальная толщина слоя образца под датчиком при максимальном уплотнении, тогда ЭМП датчика практически полностью замыкается в образце. Чтобы определить глубину проникновения ЭМП датчика в тестируемый материал, был проведен эксперимент, состоящий в постепенном изменении толщины слоя воды под емкостным датчиком и в наблюдении за изменениями сигнала от датчика. Установлено, что глубина проникновения ЭМП в материал составляет 10 см, поэтому образцы трав под датчиком при измерениях в максимально уплотненном состоянии должны иметь толщину не менее этой величины.

Проведено измерение геометрической постоянной K_D емкостного датчика в диапазоне используемых частот, которая служит коэффициентом пропорциональности между абсолютной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ABC} = \epsilon_0 \cdot \epsilon'$ исследуемой среды и информативной емкостью датчика (первичного измерительного преобразователя) C_X , а также между электропроводностью среды σ и проводимостью датчика G_X . Геометрическая константа K_D емкостного датчика определена методом замещающего конденсатора [4] и равна $K_D = 5,132$ и $5,416$ м⁻¹ на частотах 2 и 30 МГц.

Ввиду того, что емкостной датчик подключали к прецизионному измерителю импеданса коаксиальным кабелем длиной 0,8 м, в котором проявляются свойства длинных линий, показания емкости и проводимости измерителя импеданса отличаются от соответствующих параметров емкостного датчика. Формулы связи измеренных параметров кабеля с датчиком и параметров емкостного датчика получены из теории длинных линий с использованием выражения для входного импеданса линии с подключенным к ее выходу емкостным датчиком [5].

Образцы отбирали в оптимальные для заготовки трав сроки: с мая по август 2013 и 2014 гг. Были исследованы различные однолетние и многолетние травы (ежа сборная, клевер красный, овес, вика, тимopheевка луговая, фистулолиум, травосмеси) в хозяйствах Ленинградской области: ЗАО ПЗ «Приневское», ПЗ «Детскосельский», Меньковская опытная станция Агрофизического института. С каждым образцом проводили серию опытов на экспериментальной установке для определения ди-

электрических свойств трав. Влажность образцов определяли термостатно-весовым методом с использованием сушильного шкафа СЭШ-3М и электронных весов ВСТ-300/5-0, пробы для которых отбирали в соответствии с ГОСТ 27548-97. Образцы травы предварительно измельчали на отрезки длиной 3-6 см. Измерения проводили, начиная с максимальной естественной влажности травы, с последующим подсушиванием вплоть до влажности воздушно-сухого состояния.

Обоснован выбор уплотняющего давления на образцы трав при определении их диэлектрических характеристик. Его диапазон на образцы трав был установлен с учетом параметров прибора, оснащенного ручным уплотняющим устройством. Оператор вручную передает усилие нагрузки на емкостной датчик в пределах от 20 Н до 160 Н. С учетом этого для снятия характеристики уплотнения массу грузов на поршень выбирали в пределах от 1 до 14 кг, включая массу поршня 2 кг. Уплотняющее давление при массе груза 16 кг, действующее на образец под емкостным датчиком с учетом его диаметра 20 см, составляет 0,53 Н/см².

Результаты и обсуждение. Основные результаты исследований зависимости диэлектрических свойств – диэлектрической проницаемости ϵ' и электропроводности σ травы ежа сборная и травосме-

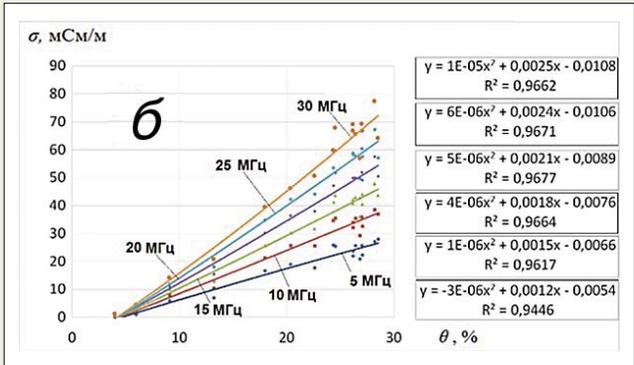
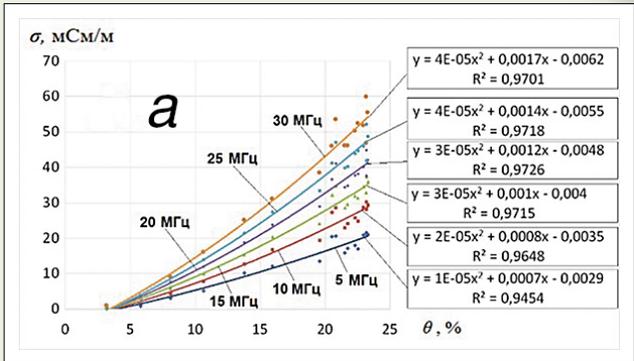


Рис. 3. Зависимость электропроводности σ ежи сборная от объемной влажности θ и частоты ЭМП:

а – при $P = 0,31 \text{ Н/см}^2$ и $F = 100 \text{ Н}$;

б – при $P = 0,5 \text{ Н/см}^2$ и $F = 157 \text{ Н}$

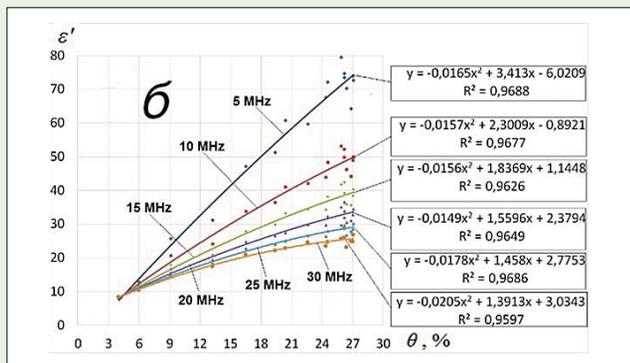
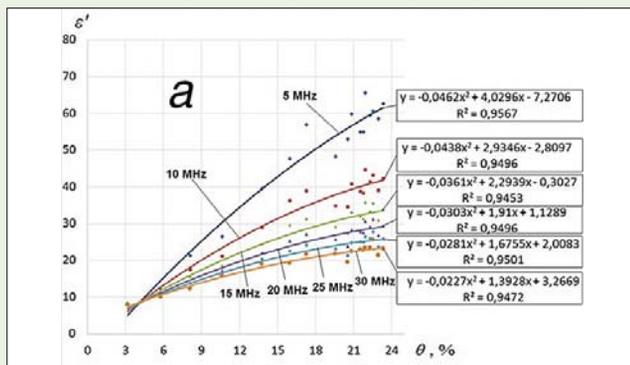


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' ежи сборная от объемной влажности θ и частоты ЭМП:

а – при $P = 0,31 \text{ Н/см}^2$ и $F = 100 \text{ Н}$;

б – при $P = 0,5 \text{ Н/см}^2$ и $F = 157 \text{ Н}$

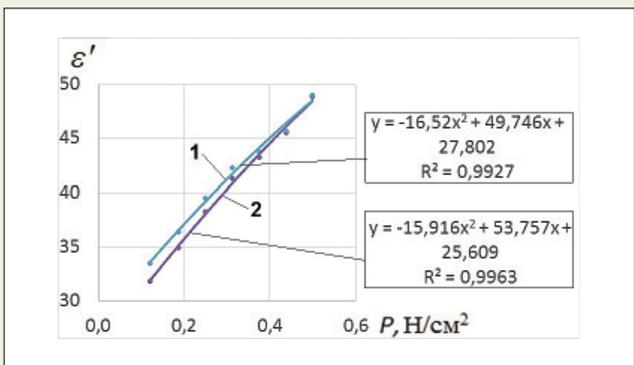


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' ежи сборная от уплотняющего давления P на частоте 10 МГц при весовой влажности образца $W = 82\%$ (в обоих опытах одинаковая влажность):

1 – первый опыт; 2 – второй опыт

си (клевер красный 60%, ежа сборная 20%, тимopheвка 20%) – от объемной влажности θ , уплотняющего давления P , усилия уплотнения F и частоты ЭМП представлены на рисунках 2-9.

Из графиков (рис. 5 и 9) видно, что значения диэлектрической проницаемости ϵ' для образцов трав при высокой влажности на частотах ниже 5 МГц имеют аномально высокие значения, превышающие диэлектрическую проницаемость воды, что характерно для многих трав. Возможными причи-

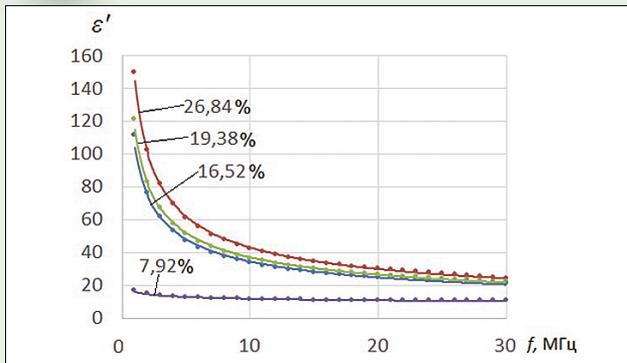


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' от частоты f при $P = 0,31 \text{ Н/см}^2$, $F = 100 \text{ Н}$ и различных значениях объемной влажности образца ($\theta = 26,84; 19,38; 16,52; 7,92\%$)

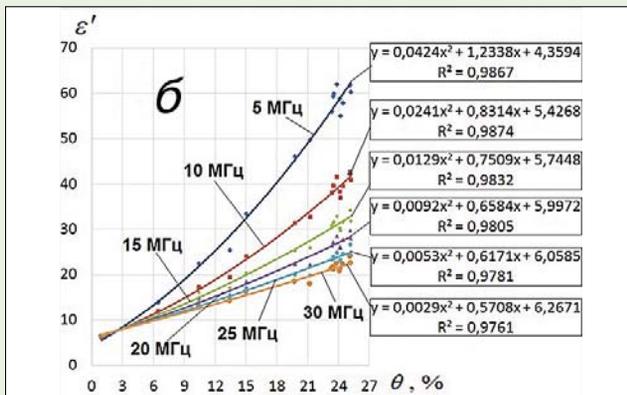
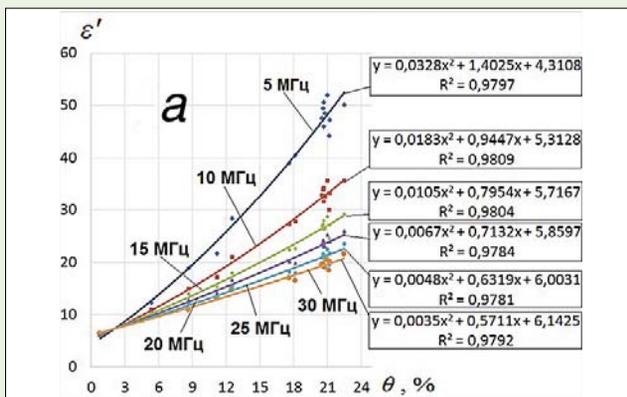


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' травосмеси от объемной влажности θ и частоты ЭМП: а – при $P = 0,31 \text{ Н/см}^2$ и $F = 100 \text{ Н}$; б – при $P = 0,5 \text{ Н/см}^2$ и $F = 157 \text{ Н}$

нами аномально высоких значений ϵ' в литературе называют две:

- запасание дополнительной энергии при поляризации диффузного электрического двойного слоя на поверхности частиц [6];

- запасание энергии в почве при поляризации за счет эффекта Максвелла-Вагнера [7].

На рисунках 2 и 6 наблюдается ослабление зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' тра-

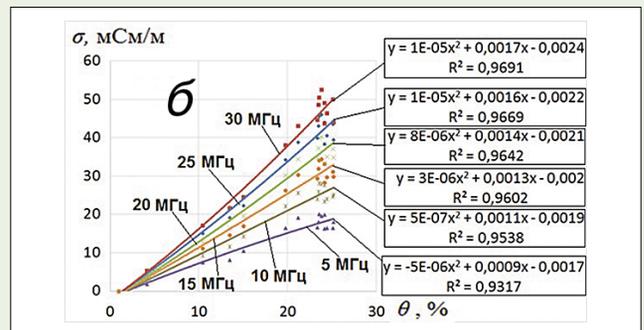
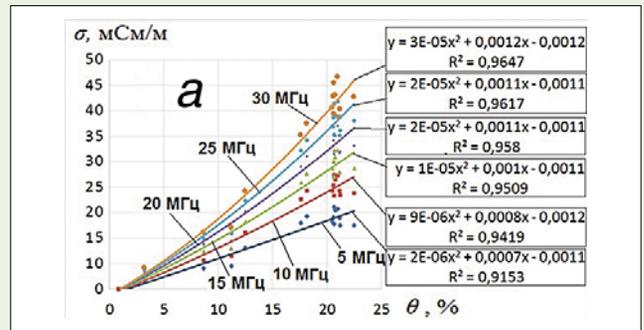


Рис. 7. Зависимость электропроводности σ травосмеси от объемной влажности θ и частоты ЭМП: а – при $P = 0,31 \text{ Н/см}^2$ и $F = 100 \text{ Н}$; б – при $P = 0,5 \text{ Н/см}^2$ и $F = 157 \text{ Н}$

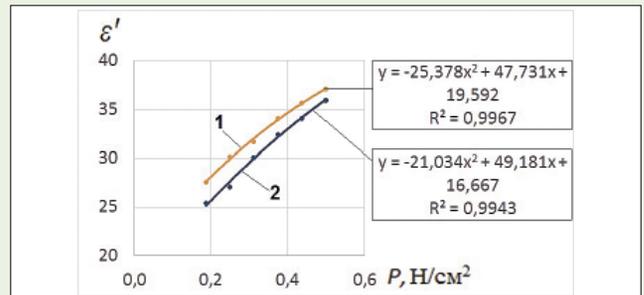


Рис. 8. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' травосмеси от уплотняющего давления P на частоте 10 МГц при весовой влажности образца $W = 82\%$ (в обоих опытах одинаковая влажность): 1 – первый опыт; 2 – второй опыт

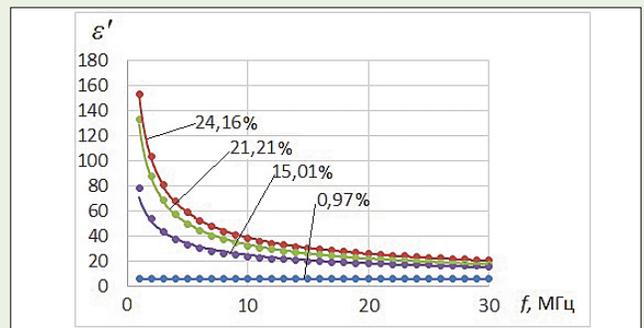


Рис. 9. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' травосмеси от частоты f при $P = 0,3 \text{ Н/см}^2$ и различных значениях объемной влажности образца ($\theta = 24,16; 21,21; 15,01; 0,97\%$)

восмеси от объемной влажности θ на высоких частотах 20-30 МГц. Рост электропроводности σ с повышением объемной влажности θ (рис. 3, 7) объясняется увеличением числа молекул свободной влаги и растворенных ионов проводимости. Увеличение σ с ростом частоты можно объяснить изменением механизма электропроводности: на более низких частотах потери определяются структурой материала и наличием примесей, а с ростом частоты начинают преобладать потери, связанные

с поляризацией. На рисунках 4 и 8 наблюдается схождение кривых при увеличении уплотняющего давления и одинаковом значении влажности проб.

Выводы

По результатам исследований диэлектрических свойств трав в 2013-2014 гг. обоснован выбор параметров разрабатываемого прибора: рабочая частота измерений 10-15 МГц, диапазон фиксированных давлений уплотнения $P = 0,3-0,5 \text{ Н/см}^2$, что соответствует усилиям уплотнения $F = 100-160 \text{ Н}$.

Литература

1. Коряков В.М., Меньшиков А.М., Секанов Ю.П. Диэлектрические свойства высоковольтных волокнистых растительных материалов // Науч.-техн. бюл. ВИМ. – 1985. – Вып. 62. – С. 33-36.
2. Секанов Ю.П. Современное состояние науки и практики в области влагометрии кормов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства, 2013. – № 3. – С. 159-166.
3. Прецизионный измеритель импеданса Agilent 4294A // [Электронный ресурс]. Код доступа: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-3809E.pdf> (Дата обращения 17.08.2015).
4. Ананьев И.П. Автогенераторные измерительные преобразователи двухкомпонентной диэлькометрии сельскохозяйственных материа-

лов: Автореф. дисс. ...докт. техн. наук. – СПб., 2009. – 48 с.

5. Блохин Ю.И., Ананьев И.П., Зубец В.С. Разработка экспериментальной установки и исследование частотно-влажностных диэлектрических характеристик кормовых трав: Матер. науч. сессии по итогам 2013 г. Агрофизического института. – 2014. – С. 36-44.

6. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. – Киев: Наукова думка, 1972. – 204 С.

7. Шилов В.Н., Духин С.С. Теория низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости суспензий сферических коллоидных частиц, обусловленной поляризацией двойного слоя // Коллоидный журнал. – 1970. – Т. 32. – № 2. – С. 293-299.

RESEARCH OF FREQUENCY-HUMIDITY DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF FORAGE GRASSES

Yu.I. Blokhin, I.P. Anan'ev, V.S. Zubetz

Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy av., 14, Saint-Petersburg, 195220, Russian Federation, office@agrophys.ru

In the technologies of green fodder production from freshly harvested grass the moisture content control plays the important role in maintenance of high quality and decrease in losses of prepared fodder. The main field technique of moisture control is the dielectric measuring providing rapidity, comprehensible accuracy, simplicity of use and relatively low cost. The experimental measuring device for investigation of wet grasses dielectric properties based on the capacitive sensor and Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer, over the electromagnetic field frequency range of 1-30 MHz, used for measurement of grass moisture content, was presented. Parameters of the flat ring capacitive sensor are studied, and a choice of it was proved. The necessary compacting pressure upon grass samples at calculation of their dielectric characteristics was determined. The problem of conversion the measured by the precision impedance analyzer parameters of a cable with the connected capacitive sensor into parameters of tested material has been solved. The preparation procedure of wet grasses to measuring was developed. The geometrical constant of the sensor was determined in the range of the used frequencies. It was determined the penetration depth of an electromagnetic field of the sensor into the tested material according to which the minimum thickness of the studied material layer under the sensor is limited. Dependences of grasses dielectric permittivity and electrical conductivity in the chosen frequency range were experimentally investigated at various values of moisture content and compacting pressure. By results of researches of dielectric properties of grass plants in 2013-2014 a choice of working frequency of measurements in the range of 10-15 MHz and compacting pressure of the studied grasses of 0.31-0.5 N per square meter created by the device was proved.

Keywords: Forage grasses; Two-component dielectric measuring; Volumetric water content; Electrical conductivity; Electromagnetic field.



References

1. Koryakov V.M., Men'shikov A.M., Sekanov Yu.P. Dielektricheskie svoystva vysokovlazhnykh volknistykh rastitel'nykh materialov [Dielectric properties of highly water charged fibrous plant materials]. *Nauch.-tekhn. byul. VIM*. 1985. V. 62. pp. 33-36 (Russian).

2. Sekanov Yu.P. Sovremennoe sostoyanie nauki i praktiki v oblasti vlagometrii kormov [Current state of science and practice in the field of a water content measurements of forages]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*, 2013. No. 3. pp. 159-166 (Russian).

3. Pretsizionnyy izmeritel' impedansa Agilent 4294A [Precision impedance meter Agilent 4294A]. Refried August 17, 2015 from <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-3809E.pdf> (Russian).

4. Anan'ev I.P. Avtogeneratorynye izmeritel'nye preobrazovateli dvukhkomponentnoy diel'kometrii sel'skokhozyaystvennykh materialov [Auto generator measuring converters of a two-component dielectric measuring of agricultural materials]: Avtoref. diss. ...

dozt. tekhn. nauk. SPb., 2009. 48 pp. (Russian).

5. Blokhin Yu.I., Anan'ev I.P., Zubets V.S. Razrabotka eksperimental'noy ustanovki i issledovanie chastotno-vlazhnostnykh dielektricheskikh kharakteristik kormovykh trav [Experimental facility engineering and research of frequency-humidity dielectric characteristics of forage grasses]. *Mater. nauch. sessii po itogam 2013 g. Agrofizicheskogo instituta*. 2014. pp. 36-44 (Russian).

6. Dukhin S.S., Shilov V.N. Dielektricheskie yavleniya i dvoynoy sloy v dispersnykh sistemakh i polielektrolitakh [Dielectric phenomena and double layer in disperse systems and polyelectrolytes]. *Kiev: Naukova dumka*, 1972. 204 pp. (Russian).

7. Shilov V.N., Dukhin S.S. Teoriya nizkochastotnoy dispersii dielektricheskoy pronitsaemosti suspenzii sfericheskikh kolloidnykh chastits, obuslovlennoy polarizatsiey dvoynogo sloya [Theory of low-frequency dispersion of the dielectric permeability of suspensions of spherical colloidal particles caused by polarization of a double layer]. *Kolloidnyy zhurnal*. 1970. T. 32. No. 2. pp. 293-299 (Russian).

НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Представленные в работе данные должны быть оригинальными. Не следует направлять в редакцию работы, которые уже напечатаны в других изданиях или посланы для публикации в другие редакции.

Редакция принимает к публикации рукописи и электронные версии статей, набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, не более 8 страниц.

Необходимо приложить рецензию на статью.

Статьи направлять с письмом руководителя предприятия, где выполнялась работа.

Аспиранты должны предоставить отзыв научного руководителя.

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – jpg или tif с разрешением 300 dpi, графики, диаграммы – в eps или ai. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны и иметь ссылку в тексте.

Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.

В каждой статье должны быть указаны следующие данные на русском и английском языках:

- УДК;
- название статьи;
- фамилия и инициалы автора(ов);
- e-mail автора, контактный телефон;
- место работы автора (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;
- ученая степень, звание автора;
- реферат (объем 200-250 слов);
- ключевые слова;
- литература (транслитерация <http://www.translit.ru>, название статьи дублируется на английском языке в квадратных скобках).

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:

- введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и обсуждение;
- Выводы;
- Литература.

Списки литературы (до 10 источников за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008. Ссылки на источник приводятся в квадратных скобках. Самоцитирование допускается не более 15%.

Если у статьи более 4 авторов, то в русском варианте указываем трех и затем пишем «и др.»; в транслитерированном – обязательно всех авторов.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты – с обязательным включением цифрового материала, сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов. В начале НЕ повторяется название статьи. Реферат НЕ разбивается на абзацы.

Необходимо применять следующие слова: исследовали, установили, получили, провели, показали, доказали и т.п. Допускается введение сокращений в пределах реферата (понятие из 2-3 слов заменяется на аббревиатуру, в первый раз дается полностью, сокращение – в скобках, далее используется только сокращение). Числительные, если не являются первым словом, передаются цифрами. Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

Несответствие статьи хотя бы по одному из перечисленных условий служит основанием для отказа в публикации.