

Цымбалова Виктория Михайловна

магистрант

Яценко Олег Вадимович

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»

г. Ростов-на-Дону, Ростовская область

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР:
КАЛИБРОВКА ЕМКОСТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Аннотация: в работе описана калибровка измерительной ячейки установки для определения диэлектрической проницаемости зерновых. Процесс осуществлялся двумя способами: 1) в ячейку вводилась древесно-стружечная плита и 2) вода в тонкостенном полиэтиленовом пакете как альтернатива. Экспериментально установлено и подтверждено теоретическим расчетом, что влияние даже тонкостенного диэлектрического материала, помещенного в измерительную ячейку, оказывает существенное влияние на результат измерений.

Ключевые слова: зерновые материалы, диэлектрическая проницаемость, измерительная ячейка, калибровка, статистический анализ.

В работах [1; 2] описана экспериментальная установка для измерения диэлектрической проницаемости зерновых материалов, состоящая из емкостного датчика и электрической подсистемы. Там же детально обсуждаются методика и результаты калибровки электроизмерительной подсистемы. Не менее важна аккуратная калибровка собственно измерительной ячейки в виде засыпного плоского конденсатора, выбранная предметом описанного ниже исследования.

Поскольку теоретический расчет параметров измерительной ячейки [1] не представляется достаточно надежным в рамках требуемой точности измерений,

нами осуществлена ее непосредственная калибровка, причем двумя способами. В первом случае измерительная емкость плотно заполнялась древесностружечной плитой (ДСП), во втором – водой, помещенной в полиэтиленовый пакет. Использование пакета мотивировано, с одной стороны, необходимостью исключить активную проводимость между стенками емкостного датчика, а с другой, желанием экономить зерно при последующих измерениях влажности.

Методически первый способ калибровки состоял в постепенном введении ДСП внутрь измерительной ячейки. В первом опыте измерительная ячейка (рисунок 1) была пуста, в каждом последующем заполнялась на 0,1 объема материалом ДСП, после чего измерялась ее электрическая емкость.

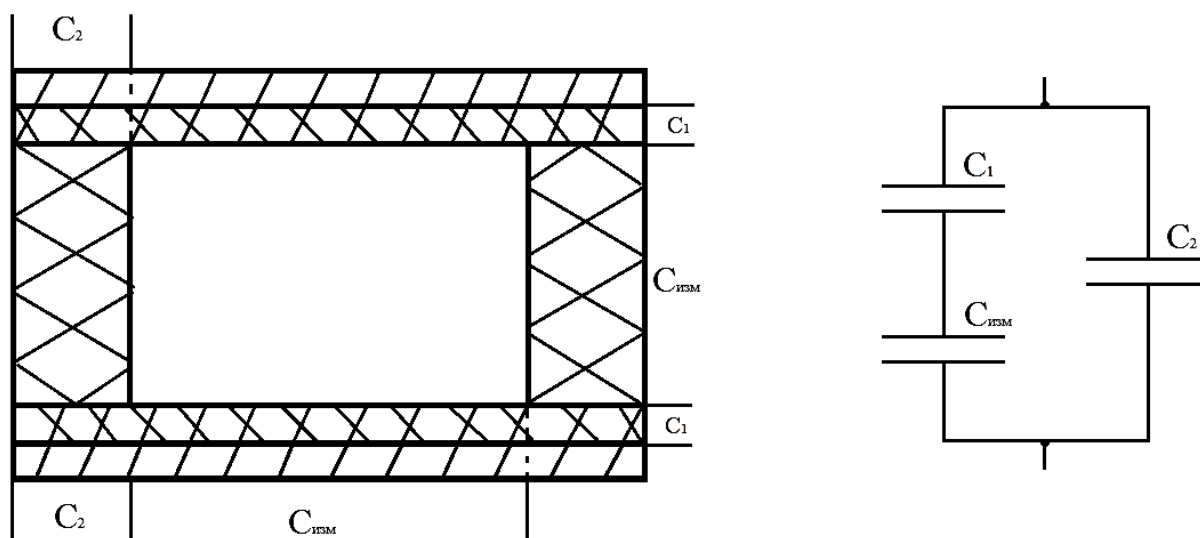


Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки (слева)
и эквивалентная электрическая схема (справа)

Результаты измерения емкости ячейки, заполняемой ДСП, приведены в таблице 1. Затем эти данные обрабатывались методами математической статистики с учетом эквивалентной электрической схемы ячейки (рисунок 1).

Таблица 1

Данные непосредственных измерений емкости ячейки в зависимости от степени ее заполнения материалом ДСП

| № опыта | Доля заполненной измерительной емкости V_n/V | Фактический объем, заполненный ДСП с учетом объема боковых стенок, см ³ | C_n , пФ |
|---------|--|--|------------|
| 1 | 0 | 54 | 115 |
| 2 | 0.1 | 157 | 125 |
| 3 | 0.2 | 259 | 130 |
| 4 | 0.3 | 362 | 135 |
| 5 | 0.4 | 464 | 142 |
| 6 | 0.5 | 567 | 152 |
| 7 | 0.6 | 670 | 157 |
| 8 | 0.7 | 772 | 170 |
| 9 | 0.8 | 875 | 177 |
| 10 | 0.9 | 977 | 185 |
| 11 | 1.0 | 1080 | 190 |

Данные таблицы 1 свидетельствуют о практически линейной зависимости $C(V)$, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции – $\text{corr}(C(V), V) = 0,997$ (рисунок 2). Это обстоятельство служит основанием для линейной регрессии полученной в эксперименте зависимости. Результаты соответствующего анализа показаны на рисунке 2.

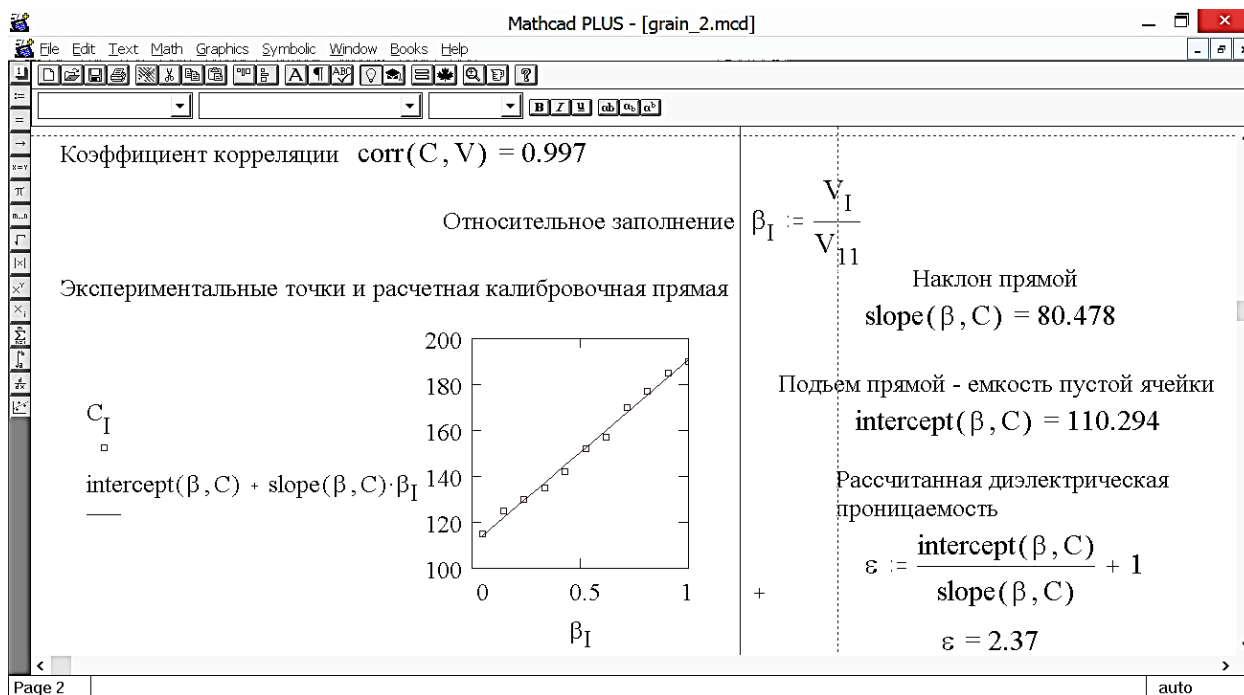


Рис. 2. Статистическая обработка данных, полученных в калибровочном эксперименте с ДСП, средствами MathCAD

В соответствии с результатами расчета (рисунок 2) рабочая электрическая емкость ячейки составляет 110 пФ, а величина диэлектрической проницаемости вводимой в ячейку ДСП – 2,37. Эти данные хорошо согласуются с проектным расчетом (рабочая электрическая емкость оценена в 122 пФ, из которых 27 пФ – паразитная [1], а справочное значение $\epsilon_{\text{ДСП}} = 2,0 - 2,6$ [3]).

Для наших целей крайне важна также мера погрешности измерений, обусловленная неточным знанием электрических параметров ячейки. Ее можно оценивать средним и максимальным отклонением экспериментальных точек от идеализированной калибровочной кривой (рисунок 2). Соответствующие вычисления (рисунок 3) показывают, что эти погрешности составляют 1.4 и 2.5% соответственно.

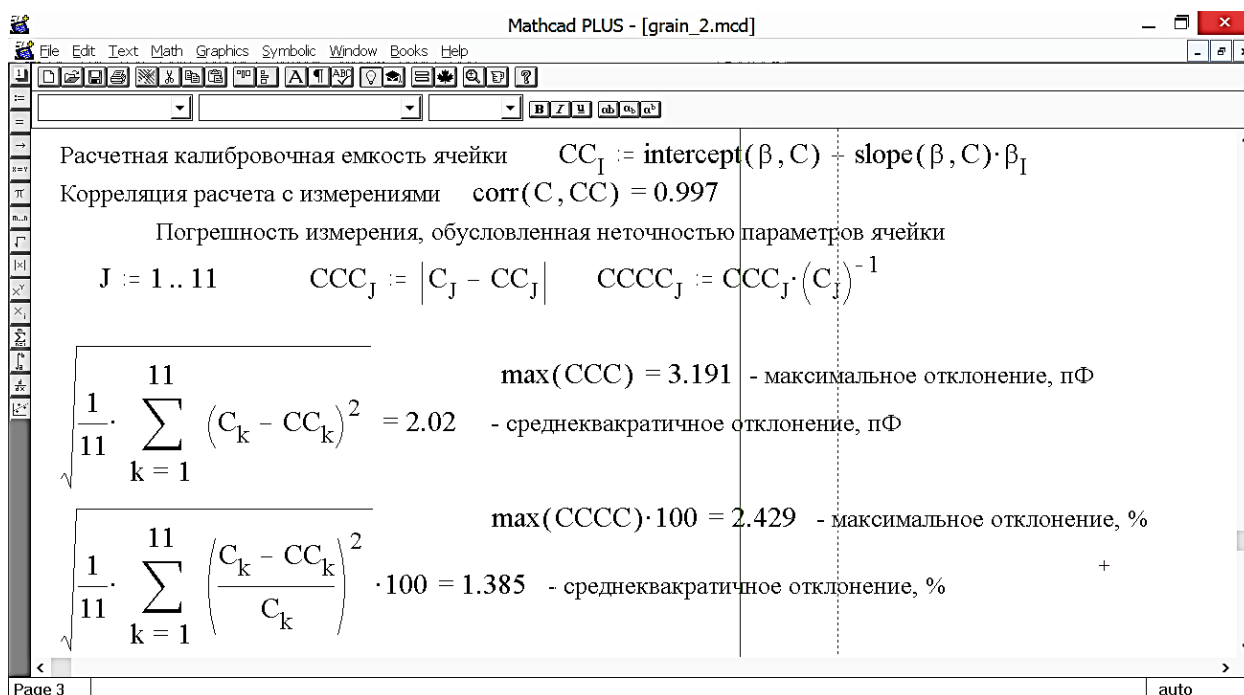


Рис. 3. Оценка погрешности при экспериментальном определении параметров измерительной ячейки

Попытка откалибровать измерительную ячейку при помощи воды, используя двойной полиэтиленовый пакет, оказалась не столь успешной. Хотя диэлектрическая проницаемость самого пакета $\epsilon_{(C_2H_2)_n}$ близка к единице [2], и заполнение измерительной ячейки 17 пакетами привело к увеличению ее емкости лишь на 2–3 пФ, результаты калибровки водой, сведенные в таблицу 2, дают очень далекое от реальности значение $\epsilon_{H_2O} = 25\text{--}35$ (рисунки 4–5). Кроме того, в ходе эксперимента отмечался медленный рост емкости со временем.

Таблица 2

Первичные данные эксперимента по калибровке измерительной ячейки водой: второе значение в третьем столбце соответствует данным, полученным при откачивании воды

| № опыта | Объем залитой воды V , мл | Емкость заполненной ячейки C , пФ |
|---------|-----------------------------|--|
| 1 | 0 | 115 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 120 |
| 2 | 50 | 155 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 180 |
| 3 | 100 | 220 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 260 |
| 4 | 150 | 280 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 360 |
| 5 | 200 | 340 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 500 |

| | | |
|----|-----|--|
| 6 | 250 | 410 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 640 |
| 7 | 300 | 530 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 720 |
| 8 | 350 | 640 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 735 |
| 9 | 400 | 730 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 780 |
| 10 | 450 | 825 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 1050 |
| 11 | 500 | 920 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 1150 |
| 12 | 550 | 1050 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 1200 |
| 13 | 600 | 1250 $\xrightarrow{t \rightarrow \infty}$ 1250 |

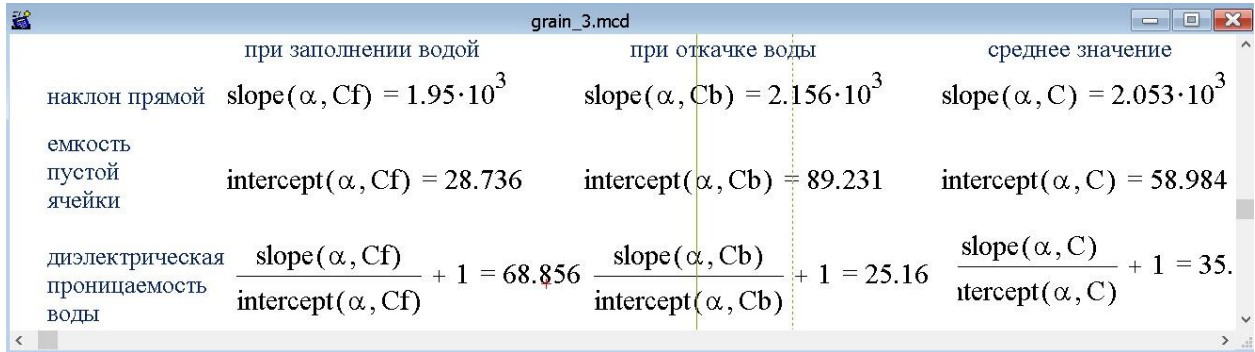


Рис. 4. Числовой результат математической обработки данных таблицы 2

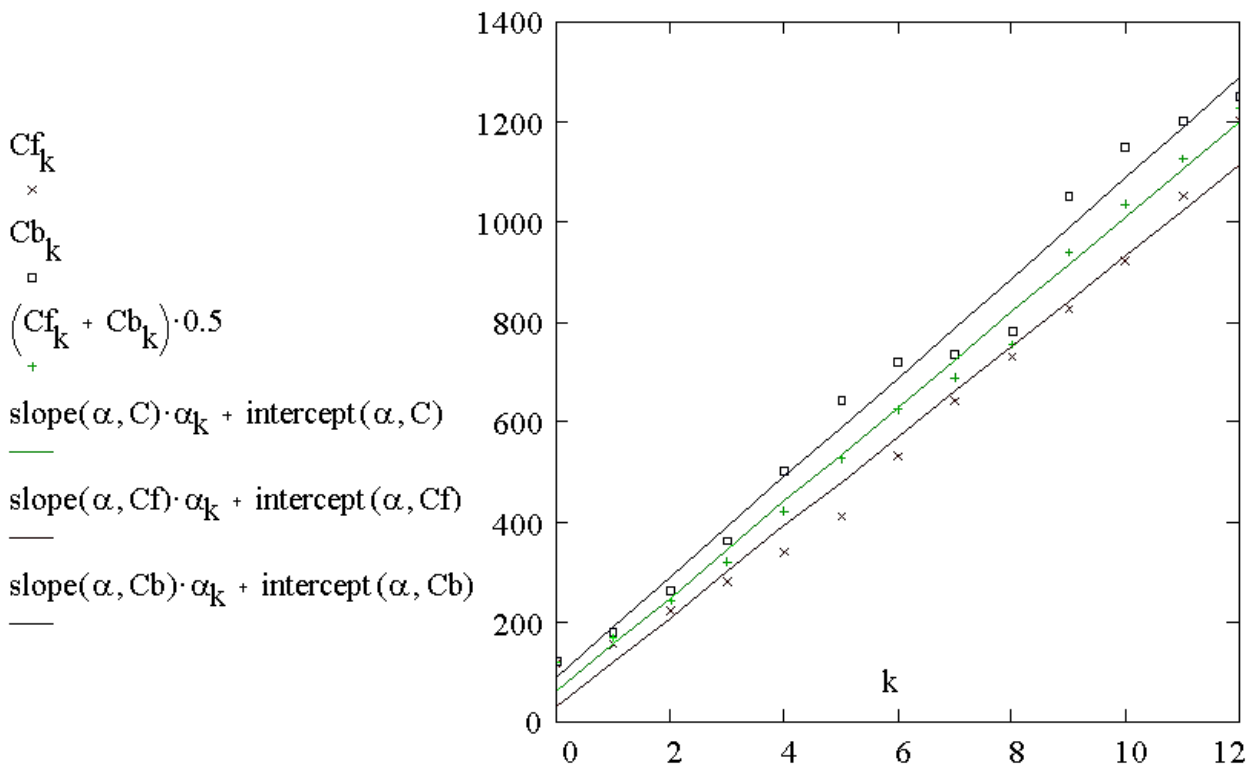


Рис. 5. Визуализация данных таблицы 2 и результатов линейризации: красным – при заполнении ячейки водой, синим – при откачке воды, зеленым – среднее значение

Поскольку стабилизация показаний измерителя емкости Ф4320 требовала определенного времени, наиболее достоверным следует признать результат при $t \rightarrow \infty$, обозначенный на рисунке 5 синим цветом. Соответствующие значения емкости пустой ячейки и диэлектрической проницаемости воды равны 89 пФ и 25 соответственно. Это означает, что в использованной нами модели измерений и обработки данных имеются существенные неучтенные факторы.

Тщательный анализ этого результата позволяет заключить, что использование для измерений двойного полиэтиленового пакета принципиально усложняет схему измерений, внося в нее дополнительную, последовательную с измерительной ячейкой, паразитную емкость. Схематизация и электрический эквивалент уточненной таким образом измерительной системы приведены на рисунке 6.

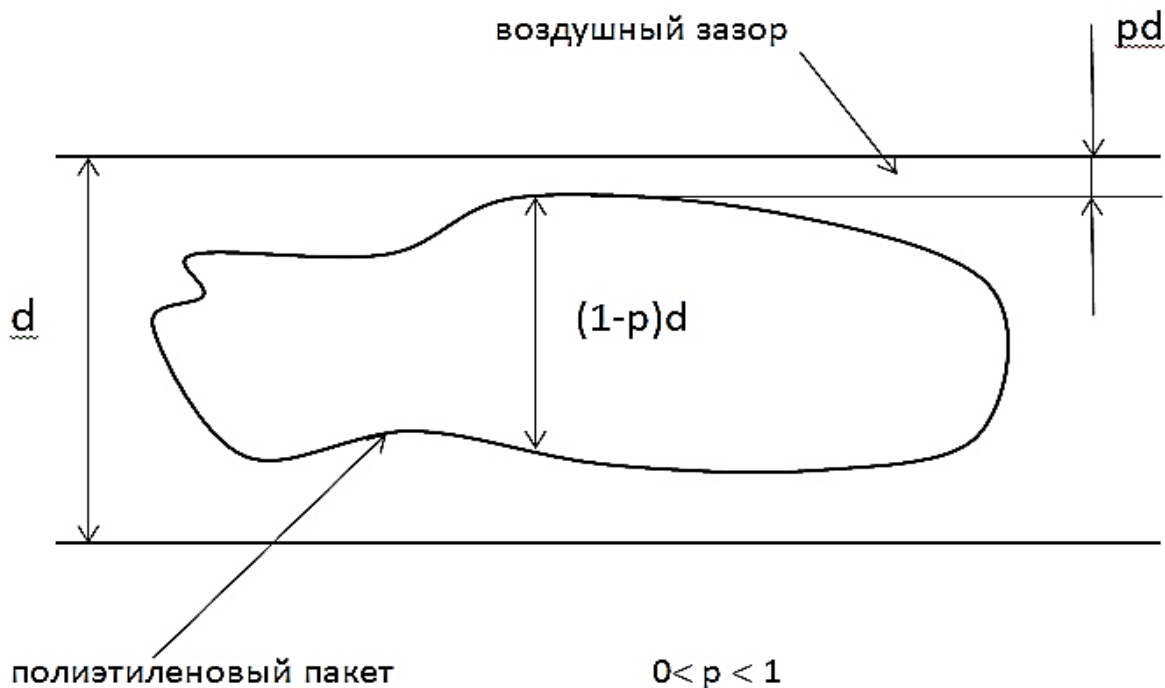


Рис. 6. Причины и параметры, влияющие на ошибочность калибровки измерительной ячейки водой

Если доля зазора между пластинами, заполненная воздухом и/или стенками полиэтиленового пакета равна $p = \Delta/d$ (рисунок 6), то паразитная емкость $C_{\text{пар}} \sim (pd)^{-1}$. При этом емкость измерительной ячейки, заполненной водой, $C_{\text{изм}} \sim 81 \cdot [(1-p)d]^{-1}$, а емкость последовательно соединенных конденсаторов $C_{\text{пар}} \parallel$

$C_{\text{изм}}$ может быть заменена эффективной емкостью $C_{\text{эфф}}$. Поскольку $C_{\text{эфф}}^{-1} = C_{\text{пар}}^{-1} + C_{\text{изм}}^{-1}$, эффективная диэлектрическая проницаемость такого составного конденсатора $\varepsilon_{\text{эфф}}$ дается известной из электротехники формулой:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \frac{\rho}{\varepsilon_{\text{пар}}} + \frac{1-\rho}{\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (1)$$

Знание величин $\varepsilon_{\text{пар}} \approx 1$ и $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \approx 81$ позволяет, решив уравнение (1), относительно ρ для экспериментально определенной $\varepsilon_{\text{эфф}} \approx 25-35$, определить величину зазора. Полученное нами значение $\rho \approx 0,3 \div 0,4$ мм хорошо согласуется с наблюдаемым в опытах.

Важным практическим следствием этого результата является неудобство измерений диэлектрической проницаемости пакетированного зернового материала при помощи разработанных нами установки и методики. Другой результат состоит в том, что для обеспечения качества измерений диэлектрической проницаемости следует обеспечивать плотную упаковку зерновых. Как следствие, мелкое, плотно пакуемое зерно представляется предпочтительным с точки зрения надежности экспериментальных данных. Перспективным также представляется разработка более сложной методики измерений и обработки данных, позволяющих исключить влияние воздушных зазоров, упаковки и иных паразитных факторов подобной природы. Кроме того, развитие наших исследований видится в более полной автоматизации, в частности, осуществлении измерений емкости при помощи современных компьютеров и входящих в их состав средств оцифровки данных. Обозначенные направления представляются предметом последующей разработки и апробации.

Список литературы

1. Цымбалова В.М. Диэлектрическая проницаемость зерновых культур: принцип определения и средства измерения [Текст] / В.М. Цымбалова, И.А. Хозяев // Студенческая наука XXI века: Материалы XI Междунар. студенч. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 1 нояб. 2016 г.) / Редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – №4 (11). – С. 140–144.

2. Цымбалова В.М. Диэлектрическая проницаемость зерновых культур: калибровка электрической части лабораторной установки [Текст] / В.М. Цымбалова, И.А. Хозяев // Приоритетные направления развития науки и образования: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 27 нояб. 2016 г.). В 2 т. Т. 2 / Редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – №4 (11). – С. 101–105.

3. Справочник по физике. Диэлектрическая проницаемость веществ. Магнитная проницаемость вещества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nanomil.ru/>