



УДК 621.317.33; 551.208.7; 631.363.05

Ю.И. БЛОХИН, научный сотрудник,
И.П. АНАНЬЕВ, доктор технических наук, заведующий лабораторией,
В.С. ЗУБЕЦ, кандидат сельскохозяйственных наук

Агрофизический научно-исследовательский институт

195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д. 14

e-mail: office@agrophys.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ВЛАЖНОСТНЫХ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРМОВЫХ ТРАВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ
ИМПЕДАНСА**

Представлена экспериментальная лабораторная установка для исследования диэлектрических свойств влажных трав на основе емкостного датчика и прецизионного измерителя импеданса Agilent 4294A. Исследованы параметры плоского кольцевого емкостного датчика. Обоснован выбор уплотняющего давления на образцы трав при определении их диэлектрических характеристик. Решена задача пересчета измеряемых прецизионным измерителем импеданса параметров кабеля с подключенным емкостным датчиком в параметры тестируемого материала. Отбор образцов производился с учетом обеспечения однородности по влажности и в оптимальные для заготовки трав сроки – с мая по август 2013 и 2014 гг. Исследованы различные виды кормовых трав (ежа сборная, тимофеевка луговая, овсяница луговая, фестулюм, клевер красный, овес, вика, травосмеси) хозяйств Ленинградской области в разных стадиях вегетации. Разработана методика подготовки влажных трав к измерениям. Влажность образцов трав определяли по ГОСТ 27548–97 «Корма растительные. Методы определения содержания влаги». Проведено измерение геометрической постоянной датчика в диапазоне используемых частот. Определена глубина проникновения электромагнитного поля датчика в тестируемый материал, задающая минимальную толщину исследуемого слоя материала под датчиком. Экспериментально исследованы зависимости 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. обоснован выбор рабочих частот измерений в диапазоне 10–15 МГц и давлений уплотнения 0,31–0,5 Н/см², создаваемых прибором.

Ключевые слова: измеритель импеданса, диэлектрическая проницаемость, объемное влагосодержание, электропроводность, уплотняющее давление.

Влажность растительного материала – основной технологический параметр, определяющий своевременность выполнения всех технологических операций при заготовке и хранении объемистых кормов, а также показатель качества и себестоимости готовой продукции. В кормовом балансе животноводства России на объемистые корма (сено, силос, сенаж) приходится более 60 %.

Современное состояние с заготовкой объемистых кормов можно охарактеризовать значительными потерями питательных веществ и низким качеством готового корма. Из общего количества потерь питательных веществ, которое в среднем составляет 30–32 %, свыше 20 % относится к

разряду неустранимых, остальные связаны с нарушением технологии заготовки и хранения кормов [1, 2].

Из косвенных методов во влагометрии кормов наиболее распространены электрические методы измерения влажности, основанные на зависимости электрофизических свойств растительных материалов – диэлектрической проницаемости, электропроводности, тангенса угла диэлектрических потерь – от содержания в них влаги.

В настоящее время на рынке приборов присутствуют универсальные полевые влагомеры Wile 25/26 (с датчиком W253) [3] и Haumatic Digital [4] обеспечивающие измерение сена в тюках и рассыпного сена. Влагомер «Фауна-ВЛК» [5] и «Электроника ВЛК-01» [6] обеспечивают измерение образцов в измерительной камере, при использовании которых требуется осуществлять в полевых условиях такие трудоемкие операции, как отбор проб, их измельчение и засыпку в измерительный преобразователь. Draminski HMM [7] позволяет измерять влажность прессованного в тюки и рулоны сена. Следует отметить, что в электрическом поле датчиков штыревой конструкции находится небольшой объем контролируемого материала, и достоверность результатов измерений влажности во многом зависит от плотности материала в месте внедрения штыря в паковку.

Цель работы – исследование частотно-влажностных диэлектрических характеристик кормовых трав для обоснования выбора параметров разрабатываемого полевого влагомера кормовых трав.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика исследований включает разработку экспериментальной установки и исследование частотно-влажностных диэлектрических характеристик кормовых трав. Основным узлом конструкции (рис. 1) является емкостной датчик, который выполнен в виде дискового потенциального электрода диаметром 80 мм и охватывающего его концентрического корпусного электрода с внутренним диаметром 140 мм и наружным – 200 мм. Электроды выполнены планарными и размещены на поверхности изолирующего диска электродами вниз. Изолирующий диск с емкостным датчиком установлен под уплотняющим поршнем, в верхней части которого имеется осевой стержень, свободно перемещающийся вертикально. На верхний свободный конец стержня навинчивается тарелка для уплотняющих грузов. Поршень с диском опускают в цилиндрическую измерительную камеру из диэлектрической сетки, в которую при измерениях закладывают тестируемый образец. При этом масса уплотняющего груза варьируется от 1 до 16 кг с шагом в 1 кг, что соответствует усилию ручного прижатия датчика к измеряемому материалу в полевом приборе и эквивалентно уплотняющему давлению до $P = 0,5 \text{ Н/м}^2$. Измерительные электроды емкостного датчика через коаксиальный кабель подключены к прецизионному измерителю импеданса Agilent 4294A [8]. Измеренные значения емкости $C_{\text{вх}}$ и проводимости $G_{\text{вх}}$ датчика с кабелем в диапазоне частот 0,1–30 МГц передавались на ПК.

Для определения глубины проникновения ЭМП датчика в тестируемый материал проведен эксперимент, состоящий в постепенном изменении тол-

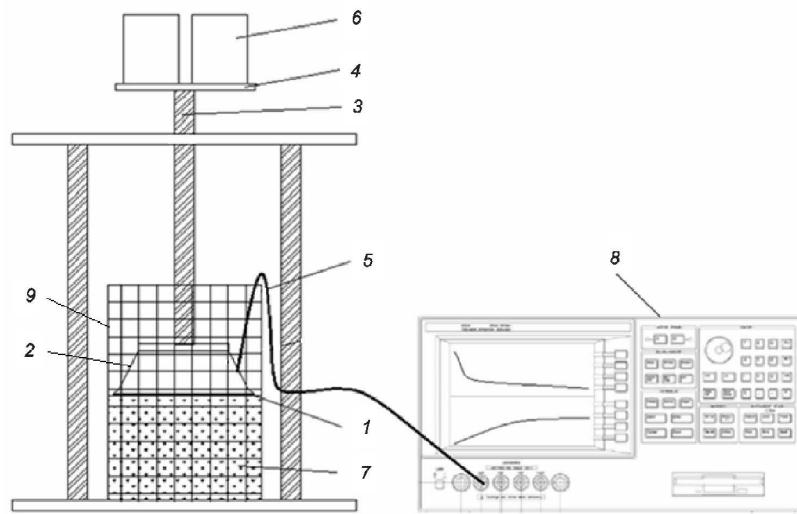


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с тестируемым образцом в измерительной камере:

1 – диск с измерительными электродами; 2 – уплотняющий поршень; 3 – осевой стержень; 4 – тарелка для уплотняющих грузов; 5 – коаксиальный кабель; 6 – уплотняющие грузы; 7 – тестируемый образец; 8 – прецизионный измеритель импеданса Agilent 4294A; 9 – цилиндрическая измерительная камера из диэлектрической сетки

щины слоя воды под емкостным датчиком. Диск с измерительными электродами был установлен на поверхности воды, находящейся в сосуде, на расстоянии 5 см от дна. Затем уровень воды и датчика постепенно повышали до 14 см от дна. Для каждой точки измерителем импеданса на частоте 5 МГц измерены значения емкости датчика с соединительным кабелем С (рис. 2). Емкость датчика с кабелем остается постоянной, если слой воды под датчиком имеет толщину, при которой все ЭМП замыкаются в этом слое. При уменьшении толщины слоя часть ЭМП выходит за его пределы и емкость уменьшается.

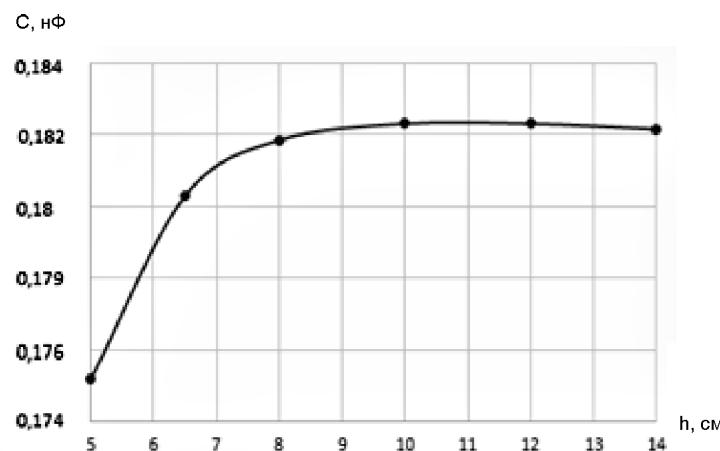


Рис. 2. Зависимость ёмкости измерительного датчика от толщины водного слоя под датчиком

Из проведенного эксперимента следует, что глубина проникновения ЭМП в материал составляет 10 см, поэтому образцы трав под емкостным датчиком при измерениях должны иметь толщину не менее 10 см в максимально уплотненном состоянии.

Проведено определение геометрической постоянной K_{Π} емкостного датчика в диапазоне используемых частот, имеющей размерность м^{-1} и являющейся коэффициентом пропорциональности между абсолютной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_0 \epsilon$ исследуемой среды и информативной емкостью датчика (первичного измерительного преобразователя – ПИП) C_X , а также между электропроводностью среды σ и проводимостью датчика ГПИП:

$$K_{\Pi} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{C_X} = \frac{\sigma}{G_{\text{ПИП}}}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{м}$; ϵ – диэлектрическая проницаемость (действительный компонент комплексной диэлектрической проницаемости – КДП).

Геометрическая константа K_{Π} емкостного датчика определена методом замещающего конденсатора [9]. Метод состоит в измерении емкости датчика с кабелем измерителем Agilent 4294A при опускании датчика на поверхность дистиллированной воды с последующим извлечением; подключении параллельно ПИП замещающего конденсатора с емкостью C_3 , возвращающей емкость к значению для дистиллированной воды. При этом геометрическая константа определяется по формуле

$$K_{\Pi} = \epsilon_0 (\epsilon_{\text{вд}} \epsilon_{\text{вз}}) / C_3, \quad (2)$$

где $\epsilon_{\text{вд}}$, $\epsilon_{\text{вз}}$ – диэлектрическая проницаемость воды и воздуха и равна $K_{\Pi} = 5,132$ и $5,416 \text{ м}^{-1}$ на частотах 2 и 30 МГц соответственно. Метод исключает влияние паразитной емкости датчика C_{Π} и соединительного кабеля на значение K_{Π} .

Отбор образцов производили с учетом обеспечения однородности по влажности и в оптимальные для заготовки трав сроки – с мая по август 2013 и 2014 гг. Исследованы различные виды кормовых трав (ежа сборная, тимофеевка луговая, овсяница луговая, фестуолиум, клевер красный, овес, вика, травосмеси) хозяйств Ленинградской области (ЗАО ПЗ «Приневское», ПЗ «Детскосельский», Меньковский филиал АФИ) в разных стадиях вегетации [10].

Для каждого образца проводили серию опытов на экспериментальной установке для определения диэлектрических свойств трав. Влажность образцов определяли термостатно-весовыми влагомерами МВ-45 и СЭШ-3М и электронными весами ВСТ-300/5-0, для которых отбирали пробы по ГОСТ 27548-97 «Корма растительные. Методы определения содержания влаги». Образцы травы предварительно измельчали на отрезки длиной 3–6 см. Измерения проводили начиная с максимальной естественной влажности травы с последующим подсушиванием до снижения уровня влажности на 1–3 весовых процента вплоть до влажности воздушно-сухого состояния травы.

Диэлектрическую проницаемость ϵ_{∞} и электропроводность σ образцов трав определяли по информативной емкости $C_{\text{ПИП}}$ и проводимости $G_{\text{ПИП}}$ емкостного датчика, которые связаны известными соотношениями:

$$\epsilon_{\infty} = \frac{C_{\text{ПИП}}}{\epsilon_0} K_{\Pi}, \quad \sigma = G_{\text{ПИП}} K_{\Pi}. \quad (3)$$

Информативная емкость равна $C_{\text{ПИП}} = C_X - C_{\Pi}$, где C_X – общая емкость датчика, C_{Π} – паразитная емкость, учитывающая емкость монтажа и неиспользуемых областей ЭМП датчика.

Ввиду того, что емкостный датчик подключали к прецизионному измерителю импеданса коаксиальным кабелем длиной 0,8 м (для обеспечения возможности закладки образца под датчик и его перемещения при уплотнении), в котором проявляются свойства длинных линий, показания измерителя импеданса $C_{\text{ВХ}}$ и $G_{\text{ВХ}}$ отличаются от емкости C_X и проводимости $G_{\text{ПИП}}$ емкостного датчика. Формулы связи измеренных параметров кабеля с датчиком $C_{\text{ВХ}}$, $G_{\text{ВХ}}$ с параметрами емкостного датчика $G_{\text{ПИП}}$, C_X получены из теории длинных линий с использованием выражения для входного импеданса линии с подключенным к ее выходу емкостным датчиком:

$$C_{\text{ВХ}} = \frac{\frac{9}{8} \left(\frac{1}{G_{\text{ПИП}}} + \frac{1}{\tan(W\omega C_0 l)} \right)^* |C_X| \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] W \tan(W\omega C_0 l) + \frac{7}{6} W \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] + \omega C_X \tan(W\omega C_0 l) \tan(W\omega C_0 l) + \frac{6}{6} \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] W \tan(W\omega C_0 l) \tan(W\omega C_0 l)}{6W^2 G_{\text{ПИП}} + \frac{1}{G_{\text{ПИП}}} \left[|C_X| \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] W \tan(W\omega C_0 l) \right]^2} \quad (4)$$

$$C_{\text{ВХ}} = \frac{W \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] + \omega C_X \tan(W\omega C_0 l) \tan(W\omega C_0 l) + \frac{7}{6} W^2 G_{\text{ПИП}} + \frac{1}{G_{\text{ПИП}}} \left[|C_X| \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] W \tan(W\omega C_0 l) \right]^2}{W^2 G_{\text{ПИП}} + \frac{1}{G_{\text{ПИП}}} \left[|C_X| \left[(G_{\text{ПИП}})^2 + \omega^2 (C_X)^2 \right] W \tan(W\omega C_0 l) \right]^2} \quad (5)$$

где $C_{\text{ВХ}}$ [Ф], $G_{\text{ВХ}}$ [См] – емкость и проводимость кабеля с датчиком, измеряемые прецизионным измерителем импеданса Agilent 4294A; C_X [Ф], G_X [См] – емкость и проводимость датчика; $\omega = 2\pi f$ – рабочая частота измерений (ω [рад/с] – круговая, f [Гц] – циклическая), W [Ом] – волновое сопротивление кабеля; C_0 [Φ /м] – погонная емкость кабеля, l [м] – длина кабеля; \tan – тангенс.

В установке использован коаксиальный кабель марки RG-62, имеющий малую погонную емкость для уменьшения влияния кабеля на определение параметров датчика. Параметры кабеля: волновое сопротивление $W = 93$ Ом; погонная емкость $C_0 = 43$ п Φ /м; длина кабеля $l = 0,8$ м. Связь измеренных входных параметров кабеля с датчиком $C_{\text{ВХ}}$, $G_{\text{ВХ}}$, с параметрами емкостного датчика C_X , $G_{\text{ПИП}}$, выраженная формулами (4), (5), представлена на рис. 3.

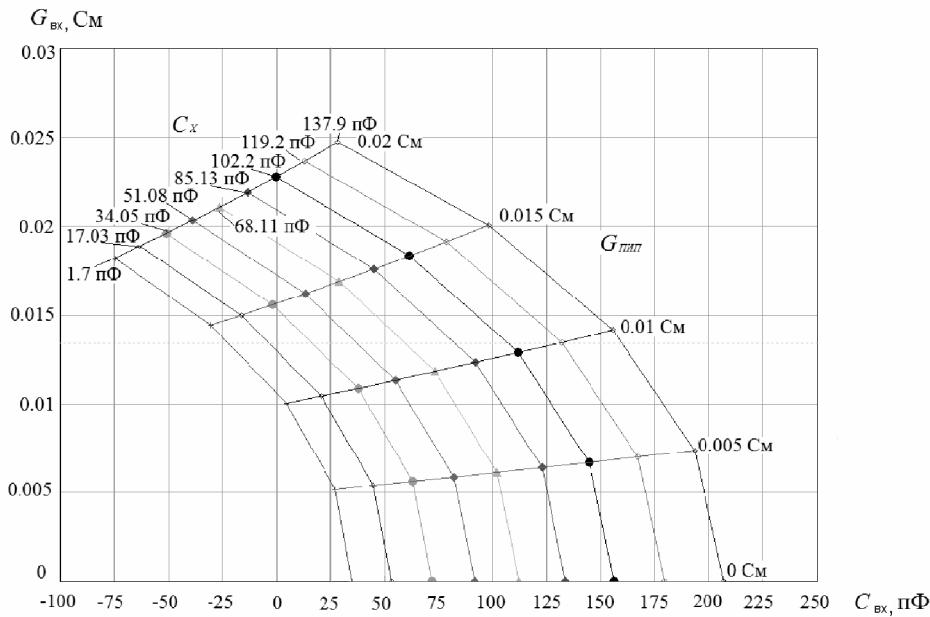


Рис. 3. Градуировочная сетка линий равной емкости C_X и равной проводимости G_{BX} емкостного датчика в координатах входной емкости C_{BX} и входной проводимости G_{BX} коаксиального кабеля с датчиком, измеряемых прецизионным измерителем импеданса Agilent 4294A, для частоты 10 МГц

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приведены результаты исследований зависимости диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости ϵ и электропроводности \neq травосмеси (овес 40 %, вика 60 %) от частоты измерительного тока, объемной влажности и уплотняющего давления) (рис. 4–7). Образцы травы взяты в ЗАО ПЗ «Приневское» 07.08.2014 г.

Из графика на рис. 7 видно, что диэлектрическая проницаемость ϵ для образцов трав при высокой влажности на частотах ниже 2 МГц имеет аномально высокие значения, превышающие диэлектрическую проницаемость воды, что характерно для многих трав. Возможными причинами аномально высоких значений ϵ в литературе отмечаются две: запасание дополнительной энергии при поляризации диффузного электрического двойного слоя на поверхности частиц [11]; запасание энергии в почве при поляризации за счет эффекта Максвелла – Вагнера [12]. На рис. 4 наблюдается уменьшение зависимости диэлектрической проницаемости ϵ травосмеси от объемной влажности Ш на высоких частотах 20–30 МГц. Рост электропроводности \neq с увеличением объемной влажности Ш (см. рис. 5) объясняется увеличением числа молекул свободной влаги и растворенных ионов проводимости. Увеличение \neq с ростом частоты можно объяснить изменением механизма электропроводности: на более низких частотах потери определяются структурой материала и наличием примесей, а с ростом час-

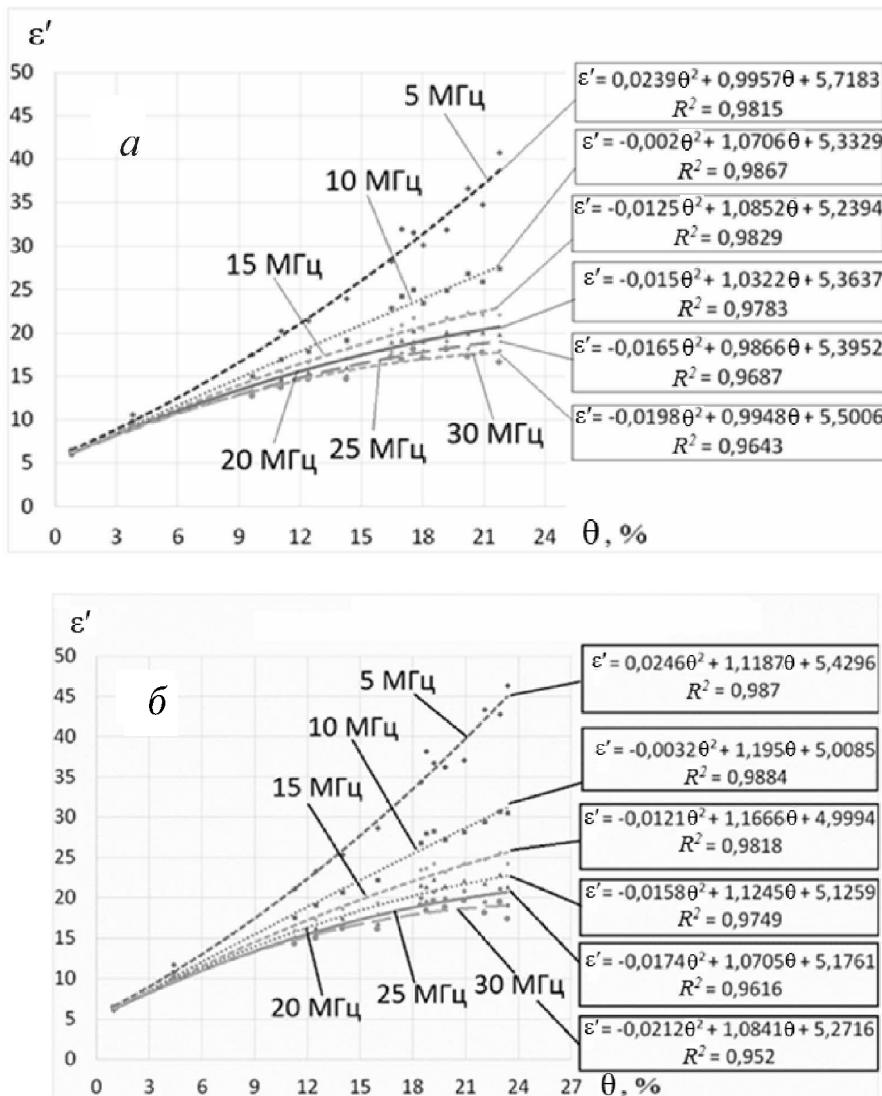


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ -травосмеси от объемной влажности Ши частоты ЭМП при уплотняющем давлении:

a – $P = 0,31 \text{ N/cm}^2$; *б* – $P = 0,5 \text{ N/cm}^2$ (усилие уплотнения $F = 100 \text{ H}$ и $F = 157 \text{ H}$)

тоты начинают преобладать потери, связанные с поляризацией [9]. На рис. 6 наблюдается схождение кривых при увеличении уплотняющего давления при одинаковых влажностях проб, что показывает повышение точности и воспроизводимости физических характеристик трав при многократных измерениях.

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

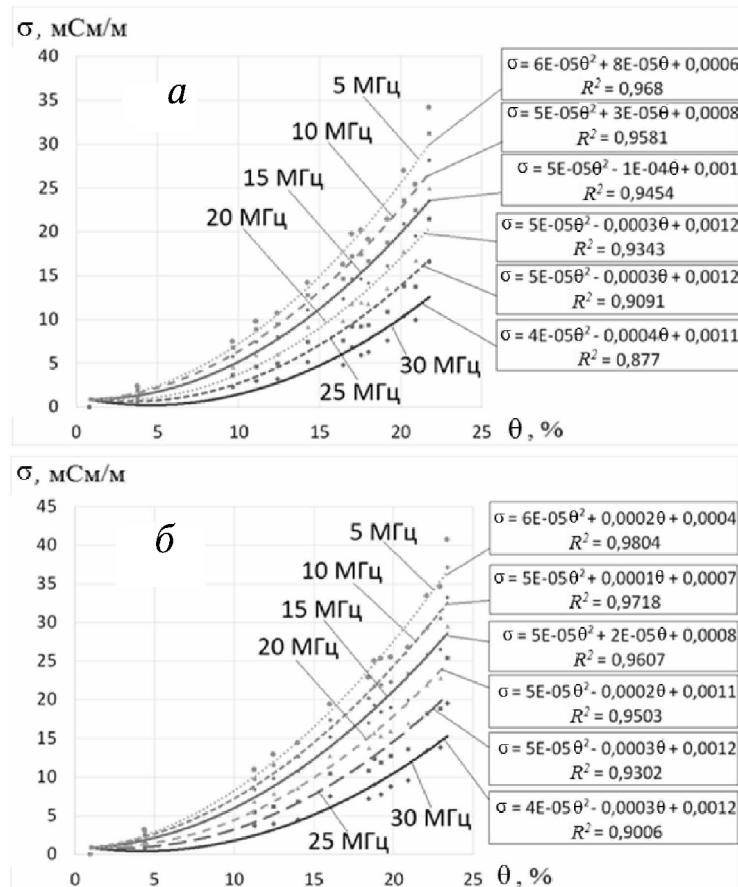


Рис. 5. Зависимость электропроводности σ травосмеси от объемной влажности θ и частоты ЭМП при уплотняющем давлении:
a – $P = 0,31 \text{ H/cm}^2$; *б* – $P = 0,5 \text{ H/cm}^2$ (усилие уплотнения $F = 100 \text{ H}$ и $F = 157 \text{ H}$)

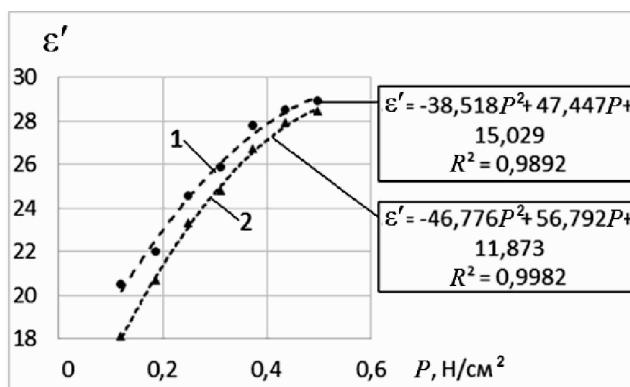


Рис. 6. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' двух образцов травосмеси от уплотняющего давления P на частоте 10 МГц при весовой влажности образца $W = 82 \%$:
1, 2 – две кривые одинаковой влажности

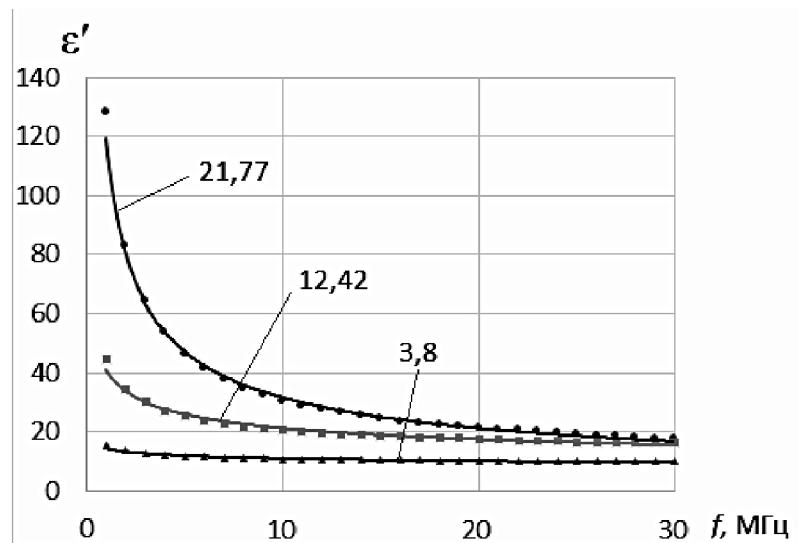


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' -травосмеси от частоты f при уплотняющем давлении $P = 0,3 \text{ Н/см}^2$ и трех объемных влажностях образца ($W = 21,77; 12,42; 3,8 \%$)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пугачев П.М. Обоснование параметров и разработка прибора для оперативного неразрушающего контроля влажности при заготовке кормов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2006.
2. Секанов Ю.П. Современное состояние науки и практики в области влагометрии кормов // Вестн. ВИМ. – 2013. – № 3. – С. 159–166.
3. Влагомер кормов. – [Электронный ресурс]: Wile 25. <http://www.farmcomp.fi/ru/wile/products/wile-for-hay/wile-25>
4. Влагомер кормов. – [Электронный ресурс]: Haymatic. <http://www.farmertronic.com/en/haymatic-hay-straw>
5. Влагомер Fauna-ВЛК. – [Электронный ресурс]: <http://www.agrolepta.ru/instruktpm.htm>
6. Секанов Ю.П. Влагометрия сельскохозяйственных материалов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 160 с.
7. Влагомер кормов. – [Электронный ресурс]: Draminski HMM. <http://www.draminski.com/agri/moisture-meters/draminski-hmm/>
8. Прецизионный измеритель импеданса. – [Электронный ресурс]: Agilent 4294A. Web-site: <http://www.home.agilent.com>
9. Ананьев И.П. Автогенераторные измерительные преобразователи двухкомпонентной диэлькометрии сельскохозяйственных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2009. – 48 с.
10. Блохин Ю.И., Ананьев И.П., Зубец В.С. Исследование частотно-влажностных диэлектрических характеристик кормовых трав // С.-х. машины и технологии. – 2015. – № 6. – С. 19–24.
11. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. – Киев: Наук. думка, 1972. – 204 с.
12. Шилов В.Н., Духин С.С. Теория низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости суспензий сферических коллоидных частиц, обусловленной поляризацией двойного слоя // Коллоидн. журн. – 1970. – Т. 32, вып. 2. – С. 293–299.

Поступила в редакцию 18.12.2015

**YU.I. BLOKHIN, Researcher,
I.P. ANANYEV, Doctor of Science in Engineering, Laboratory Head,
V.S. ZUBETS, Candidate of Science in Agriculture**
*Agro-Physical Research Institute
14, Grazhdanskiy Av, St. Petersburg, 195220 Russia
e-mail: office@agrophys.ru*

**INVESTIGATION OF FREQUENCY AND MOISTURE
DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF FODDER GRASSES
BY PRECISION IMPEDANCE ANALYZER**

The experimental measuring device based on the capacitance sensor and Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer has been developed to investigate dielectric properties of wet grasses. Parameters of the flat ring capacitance sensor have been studied. A choice of compacting pressure on grass samples when determining their dielectric characteristics has been substantiated. The problem of converting parameters of a cable with the connected capacitance sensor measured by the precision impedance analyzer into parameters of tested material has been solved. Grasses were sampled on the optimal dates from May to August in 2013 and 2014 to provide homogenous moisture. The various species of fodder grasses were investigated in the farms of Leningrad Region; these were cock's-foot grass, timothy grass, meadow fescue, festulolium, red clover, oats, vetch, and grass mixtures. The procedure for preparing wet grasses to measurements has been developed. The grass moisture content was determined according to the GOST 27548–97 State Standard "Grass Feeds. Methods for Determining Moisture Content". The sensor's geometric constant has been determined over the frequency range of electromagnetic field. The penetration depth of the electromagnetic field of the sensor into the tested material setting the minimal thickness of a tested layer under the sensor has been studied. Dependences of dielectric permittivity and electrical conductivity of grasses in the chosen frequency range were investigated at the various values of moisture content and compacting pressures. The working frequencies range (10–15 MHz) and the compacting pressures (0.31–0.50 N/cm²) were determined for tested grasses with the use of the experimental measuring device in 2013–2014.

Keywords: precision impedance analyzer, dielectric permittivity, volumetric water content, electrical conductivity, compacting pressure.

УДК 631. 316. 02

**Н.С. ЯКОВЛЕВ, доктор технических наук, заведующий лабораторией,
П.В. КОЛИНКО*, кандидат физико-математических наук, генеральный директор**

Сибирский научно-исследовательский институт механизации

и электрификации сельского хозяйства,

**ОАО «Сибирский Агропромышленный Дом»*

630501, Новосибирская область, пос. Краснообск

e-mail: yakovlev-46@inbox.ru

**ТЯГОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ПОСЕВНЫХ МАШИН**

Проведен анализ тягового сопротивления почвообрабатывающей посевной машины «Объ-4-3Т» и агрегатов комбинированных почвообрабатывающих «Лидер-2,5Н», «Лидер-4», «Лидер-6Н», «Лидер-8,5», «Лидер-10,8». Энергетическую оценку машин проводили на Сибирской государственной зональной машиноиспытательной станции (2003, 2004 гг.) и Алтайской государственной зональной машиноиспытательной станции (2010, 2011 гг.). Определены математические зависимости тягового сопротивления комбинации агрегата К-701 и двух ППМ «Объ-4-3Т» от глубины хода рабочих органов и влажности почвы, тягового сопротивления одной ППМ «Объ-4-3Т» в зависимости от рабочей скорости при посеве пшеницы и обработке пара. Установлено, что на тяговое сопротивление посевных машин с рабочими органами в виде стрельчатых лап, работающими на малых