



Научная статья/Research Article

УДК 664.717.001.5:537.314

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-199-204

Марина Юрьевна Бузунова^{1✉}, Андрей Владимирович Бастрон²

¹Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, пос. Молодежный, Иркутская область, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

¹bmirk@mail.ru

²abastron@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР

Цель исследования – изучение энергетических свойств зерновых культур и продуктов переработки зерна как одной из наиболее значимых культур, широко применяемых в пищевой промышленности. Как основной способ переработки рассмотрен метод механоактивации на примере тритикале, пшеницы и овса в широком диапазоне фракций исследуемых образцов. Задача: установить степень корреляции диэлектрических параметров механоактивированной зерновой среды с основными структурными характеристиками (размером частиц) для широкого диапазона вариаций частоты внешнего электрического воздействия от 40 Гц до 1 кГц. Проведены экспериментальные измерения основных электрофизических параметров для серии образцов зерновых (пшеницы, тритикале и овса) при различной степени измельчения исходного продукта от 40 до 1000 мкм. Предложен алгоритм расчета диэлектрической проницаемости и энергетических потерь (тангенса угла диэлектрических потерь) на основе данных по измерению электрической емкости и проводимости. Эксперимент проведен при помощи измерителя иммитанса напряжения E7-20 и ячейки в виде плоского конденсатора. Рассмотрена взаимозависимость диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса диэлектрических потерь $\tan\delta$ с размером перемолотых частиц зерна. Обосновано существование устойчивой корреляции энергетических свойств переработанного методом механоактивации в широком частотном диапазоне зерна, как образца мелкодисперсной среды, со степенью измельчения (размером частиц). Наиболее энергетически активными являются образцы мелкодисперсного овса с наименьшим размером фракций. Наименее ярко выражена зависимость энергетических свойств от степени помола для пшеницы, однако при повышении частоты она значительно сглаживается. Тритикале по всем исследуемым характеристикам занимает промежуточное положение между овсом и пшеницей.

Ключевые слова: переработка злаковых культур, злаки, пшеница, тритикале, овес, энергетическая ценность злаковых культур, диэлектрические параметры, механоактивация

Для цитирования: Бузунова М.Ю., Бастрон А.В. Исследование энергетических характеристик продуктов переработки злаковых культур // Вестник КрасГАУ. 2025. № 3. С. 199–204. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-199-204.

Marina Yurievna Buzunova^{1✉}, Andrey Vladimirovich Bastron²

¹Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny settlement, Irkutsk Region, Russia

²Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹bmirk@mail.ru

²abastron@yandex.ru

THE STUDY OF CEREAL PROCESSING PRODUCTS ENERGY CHARACTERISTICS

The aim of the study is to investigate the properties of grain crops and grain processing products, as one of the most significant crops widely used in the food industry. The main processing method is the mechanical activation method based on triticale, wheat and oats in individual fractions of the corresponding samples. The task is to establish the degree of compliance of the dielectric parameters of the mechanically activated grain medium with unstable structural characteristics (particle size) for a wide range of fluctuations in the variable frequency of external action from 40 Hz to 1 kHz. Experimental measurements of the main electrophysical parameters for a series of grain samples (wheat, triticale and oats) are given at different degrees of grinding of the original product from 40 to 1000 μm . An algorithm for calculating permittivity and energy losses (dielectric loss tangent) based on the data on measuring the electrical capacity and conductivity is proposed. The experiment was conducted using an E7-20 immittance voltage meter and a cell in the form of a flat capacitor. The interdependence of permittivity ϵ and dielectric loss tangent $\text{tg}\delta$ with the size of ground grain particles is considered. The existence of a stable correlation between the energy properties of grain processed by the method of mechanical activation in a wide frequency range, as a sample of a finely dispersed medium, and the degree of grinding (particle size) is substantiated. The most energetically active are samples of finely dispersed oats with the smallest fraction size. The dependence of energy properties on the degree of milling is least pronounced for wheat, but with increasing frequency it is significantly smoothed out. Triticale occupies an intermediate position between oats and wheat in all the studied characteristics.

Keywords: processing of cereal crops, cereals, wheat, triticale, oats, energy value of cereal crops, dielectric parameters, mechanical activation

For citation: Buzunova MY, Bastron AV. The study of cereal processing products energy characteristics. *Bulletin of KSAU*. 2025;(3):199-204. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-199-204.

Введение. Зерно и продукция его переработки составляют основу стратегического запаса пищевых продуктов нашей страны. Регулярное пополнение зернового фонда является неотъемлемым пунктом долгосрочной программы совершенствования зернового комплекса в целях реализации продовольственной безопасности РФ. Согласно Федеральной научно-технической программе развития сельскохозяйственной отрасли на период до 2030 г., процент посева зерновых культур в общем объеме посадок на территории РФ к 2031 г. должен увеличиться до 91 %. Учитывая вышеизложенное, вопросы качества зернового фонда, напрямую определяющего будущий урожай и развитие методик его переработки, сегодня весьма актуальны [1, 2]. Решение этих вопросов невозможно без рассмотрения агроэкологических основ семеноводства и селекции с учетом внедрения основных элементов агротехники [3, 4]. При этом урожайность зерновых взаимосвязана как с качеством предпосевной

обработки, в том числе при помощи одного из традиционных методов (СВЧ-воздействия) [5], так и с вариациями основных гелиогеофизических параметров (количеством осадков, потоком солнечного излучения, тепловым режимом), определяемых в т. ч. конфигурацией ионосферных слоев [6]. Качество зерна, его структурно-компонентный состав, напрямую зависящие от условий и региона выращивания и хранения, влияют также на его энергетические свойства.

При проведении качественной оценки продукции переработки зерновых культур применяются различные методики, рассмотрению которых посвящен ряд публикаций [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа энергетических свойств семейства злаковых путем исследования вариаций диэлектрической проницаемости ϵ , и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, рассчитанных на основе данных измерений электрической емкости C и электропроводности G .

Отмечено наличие взаимосвязи между степенью измельчения исследуемых образцов и их «энергетикой». Результаты исследований могут быть рассмотрены при реализации методик переработки зерновых в целях повышения энергетической ценности для последующего применения как в пищевой промышленности, так и в сельском хозяйстве в качестве кормовой базы.

Цель исследования – изучение энергетических свойств зерновых культур и продуктов переработки зерна методом механоактивации на примере пшеницы, тритикале и овса в широком диапазоне фракций исследуемых образцов; сравнение и анализ энергетических свойств основных представителей семейства мятликовых на примере тритикале, пшеницы, и овса.

Задачи: установить степень корреляции энергетических свойств зерновой среды с основными структурными характеристиками (размером частиц) для широкого диапазона частот.

Объекты и методы. В качестве основного объекта исследования предложена мелкодисперсная фракция механоактивированных злаковых культур основных представителей семейства мятликовых (пшеницы, тритикале и овса). При проведении эксперимента применялось районированное для Восточно-Сибирского региона зерно, выращенное на полях Иркутской области. При помощи высокоточного прибора Pulverisette 5 получены контрольные образцы при вариации степени измельчения. Исследовано 30 образцов (по 10 для каждой культуры). Степень помола варьирует от 1000 до 50 мкм. Получено 5 контрольных групп с различным размером частиц: I группа – 1000–500 мкм; II группа – 500–250; III группа – 250–100; IV группа – от 100 до 50; V группа – самый минимальный размер частиц менее 50 мкм. В работе в качестве примера при-

ведены данные измерений для III группы образцов, учитывая тот факт, что образцы III–V групп обладают наиболее оптимальными значениями всех исследуемых характеристик.

Контрольные данные по основным параметрам исследования получены при помощи измерителя иммитанса напряжения E7-20 и созданной авторами конструкции в виде цилиндрической ячейки, являющейся аналогом плоского конденсатора. В ячейку помещали перемолотые образцы зерновых. Проведены измерения параметров C и G, на основе которых затем при помощи общеизвестных формул проведен расчет диэлектрической проницаемости ϵ и диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Электрическая экспериментальная схема описана в работе [6]. Данные по C и $\text{tg}\delta$ получены в диапазоне частот от 40 до 10^6 Гц при $T^\circ = 23^\circ\text{C}$. Влажность зерна при проведении эксперимента составила 13,5 %.

Механоактивация повышает энергетику зерновой среды путем нарушения структуры среды и появления на его поверхности неоднородностей, впитывающих воду [7]. Основным методом исследования является метод диэлькометрии [8, 9], при помощи которого авторы изучают температурно-частотные вариации основных параметров зерна с учетом диэлектрических потерь [10–12]. Измельченное зерно с физической точки зрения рассматривают как полярный диэлектрик с электрически активной поверхностью твердых частиц и упорядоченной ориентацией молекул водных пленок.

Результаты и их обсуждение. Данные измерений C и G для вышеотмеченных 30 образцов зерна заносились в базу ПК, по ним проведен расчет ϵ и $\text{tg}\delta$. На рисунке 1 представлена связь ϵ с частотой ν при вариации степени помола.

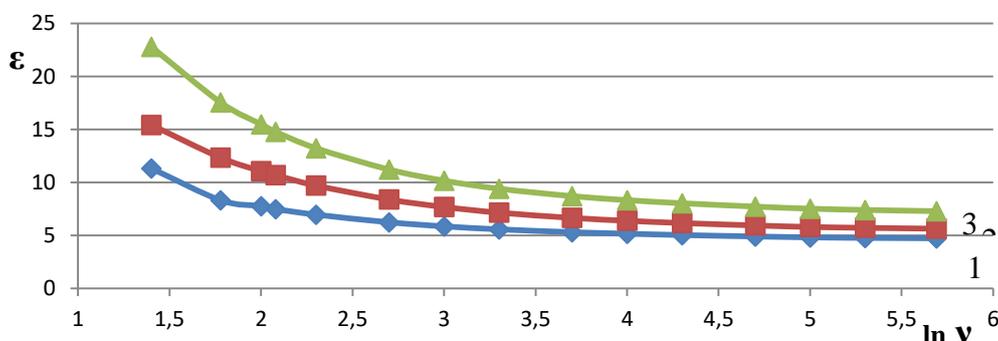


Рис. 1. Вариации диэлектрической проницаемости: 1 – для пшеницы; 2 – тритикале; 3 – овса (для фракции с размером 100 до 250 мкм в зависимости от частоты)

Variations in dielectric constant: 1 – for wheat; 2 – triticale; 3 – oats (for fractions with a size of 100 to 250 microns, depending on the frequency)

Прослеживается наличие значимой энергетической активности у овса, диэлектрическая проницаемость которого равна 22,78 при частоте 50 Гц. Тритикале занимает по всем параметрам промежуточное значение между овсом с $\epsilon = 15,4$ и пшеницей с $\epsilon = 11,3$. Анализ измерений и расчетов показывает значимое уменьшение ϵ на высоких частотах в среднем до трех раз, при этом различия по ϵ для всех трех культур становятся фактически незаметны. Аналогичная зависимость имеет место для диэлектрических потерь в исследуемой зерновой среде, выражается в уменьшении $\text{tg}\delta$ в исследуемом диапазоне частот. Максимальные значения

диэлектрические потери имеют на низких частотах. В области низких частот 40–60 Гц $\text{tg}\delta$ изменяется в среднем до 2,2 раз и для овса равен 0,85, для тритикале 0,58, для пшеницы 0,38. Таким образом, по величине диэлектрических потерь лидирует овес, затем ячмень, и минимальные значения имеет пшеница. При повышении частоты вышеотмеченная тенденция сглаживается, $\text{tg}\delta$ значительно уменьшается, и итоговое различие для исследуемых культур составляет не более 10 %. Данные вариации возможно объяснить нарушением дипольной ориентации молекул при воздействии высокочастотным полем, разрушающим структуру зерновой среды.

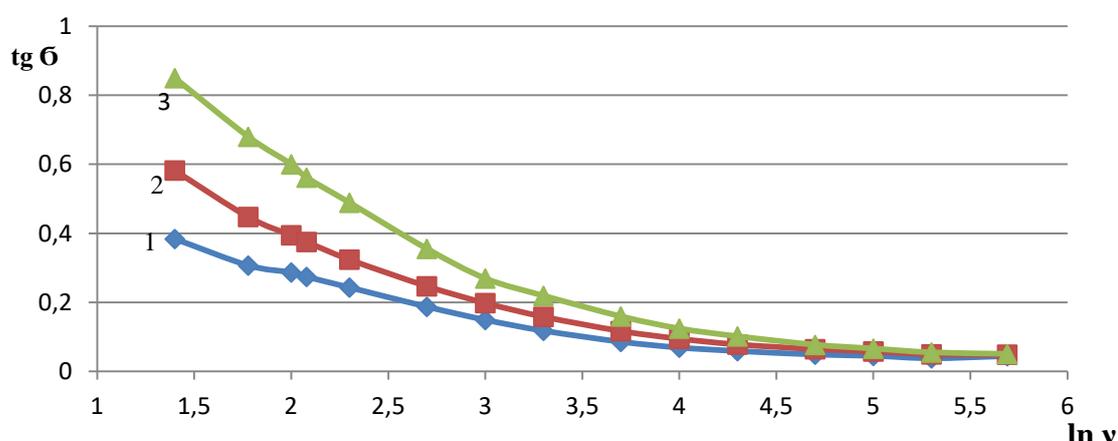


Рис. 2. Итоговая зависимость диэлектрических потерь от частоты: 1 – для пшеницы; 2 – тритикале; 3 – овса (с размером фракции от 100 до 250 мкм)

The final dependence of dielectric losses on frequency: 1 – for wheat; 2 – triticale; 3 – oats (with a fraction size from 100 to 250 microns)

Заключение. Анализ экспериментальных данных позволяет обосновать существование устойчивой корреляции энергетических свойств переработанного методом механоактивации в широком частотном диапазоне зерна, как образца мелкодисперсной среды, со степенью измельчения (размером частиц). Наиболее энергетически активными являются образцы мелкодисперсного овса с наименьшим размером фракций.

Наименее ярко выражена зависимость энергетических свойств от степени помола для пшеницы. Применение предложенной методики позволяет рассмотреть вопросы оптимизации энергетической ценности продуктов питания на основе зерновых и может оказаться полезным при решении актуальных вопросов энергосбережения, переработке и сушке зерновой продукции.

Список источников

1. Иванов Б.И. Современные методы переработки зерна и их эффективность // Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО 2023»): сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. с. Дивноморское, 4–10 сентября 2023 г. Ростов н/Д.: ДГТУ-ПРИНТ, 2023. С. 173–175. DOI: 10.23947/itse.2023.173-175. EDN: JFEJBX.
2. Сизова Ю.В., Борисова Е.Е., Шуварин М.В. Переработка зернового сырья // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2023. № 2 (73). С. 35–38. EDN: DNGNNM.

3. Хуснидинов Ш.К., Кудрявцева Т.Г., Крутиков Г.А., и др. Агроэкологические основы селекции и семеноводства полевых культур в Предбайкалье. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2005. 415 с. EDN: ZLDXHT.
4. Дмитриев Н.Н., Солодун В.И., Султанов Ф.С., и др. Актуальные приемы адаптивной агротехники полевых культур для устойчивого развития земледелия в Иркутской области: научно-практические рекомендации. Иркутск: Мегапринт, 2019. 232 с. EDN: XKBBHP.
5. Исаев А.В., Бастрон А.В. Разработка установки для посева семян с предварительной обработкой в СВЧ-поле // Вестник КрасГАУ. 2015. № 9 (108). С. 155–158. EDN: UJKGJP.
6. Бузунова М.Ю., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. Пространственно-временные вариации вероятности существования и степени развития слоя F1 // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1986. № 75. С. 54–58. EDN: HPGGBY.
7. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 421. DOI: 10.1088/1755-1315/421/5/052032. EDN: HLNCOY.
8. Tanaev A.B., Shcherbachenko L.A., Bezrukova Y.V., 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. 62-3. P. 406–412. DOI: 10.1134/S1063784217030239. EDN: YVOJOR.
9. Nelson S.O. Dielectric spectroscopy in agriculture // Journal of Non-Crystalline Solids. 2005. Vol. 351, № 33-36 (spec. iss). P. 2940–2944. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2005.04.081. EDN: KFXTUR.
10. Будников Д.А., Цымбал А.А. Диэлектрические свойства сельскохозяйственных материалов // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3 (18). С. 154–159. EDN: WGYHJB.
11. Buzunova M.Yu., Bonnet V.V. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022042. EDN: SHSZKB.
12. Buzunova M.Y., Bonnet V.V. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 18–20 June 2020. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 548. Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52063. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052063. EDN: GILLSI.

References

1. Ivanov BI. Modern methods of grain processing and their effectiveness. In: Collection of scientific papers of the XI international scientific and practical conference «Innovative technologies in science and education» («ITSE 2023» conference) using remote technologies. Divnomorskoye, September 4–10, 2023. Rostov-on-Don, 2023. (In Russ.). DOI: 10.23947/itse.2023.173-175. EDN: JFEJBX.
2. Sizova YV, Borisova EE, Shuvarin MV. Processing of grainraw materials. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2023;(2): 35-38. (In Russ.). EDN: DNGNNM.
3. Husnidinov ShK, Kudryavceva TG, Krutikov GA, et al. *Agroekologicheskie osnovy selekcii i semenovodstva polevyh kul'tur v Predbaikal'e*. Irkutsk: Irkutskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. A.A. Ezhevskogo, 2005. 415 p. (In Russ.). EDN: ZLDXHT.
4. Dmitriev NN, Solodun VI, Sultanov FS, et al. *Aktual'nye priemy adaptivnoj agrotekhniki polevyh kul'tur dlya ustojchivogo razvitiya zemledeliya v Irkutskoj oblasti: nauchno-prakticheskie rekomendacii*. Irkutsk: Megaprint, 2019. 232 p. (In Russ.). EDN: XKBBHP.
5. Isaev AV, Bastron AV. Development of the installation for seed planting with preliminary processing in microwave field. *Bulletin of KSAU*. 2015;(9):155-158. (In Russ.). EDN: UJKGJP.
6. Buzunova MYu, Suhodol'skaya VE, Ivel'skaya MK. *Prostranstvenno-vremennye variacii veroyatnosti sushchestvovaniya i stepeni razvitiya sloya F1. Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solnca*. 1986;(75):54-58. (In Russ.). EDN: HPGGBY.

7. Buzunova MYu, Bonnet VV. Mechanism of thermally stimulated current occurrence in fine heterogeneous medium on the example of grain crops. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 421. DOI: 10.1088/1755-1315/421/5/052032. EDN: HLNCOY.
8. Танаев АВ, Шчербаченко ЛА, Безрукова ЮВ, et al. Peculiarities of the accumulation and transport of electret charges in fine-sized disordered structures due to internal voltage. *Technical Physics*. 2017;62(3):406-412. DOI: 10.1134/S1063784217030239. EDN: YVOJOR.
9. Nelson SO. Dielectric spectroscopy in agriculture. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2005;351(33-36, spec. iss.):2940-2944. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2005.04.081. EDN: KFXTUR.
10. Budnikov DA, Cymbal AA. Dielektricheskie svojstva sel'skohozyajstvennykh materialov. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016;(3):154-159. (In Russ.). EDN: WGYHJB.
11. Buzunova MYu, Bonnet VV. Temperature condition influence analysis on the mechanoactivated wheat dielectric constant. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1515:022042. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022042. EDN: SHSZKB.
12. Buzunova MY, Bonnet VV. Dielectric losses of mechanically activated grain crops during heat treatment. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies*. Volgograd, Krasnoyarsk, 18–20 June 2020. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 548. Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52063. DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052063. EDN: GILLSI.

Статья принята к публикации 20.11.2024 / The article accepted for publication 20.11.2024.

Информация об авторах:

Марина Юрьевна Бузунова¹, доцент кафедры электрооборудования и физики, кандидат физико-математических наук, доцент

Андрей Владимирович Бастрон², заведующий кафедрой электроснабжения сельского хозяйства, кандидат технических наук, доцент

Information about the authors:

Marina Yurievna Buzunova¹, Associate Professor at the Department of Electrical Equipment and Physics, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent

Andrey Vladimirovich Bastron², Head of the Department of Agricultural Power Supply, Candidate of Technical Sciences, Docent

