



Диэлектрические потери при термической обработке дисперсных сред

© М.Ю. Бузунова

*Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,
Иркутский район, п. Молодежный, Россия*

Резюме: Цель – изучение зависимости диэлектрических потерь механоактивированных зерновых культур (на примере пшеницы) при термической обработке от частоты внешнего электрического поля и температуры; исследование влияния размерности частиц мелкодисперсных образцов зерна на его электрофизические характеристики и диэлектрические потери. Экспериментальные образцы дисперсных систем с размерами частиц в интервале от 50 до 1000 μm подготовлены методом механоактивации. Измерения температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь проводились диэлектрическим методом в широком диапазоне частот. Исследована зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ механоактивированных образцов пшеницы с разной величиной степени дисперсности частиц в широком диапазоне температуры от 20°C до 250°C со скоростью нагрева 0,7 град/мин. Выявлено, что диапазон вариации частоты внешнего электрического поля расположен в интервале от 25 Гц до 10⁶ Гц. Измерения электрической емкости и проводимости проведены с помощью измерителя иммитанса E7-20 и специально сконструированной измерительной ячейки. Проведен расчет диэлектрических характеристик. Экспериментальные данные представлены в виде графиков и диаграмм. Установлена корреляция тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от частоты внешнего электрического поля и температуры, наиболее характерно выраженная для мелкодисперсных образцов. Показано, что высокой электрической активностью обладают самые мелкодисперсные образцы с размером частиц менее 50 мкм. Возрастание диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь наиболее заметно при частотах ниже 100 Гц. Исследование диэлектрических характеристик позволяет подобрать эффективный энергосберегающий режим сушки изучаемой культуры.

Ключевые слова: дисперсность, механоактивация, диэлькометрия, пшеница, диэлектрические потери, температура

Для цитирования: Бузунова М.Ю. Диэлектрические потери при термической обработке дисперсных сред. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1223–1231. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1223-1231>

Dielectric losses under heat treatment of dispersed media

Marina Yu. Buzunova

*Irkutsk State University of Agriculture named after A.A. Ezhevsky,
Molodezny Settlement, Irkutsk region, Russia*

Abstract: The purpose of the paper is to study the dependence of dielectric losses of mechanically activated grain crops on example of wheat under heat treatment on temperature and external electric field frequency as well as to examine the effect of particle size of fine grain samples on grain electrophysical characteristics and dielectric losses. Experimental samples of dispersed systems with particle sizes in the range from 50 to 1000 μm are prepared by the method of mechanical activation. The temperature dependence of the dielectric loss angle tangent is measured using the dielectric method over a wide frequency range. The dependence of the dielectric loss angle tangent $\text{tg}\delta$ of mechanically activated wheat samples with the different degrees of particle dispersion in a wide temperature range from 20°C to 250°C with a heating rate of 0.7 deg/min is studied. It is found out that the external electric field frequency varies in the range from 25 Hz to 10⁶ Hz. Electric capacitance and conductivity are measured using an E7-20 immitance meter and a specially designed measuring cell. Dielectric characteristics are calculated. Experimental data are presented in the form of graphs and diagrams. We have determined the correlation of the tangent of the dielectric loss angle $\text{tg}\delta$ with the frequency of the external electric field and temperature, which is most characteristic for fine samples. The most finely dispersed samples with a particle size of less than 50 microns are shown to have high electrical activity. Increase in the dielectric permittivity and the tangent of the dielectric loss angle is most noticeable at the frequencies below 100 Hz. The study of dielectric

characteristics allows to choose an effective energy-saving drying mode of the crop under study.

Keywords: dispersion, mechanoactivation, dielectrometry, wheat, dielectric losses, temperature

For citation: Buzunova MYu. Dielectric losses under heat treatment of dispersed media. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1223–1231. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1223-1231>

ВВЕДЕНИЕ

Главная роль сегодня в решении стратегической задачи энергообеспечения населения страны отводится решению актуальных вопросов энергосбережения, в том числе при проведении сушки и термообработки сельскохозяйственной продукции. Совершенствованию методов обработки и оптимизации процессов сушки зерна сегодня принадлежит значимая роль, так как эти процессы весьма энергозатратны. Самая важная технологическая операция заключается в обработке полученного урожая зерна, и решать ее нужно с учетом проблемы экономии энергоресурсов и подбора оптимальных условий хранения. При этом необходимо учитывать, что зерно обладает рядом уникальных физических свойств, определяющих его качество и длительность хранения¹. Все теплофизические характеристики зерна зависят от влажности, температуры и частоты внешнего электрического воздействия². Вариации влажности влекут за собой изменение физических свойств дисперсной среды, рассматриваемых в настоящей работе на примере механоактивированной пшеницы, и всех электрофизических показателей соответствующей среды: электропроводности σ , диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ [1–4].

Диэлектрические свойства зерновых культур используют для определения их влажности. В работе описаны диэлектрические свойства зерна и установлено, что диэлектрическая постоянная возрастает с увеличением содержания влаги и уменьшением частоты, а тангенс угла потерь и коэффициент потерь могут увеличиваться или уменьшаться с изменением этих двух переменных, в зависимости от диапазона каждого из них.

Разработана математическая модель для расчета диэлектрической проницаемости пшеницы, по которой можно рассчитать диэлектрические потери, в широком диапазоне частот от 5 МГц до 12 ГГц при различной степени влажности зерна от 3% до 24% на основе измерений диэлектрических свойств [5]. Значительное влияние на электрофизические свойства зерна оказывает температура, что связывается с изменениями содержания и количества воды, поглощенной зерном. Сушка зерна, помимо влияния на ферментативную деятельность, серьезно влияет на белковый состав зерновых культур, и при температуре выше 60°C начинается денатурация белка.

Диэлектрические свойства зерновых культур в зависимости от величины дисперсности частиц, частоты внешнего электрического поля и величины температурного воздействия исследованы в работах [4, 6–11]. Экспериментально установлено, что мелкодисперсные механоактивированные зерновые обладают неоднородными физическими свойствами, которые зависят от величины площади удельной поверхности частиц дисперсной среды, температуры и частоты. При несоблюдении температурно-влажностного режима зерно может «гореть», а объяснить этот факт можно возникновением в мелкодисперсной гетерогенной неравновесной среде микростимулированных токов при отсутствии внешнего напряжения [5, 6].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель настоящей работы состоит в исследовании электрофизических свойств неоднородной гетерогенной дисперсной среды на примере мелкодисперсных образцов пшени-

¹Карпов Б.А. Технология послеуборочной обработки и хранения зерна. М.: Агропромиздат, 1987. 288 с.

²Личко Н.М. Технология переработки продукции растениеводства. М.: Колос, 2008. 616 с.

цы с разной величиной фракций от 50 до 1000 μm . Эксперимент проведен в широком диапазоне изменения частоты внешнего электрического поля от 25 Гц до 10^6 Гц и температуры от 20°C до 250°C со скоростью нагрева 0,7 град/мин, в целях установления зависимости электрофизических характеристик от степени дисперсности частиц, частоты и температуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследована зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ механически активированных образцов пшеницы при варьировании величины дисперсности частиц в широком диапазоне температур и частот внешнего электрического поля. Основным методом исследования диэлектрических потерь при термической обработке зерна в настоящей работе являлся метод диэлькометрии [8–10], позволяющий провести анализ молекулярной структуры исследуемой среды посредством измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Экспериментальные образцы пшеницы подготовлены в результате процесса механической активации, в ходе которой получены дисперсные системы с размерами частиц в интервале от 50 до 1000 μm^3 .

Для измерения электрической емкости, расчета диэлектрических параметров: диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь, а также их температурной и частотной зависимости $\text{tg}\delta$ применялся диэлектрический метод [7, 8, 10]. Экспериментальные данные получены с помо-

щью измерителя иммитанса E7-20 (рис. 1) и специально сконструированной измерительной ячейки (плоского конденсатора с диаметром 21 мм и алюминиевыми электродами). Механоактивированные образцы зерна непрерывно квазистационарно нагревали в диапазоне от 20°C до 250°C со скоростью 0,7 град/мин. Температуру образцов измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Используются электроды круглой формы диаметром 21 мм. Относительная диэлектрическая проницаемость образцов рассчитана как отношение емкости конденсатора с веществом к емкости конденсатора без вещества. Диэлектрические потери рассчитаны по формуле:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \text{tg}\delta. \quad (1)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь определяли через частоту ν , электрическую емкость C и проводимость G уравнением:

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega RC} = \frac{G}{2\pi\nu C}. \quad (2)$$

Емкостный метод исследования электронной структуры и молекулярных взаимодействий, применяемый в данной работе, основан на изучении процесса поляризации, происходящего в полярном диэлектрике под действием внешнего поля. Основными параметрами, характеризующими диэлектрик, являются: диэлектрическая проницаемость, исследованная для зерновых культур в работах [6, 8, 11], и угол диэлектрических потерь δ , дополняющий угол φ сдвига фаз между током и напряжением до 90°. Общепринято считать,



Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения электрофизических характеристик
Fig. 1. Experimental installation for measuring electrophysical characteristics

³Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.

что под диэлектрическими потерями понимается часть электрической энергии, переходящая в тепло при переменном напряжении. Данные потери обусловлены электрической проводимостью и медленно устанавливающейся поляризацией, вызывающими нагрев исследуемых образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент по измерению электрической емкости и полной проводимости образцов пшеницы проводился в диапазоне частот от 25 до 10^6 Гц цифровым измерителем иммитанса напряжения E7-20 с точностью измерения электроемкости 0,2 пФ и электропроводности 1 пСм. Полученные экспериментальные данные передавались для обработки в персональный компьютер с помощью аналого-цифрового преобразователя, затем проводились расчеты электрофизических параметров общеизвестными статистическими методами и представлялись в виде графиков и диаграмм. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для получения частотной и температурной зависимости электрофизических характеристик.

Эксперимент по изучению электрофизических свойств мелкодисперсных образцов дисперсной среды на примере пшеницы проводился диэлькометрическим методом [7, 8] при вариации температуры от 20°C до 250°C и в частотном диапазоне от 25 Гц до 10^6 Гц. При повышении температуры исследуемая мелкодисперсная среда механоактивированной пшеницы с пространственно-неоднородным распределением зарядов получает дополнительный запас энергии, влияющий на ее электрофизические свойства.

На рис. 2 представлена температурная зависимость тангенса диэлектрических потерь для образцов пшеницы с разной степенью измельчения на частоте 100 Гц. В низкотемпературной области ϵ' и $tg\delta$ возрастают, межмолекулярные силы ослабевают и способствуют более свободному повороту диполей в электрическом поле. Экспериментальные образцы зерна можно рассматривать как полярный диэлектрик, имеющий соответствующий максимум для ϵ' и $tg\delta$, обусловленный ростом температуры. Возрастание значения тангенса угла диэлектрических потерь с ростом температуры, наблюдаемое в

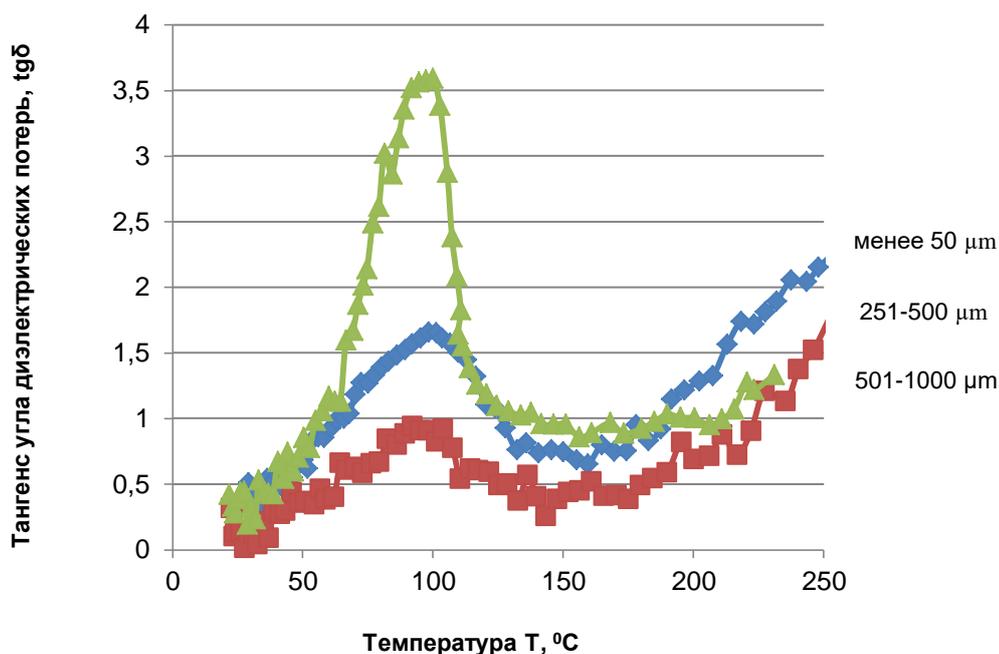


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов пшеницы дисперсностью: 501–1000 мкм, 251–500 мкм и менее 50 мкм

Fig. 2. Dependence of the dielectric loss angle tangent on temperature for wheat samples with a dispersion of 501–1000 мкм, 251–500 мкм and less than 50 мкм



изучаемой гетерогенной среде, связано с процессами десорбции молекул воды из мелкозернистых зерен пшеницы в результате их сушки. При нагреве возрастает подвижность диполей, они проще ориентируются в электрическом поле, что приводит к росту ϵ' и $tg\delta$. При последующем возрастании температуры происходит рост кинетической энергии теплового движения диполей и, в результате броуновского движения, постепенное разрушение их ориентации.

В результате при приближении температуры к 100°C и диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь уменьшаются, что соответствует данным исследований, представленных в работах [6, 9].

Анализ рис. 2 показывает, что для образца 1 с максимальным размером частиц от 500 до 1000 μm максимальное значение $tg\delta = 0,94$ соответствует $T = 92^\circ\text{C}$, для образца 2 с размерностью частиц 251–500 μm $tg\delta = 1,65$ при $T = 98,2^\circ\text{C}$, а для образца 3 с наименьшей степенью дисперсности частиц $tg\delta = 3,59$ при $T = 99,0^\circ\text{C}$. В близкой к $161\text{--}168^\circ\text{C}$ области температуры наблюдается второй весьма незначительный максимум, очевидно связанный с разрушением структуры твердой компоненты. В указанном интервале температур происходит разрушение структуры исследуемых образцов и зерно постепенно «сгорает». В результате эксперимента получено, что образец с самым мелким размером частиц менее 50 μm в интервале исследуемых температур и частот от 25 до 10^6 Гц обладает большей диэлектрической проницаемостью и большими диэлектрическими потерями по сравнению с другими образцами с большим размером частиц. Данный факт также можно связать с ростом площади удельной поверхности более мелкозернистых образцов [9, 11, 12]. В области температуры от $109,6^\circ\text{C}$ до $189,9^\circ\text{C}$ различия в диэлектрических параметрах у образцов с дисперсностью частиц 251–500 μm и 50 μm сглаживаются. У наиболее крупнозернистого образца с частицами 501–1000 μm зависимость имеет преимущественно выраженный вид, что можно связать с увеличением поляризованности образцов и ослаблением сил, препятствующих ориентации доменов [6]. По-

лученные при проведении измерений спектры диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь демонстрируют типичное поведение релаксационных структур и полярных диэлектриков в электрическом поле.

На рис. 3 представлена температурная зависимость тангенса угла потерь при различных частотах для образца с дисперсностью 501–1000 μm .

Анализ результатов говорит о значимом влиянии частоты внешнего электрического поля на диэлектрические параметры образцов зерна, особенно заметном при низких частотах от 25 до 100 Гц: при частотах выше 500 Гц уменьшаются диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. Уменьшение действительной компоненты диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ при возрастании частоты внешнего электрического поля связывается с вырождением дипольно-ориентационной поляризации в исследуемых разупорядоченных системах. При увеличении частоты внешнего электрического поля длина пробега ионов за полупериод колебаний, кинетическая энергия и вероятность столкновения иона со структурными единицами материала понижаются. Поэтому при росте частоты электрического поля диэлектрические потери снижаются.

На кривых $tg\delta = f(T)$ наблюдаются также отличительные особенности, соответствующие увеличению $tg\delta$ при повышении температуры выше 170°C , особенно явно выраженные для области низких частот. Очевидно, в области высоких температур для диэлектрика сложного состава на частоте менее 100 Гц, в связи с разрушением структуры вещества и его «сгоранием», происходит резкое увеличение диэлектрических потерь. В результате анализа данных эксперимента можно сделать вывод о том, что при увеличении частоты внешнего электрического поля длина пробега ионов за полупериод колебаний, их кинетическая энергия и вероятность столкновения со структурными единицами материала уменьшаются. В связи с этим при росте частоты электрического поля диэлектрические потери понижаются.

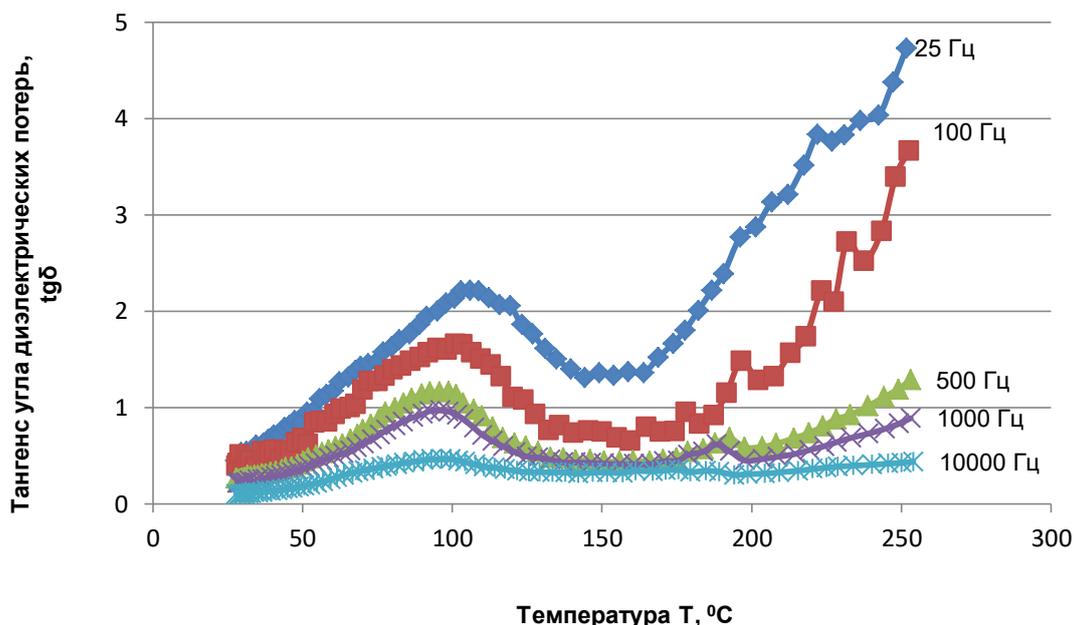


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для образцов пшеницы дисперсностью 501–1000 мкм для различных частот: 25 Гц, 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц и 10000 Гц
Fig. 3. Dependence of the dielectric loss angle tangent on temperature for wheat samples with a dispersion of 501–1000 μm for various frequencies: 25 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz and 10000 Hz

В результате эксперимента установлено, что тангенс угла диэлектрических потерь мелкогазразмерной механоактивированной дисперсной среды на примере зерновых культур (пшеницы) в исследуемом интервале температур от 20 °C до 250 °C имеет максимум при температуре близкой к 96–103 °C. Анализ данных эксперимента подтверждает сложный порядок в расположении атомов исследуемой гетерогенной неравновесной мелкодисперсной среды и наличие электрических зарядов на ее дефектах, роль которых могут играть трещины и сколы зерна [12–18]. Механизм межфазного кулоновского взаимодействия на границе раздела заряженных кристаллических дефектов и молекул воды описан в работе [19]. Исследование электрофизических свойств дисперсных сред играет важную роль и в моделировании процесса сушки дисперсных материалов, в том числе зерновых [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить наличие устойчивой корреляции диэлектрических параметров неоднородной гетерогенной среды на примере мелкодис-

персных образцов пшеницы с частицами различных фракций от частоты внешнего электрического поля и температуры. В исследуемых разупорядоченных системах, в связи с вырождением дипольно-ориентационной поляризации и ростом частоты внешнего электрического поля, происходит значимое уменьшение тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Анализ спектров тангенса угла диэлектрических потерь позволил установить наличие более высокой электрической активности для экспериментальных образцов мелкогазразмерной структуры и возрастание диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, наиболее явно выраженное при частотах ниже 100 Гц.

Установлена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты внешнего электрического поля и температуры, особенно значимая для мелкодисперсных образцов пшеницы.

Анализ диэлектрических характеристик исследуемых образцов пшеницы позволяет подобрать эффективный энергосберегающий режим и оптимизировать процесс сушки механоактивированного зерна.



Список литературы

1. Джамбуршин А.Ш., Атыханов А.К., Сагындинова А.Ж. Интенсивный энергосберегающий метод сушки зерна // Наука и мир. 2014. Т. 1. № 10. С. 87–95. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22255165> (03.08.2020).
2. Макачук Н.О. Оценка теплового режима экструдера при грануляции отходов первичной обработки зерна // Молодежь XXI века: шаг в будущее: материалы XX Регион. науч.-практ. конф.: в 3 т. (г. Благовещенск, 23 мая 2019 г.). Благовещенск, 2019. Т. 3. С. 306–307.
3. Цымбалова В.М., Атаханов Р.В., Лаврентьев А.А. Экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости крупной продукции // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017): матер. V Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на Дону: 2017. С. 334–337.
4. Nelson S. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. London: Academic Press, 2005. 292 p.
5. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 421. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052032>
6. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant // Applied Physics and Cyber-Physical Systems. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022042>
7. Бузунова М.Ю. Исследование диэлектрических и структурных свойств мелкодисперсных гетерогенных систем на примере зерновых // Байкальский вестник ДААД. 2019. № 1. С. 124–129.
8. Бузунова М.Ю. Диэлектрическая дисперсия механоактивированных зерновых культур // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. Вып. 92. С. 25–32.
9. Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 244 с.
10. Ерошенко Г.П., Шаруев Н.К., Шаруев В.Н., Евстафьев Д.П. Особенности разработки электротехнических устройств контроля параметров сельскохозяйственных продуктов // Измерительная техника. 2018. № 10. С. 61–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65>
11. Будников Д.А., Цымбал А.А. Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3. С. 154–159.
12. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment // III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2020. Vol. 548. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052063>
13. Цымбал А.А., Будников Д.А. Диэлектрические свойства зерновых // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 4. С. 52–55.
14. Tanaev A.B., Shcherbachenko L.A., Bezrukova Y.V., Tsydyrov S.B., Buzunova M.Y., Baryshnikov D.S., et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 62. No. 3. P. 406–412. <https://doi.org/10.1134/S1063784217030239>
15. Щербаченко Л.А., Донской В.И., Шурыгина Н.А., Барышников Е.С., Ежова Л.И., Барышников Д.С. [и др.]. Структурно-фазовые переходы в дисперсных неоднородных системах при наличии электроконтактного взаимодействия разнородных компонентов // Вестник Бурятского государственного университета. 2012. № 3. С. 208–216.
16. Шурыгина Н.А., Щербаченко Л.А., Донской В.И., Карнаков В.А., Трошев А.А., Краснов Д.А. Электрические явления на межфазных границах в гетерогенных полиминеральных дисперсных системах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2012. № 1. С. 93–100.
17. Щербаченко Л.А., Цыдыпов Ш.Б., Безрукова Я.В., Карнаков В.А., Арская Л.И., Марчук С.Д. [и др.]. Накопление свободных электретных зарядов в мелкоразмерных электрически активных системах // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 1. С. 93–97.
18. Shcherbachenko L.A., Borisov V.S., Maksimova N.T., Baryshnikov E.S., Karnakov V.A., Marchuk S.D., et al. Electret effect and electrotransport in disperse organic and inorganic systems // Technical Physics. 2009. Vol. 54. No. 9. P. 1372–1379. <https://doi.org/10.1134/S1063784209090199>
19. Пат. № 136581 U1, Российская Федерация, G01N 27/60. Устройство для диагностики электрофизических свойств гетерогенных сред / Л.И. Ружников, Н.Т. Максимова, Л.А. Щербаченко; патентообладатель Иркутский государственный университет. Заявл. 12.08.2013; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1.
20. Щербаченко Л.А., Донской В.И., Карнаков В.А., Комаров Е.В., Трошин А.А., Барышников С.С. [и др.]. Фазовые и структурные переходы в микроразмерных водных пленках в неравновесных гетерогенных системах // Вестник Бурятского государственного университета. 2012. № 3. С. 202–208.

References

1. Dzhamburshyn ASH, Atyhanov AK, Sagyndykova AZ. Intensive energy saving method of grain drying. *Nauka i Mir = Science & World*. 2014;1(10):87–95. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22255165> [Accessed 3rd August 2020]. (In Russ.)
2. Makarchuk NO. Extruder thermal regime assessment under primary grain processing waste granulation. In: *Molodezh' XXI veka: shag v budushhee: materialy XX regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 3 tomah = Youth of the XXI Century: a Step into the Future: Proceedings of XX regional scientific and practical conference: in 3 volumes*. 23 May 2019, Blagoveshhensk. Blagoveshhensk; 2019, vol. 3, p. 306–307. (In Russ.)
3. Tsymbalova VM, Atakhanov RV, Lavrentiev AA. Experimental study of cereal product dielectric permittivity. In: *Innovacionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii (ITNO-2017): materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Innovative Technologies in Science and Education (ITSE-2017): Proceedings of V International scientific and practical Conference*. Rostov-on-Don; 2017, p. 334–337. (In Russ.)
4. Nelson S. *Dielectric properties of agricultural materials and their applications*. London: Academic Press; 2005, 292 p.
5. Buzunova MY, Bonnet VV. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;421(5). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052032>
6. Buzunova MY, Bonnet VV. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant. *Applied Physics and Cyber-Physical Systems. Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/2/022042>
7. Buzunova MYu. Investigation of dielectric structural properties of fine heterogeneous systems on the example of grain. *Bajkal'skij vestnik DAAD = Baikal letter DAAD*. 2019;1:124–129. (In Russ.)
8. Buzunova MY. Dielectric dispersion of mechanoactivated grain crops. *Vestnik Irkutskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Vestnik IrGSHA*. 2019;92:25–32. (In Russ.)
9. Gorohovskij JuA, Bordovskij GA. *Thermal activation current spectroscopy of high-resistance semiconductors and dielectrics*. Moscow: Nauka; 1991, 244 p. (In Russ.)
10. Eroshenko GP, Sharuev NK, Sharuev VN, Evstafyev DP. Design features electrical devices control parameters of agricultural products. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Technology*. 2018;10:61–65. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-10-61-65> (In Russ.)
11. Budnikov DA, Tsymbal AA. Dielectric properties of agricultural materials. *Innovacii v sel'skom hozjajstve*. 2016;3(18):154–159. (In Russ.)
12. Buzunova MYu, Bonnet VV. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment. In: *III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;548. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052063>
13. Tsymbal AA, Budnikov DA. The grain dielectric properties. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizacii zhivotnovodstva = Journal of VNIIMZH*. 2016;4:52–55. (In Russ.)
14. Tanaev AB, Shcherbachenko LA, Bezrukova YV, Tsydyrov SB, Buzunova MY, Baryshnikov DS, et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2017;62(3):406–412. <https://doi.org/10.1134/S1063784217030239>
15. Shcherbachenko LA, Donskoy VI, Shurigina NA, Barishnikov ES, Ezhova LI, Barishnikov DS, et al. Structural and phase transitions in dispersed heterogeneous systems in the presence of electric-interaction of heterogeneous components. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;3:208–216. (In Russ.)
16. Shourygina NA, Scherbachenko LA, Donskoy VI, Karnakov VA, Troshchikov AA, Krasnov DA. Electrical phenomena at interfaces in heterogeneous poly mineral systems dispersed. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki = St. Petersburg Polytechnic University Journal – Physics and Mathematics*. 2012;1:93–100. (In Russ.)
17. Shcherbachenko LA, Tsydyrov SB, Bezrukova YV, Karnakov VA, Arskaya LI, Marchuk SD, et al. Accumulation of free electret charges in small-sized electrically active systems. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika = Russian Physics Journal*. 2017;60–1:93–97. (In Russ.)
18. Shcherbachenko LA, Borisov VS, Maksimova NT, Baryshnikov ES, Karnakov VA, Marchuk SD, et al. Electret effect and electrotransport in disperse organic and inorganic systems. *Technical Physics*. 2009;54(9):1372–1379. <https://doi.org/10.1134/S1063784209090199>
19. Ruzhnikov LI, Maksimova NT, Shcherbachenko LA. *Diagnostic device for electrophysical properties of heterogeneous media*. Patent RF, no 136581 U1; 2014. (In Russ.)
20. Shcherbachenko LA, Donskoy VI, Karnakov VA, Komarov EV, Troshin AA, Baryshnikov SS, et al. Phase and structural transitions in microsized water films in disbalanced heterogeneous systems. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;3:202–208. (In Russ.)



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Бузунова Марина Юрьевна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования и физики,
Иркутский государственный аграрный университет
им. А.А. Ежевского,
664038, Иркутская область, Иркутский р-н,
п. Молодежный, 1/1, Россия;
✉ e-mail: bmirk@mail.ru

Заявленный вклад автора

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.10.20; одобрена после рецензирования 19.11.2020; принята к публикации 16.12.2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Marina Yu. Buzunova,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electrical Equipment and Physics,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhny settlement, Irkutsk region, Irkutsk district,
664038, Russia;
✉ e-mail: bmirk@mail.ru

Contribution of the author

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 06.10.20; approved after reviewing 19.11.2020; accepted for publication 16.12.2020.