

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.53.027.2:633.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-47-53>

Обогащение зерна пшеницы негемовым железом посредством ультразвуковой кавитации

А.В. Чжан¹, Н.М. Ничкова^{2✉}, А.М. Воротынов³, Н.А. Дрокин⁴, М.А. Янова⁵^{1,2,5} Красноярский государственный аграрный университет; г. Красноярск, Россия² Иркутский государственный университет путей сообщения. Красноярский институт железнодорожного транспорта; г. Красноярск, Россия^{3,4} Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; г. Красноярск, Россия¹ avchz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2978-1691>² nichkova_nm@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0003-1823-5687>³ sasa@iph.krasn.ru⁴ drokin@iph.krasn.ru⁵ yanova.m@mail.ru

Аннотация. Зерна пшеницы являются ценным и наиболее потребляемым продуктом питания, поэтому их обогащение ионами железа позволит восполнить дефицит этого микроэлемента в организме человека. С целью обогащения зерен пшеницы негемовым железом (Fe^{3+}) провели их ультразвуковую обработку в растворе сульфата железа. Насыщение зерна железом проводили на ультразвуковой установке Vitek VBS-6D при частоте 40 кГц. Зерна пшеницы погружали в ванну с раствором сульфата железа в пропорции 1:3. Продолжительность обработки варьировали от 10 до 30 мин с шагом 5 мин. Таким образом, получили 5 образцов. В качестве контроля выбрали образец с наименьшим временем ультразвуковой обработки. Качественную и количественную оценку результатов кавитационной обработки зерна проводили с помощью физических методов анализа – таких, как электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и электрический импеданс. Спектры получили на спектрометре Bruker Elexsys E580 в X-диапазоне. Из анализа спектров ЭПР исследуемых образцов сделали вывод о том, что с увеличением времени ультразвуковой обработки наблюдается рост сигналов от кластеров, образованных ионами трехвалентного железа. Образованные в результате диссоциации раствора соли ионы Fe^{2+} окисляются до состояния Fe^{3+} . Для дополнительного анализа растворения ионов железа в зерне использовали метод импедансной спектроскопии в области частот от 1 Гц до 100 МГц. На основе приведенных данных выявили, что внедрение ионов железа приводит к наибольшему изменению действительной и мнимой составляющих электрического импеданса в области частот свыше 1000 Гц или в области β -дисперсии, что указывает на хорошую проходимость ионов железа в клетку из межклеточной области сквозь изолирующую их мембрану. В дальнейшем такие исследования позволят разработать экспресс-метод определения наличия ионов железа в зерновых.

Ключевые слова: зерно пшеницы; внедрение ионов железа; насыщение зерна железом; ультразвуковая кавитация; электрический импеданс; электронный магнитный резонанс

Для цитирования: Чжан А.В., Ничкова Н.М., Воротынов А.М., Дрокин Н.А., Янова М.А. Обогащение зерна пшеницы негемовым железом посредством ультразвуковой кавитации // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 3. С. 47-53. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-47-53>

ORIGINAL ARTICLE

Enrichment of wheat grain with non-heme iron by ultrasonic cavitation**A.V. Chzhan¹, N.M. Nichkova², A.M. Vorotyнов³, N.A. Drokin⁴, M.A. Yanova⁵**^{1,2,5}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia²Irkutsk State Transport University. Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia^{3,4}Kirensky Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia¹avchz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2978-1691>²nichkova_nm@krsk.irkups.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1823-5687>³sasa@iph.krasn.ru⁴drokin@iph.krasn.ru⁵yanova.m@mail.ru

Abstract. Wheat grains are a valuable and most consumed food product, therefore, their enrichment with iron ions will make up for the deficiency of this trace element in the human body. In order to enrich wheat grains with non-heme iron (Fe^{3+}), they were ultrasonically treated in an iron sulfate solution. Grain was saturated with iron on a Vilitek VBS-6D ultrasonic unit at a frequency of 40 kHz. Wheat grains were immersed in a bath with an iron sulfate solution in a ratio of 1 to 3. The treatment duration varied from 10 to 30 minutes in 5-minute increments. Thus, five samples were obtained. The sample with the shortest ultrasonic treatment time was selected as a control. Qualitative and quantitative evaluation of the grain after its cavitation treatment involved physical analysis methods such as electron paramagnetic resonance (EPR) and electrical impedance. The spectra were obtained on a Bruker Elexsys E580 spectrometer in the X-band. To make further analysis of the dissolution of iron ions in grain, the authors used the method of impedance spectroscopy in the frequency range between 1 Hz and 100 MHz. Based on the data obtained, they found that the introduction of iron ions leads to the greatest change in the real and imaginary components of the electrical impedance in the frequency range above 1000 Hz or in the β -dispersion region. This fact indicates good permeability of iron ions into the cell from the intercellular region through their insulating membrane. Further research will make it possible to develop an express method for determining the presence of iron ions in cereals.

Keywords: wheat grain; introduction of iron ions; saturation of grain with iron; ultrasonic cavitation; electrical impedance; electron magnetic resonance

For citation: Chzhan A.V., Nichkova N.M., Vorotyнов A.M., Drokin N.A., M.A. Yanova. Enrichment of wheat grain with non-heme iron by ultrasonic cavitation. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):47-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-47-53>

Введение

Железо является одним из незаменимых микроэлементов, необходимых для активной жизнедеятельности человека. Одной из причин дефицита железа в организме человека является недостаточное его поступление с продуктами питания. Как известно, растительная пища содержит негемовое железо (в форме Fe^{3+}), и его усвояемость приблизительно на 15% ниже гемового (Fe^{2+}).

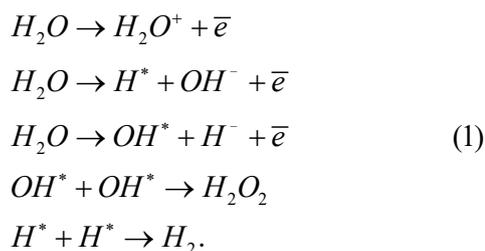
На нейтральных и щелочных почвах особенно проявляется дефицит железа в растениях. Железо в почве содержится преимущественно в виде хелата Fe^{3+} , и растения не могут его усваивать при высоком уровне pH щелочных почв. 30% возделываемых почв во всем мире являются известковыми и содержат мало доступного железа, поскольку оно присутствует в нерастворимых окисленных формах. Сложность перехода ионов железа в растворимое состояние создает проблему их поглощения корнями

растений [1]. В последнее время отмечается падение уровня железа в сельскохозяйственных продуктах, так как продукция, полученная с помощью интенсифицированных технологий повышения урожайности, накапливает в основном углеводы без увеличения металло-протеинов [2].

Наиболее экономически эффективным подходом для профилактики дефицита железа в организме является обогащение им пищевых продуктов [3]. Во всем мире проводятся испытания эффективности обогащения железом национальных продуктов питания. Так, в Социалистической Республике Вьетнам 6-месячные испытания показали, что обогащение рыбного соуса железом может значительно уменьшить анемию и дефицит железа [4]. В Китае был проведен ряд исследований по оценке эффективности, результативности и целесообразности обогащения соевого соуса железом [4]. У населения Южной Африки, испытывающего дефицит железа, обогащение железом порошка

карри привело к значительному повышению уровня гемоглобина в крови и уровня ферритина [4].

В России обогащение зерна пшеницы железом является одним из возможных путей восполнения дефицита этого микроэлемента. Для обогащения зерен пшеницы ионами железа путем механического стимулирования химических реакций, протекающих в водной среде с участием солей железа, перспективным является применение ультразвуковой кавитации (УЗК) [5]. Обусловлено это тем, что в жидкости под действием ультразвука образуются области разрежения и сжатия, в результате чего возникают пульсирующие и схлопывающиеся пузырьки воздуха¹. При воздействии ультразвуковой кавитации на раствор значительно ускоряется скорость химических реакций диссоциации растворенных в воде солей. Под действием ультразвука в кавитационной полости обработанной воды происходит образование активированных атомарного водорода и гидроксильной группы, пироксида водорода, свободных электронов, ионов водорода и гидроксильных ионов, ионизированной воды [6]:



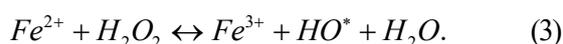
Цель исследований: обработать зерна пшеницы в растворе сульфата железа при разной продолжительности ультразвуковой кавитации, выявить наличие негемового железа в зернах.

Материалы и методы

Для обогащения зерен пшеницы железом использовали раствор сульфата железа. Диссоциация такой соли имеет вид:



Согласно данным [7] под действием кислорода, а также гидроксильных групп может происходить окисление Fe^{2+} и образование трехвалентного железа:



Ультразвуковая кавитация способствует переходу гемового железа (Fe^{2+}) в негемовое (Fe^{3+}), так как происходит обогащение воды кислородом за счет ее перемешивания, а также образования гидроксильных групп.

¹ Пирсол И.С. Кавитация. М.: Мир, 1975. 94 с.

Насыщение зерна железом проводили на ультразвуковой установке Vitek VBS-6D, работающей по принципу ультразвуковой ванны. Результаты исследований, проведенных ранее, показали, что оптимальной для кавитационной обработки зерновых является частота от 20 до 42 кГц [5, 8, 9]. Для исследований выбрали частоту 40 кГц, так как скорость насыщения зерна микроэлементами на данной частоте быстрее, чем на более низких частотах, а на качество насыщения это не влияет. Мощность излучателя составляла 180 Вт.

Зерна пшеницы погружали в ванну с раствором сульфата железа в пропорции 1:3 и смешивали под действием ультразвуковой обработки. Рабочие растворы солей готовили на основе бидистиллированной воды с концентрацией (в пересчете на металлы) 65 мг/л. Эксперимент проводили при исходной температуре раствора 35°C, которая в процессе обработки не превышала 60°C (при $t = 67,5^\circ\text{C}$ происходит полная клейстеризация крахмальных цепей).

После ультразвукового воздействия жидкость сливали, а полученное сырье направляли на сушку до влажности зерна 15%. Исследуемая партия состояла из 5 образцов, различающихся временем обработки (табл.).

Для качественной и количественной оценки результатов кавитационной обработки зерна в водном растворе сульфата железа использовали физические методы анализа – такие, как электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и электрический импеданс. Исследования проводили в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук.

Спектры электронного магнитного резонанса сняли на спектрометре Bruker Elexsys E580 в X-диапазоне ($f = 9$ ГГц) при комнатной температуре. Размолотые в ступе зерна пшеницы плотно укладывали в стеклянные ампулы диаметром 2 мм. При записи спектров использовали следующие параметры: мощность сверхвысокочастотного (СВЧ)

Таблица
Продолжительность ультразвуковой обработки семян

Table

Duration of US seed treatment

№ образца <i>No. of a sample</i>	Продолжительность воздействия, мин <i>Duration of treatment, min</i>
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30

излучения – 0,63 мВт; амплитуда модуляции – 0,7 Гс; частота модуляции – 100 кГц; ширина развертки магнитного поля – 5 кГц; время развертки – 40 с.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 показаны спектры электронно-парамагнитного резонанса для исследуемых образцов, которые состоят преимущественно из трех линий, принадлежащих трехвалентному иону железа (цифры 1, 2, 3 на спектрах). Линия 1 при значении магнитного поля $H = 1,5$ кЭ обусловлена практически изолированными друг от друга ионами Fe^{3+} , находящимися в сильно искаженном окружении из лигандов (это могут быть ионы С, О, N, H_2O). Широкая линия 2 при значении 3 кЭ обусловлена кластерами из большого количества взаимодействующих ионов Fe^{3+} , находящимися в зернах.

Узкий сигнал 3 вызван свободными радикалами. Кроме того, в образце № 5 наблюдается сигнал от небольшого количества ионов Mn^{2+} , который помечен стрелками.

Наличие или отсутствие ионов Fe^{2+} по приведенным спектральным линиям определить затруднительно.

Представленные кривые поглощения несколько отличаются от наблюдавшихся ранее спектров электронного парамагнитного резонанса на зернах пшеницы, различающихся по своей устойчивости к засухостойчивому стрессу [10]. Авторы указали наличие в исследуемых зернах ионов Fe, Mn и Cu, находящихся в поле лигандов, а также углеводных радикалов, обнаруживаемых главным образом во внутренних

частях зерен. Образование кластеров из ионов Fe^{3+} , наблюдаемых в нашем случае, можно объяснить действием ультразвуковой кавитации.

Из полученных данных можно заключить, что с увеличением времени обработки наблюдается рост сигналов от кластеров, образованных ионами трехвалентного железа (линия 2), в то время как интенсивность линий 1 и 3 существенно не меняется. Отсюда следует, что с увеличением времени ультразвуковой обработки в основном происходит рост концентрации ионов железа внутри зерна. Практически не меняющаяся концентрация ионов железа вне зерна, находящаяся в поле лигандов и свободных радикалов, по всей видимости, связана с сушкой до указанной влажности. Рост интенсивности указанных линий свидетельствует о росте концентраций ионов трехвалентного железа с ростом времени обработки зерен в ультразвуковой ванне.

Для дополнительного анализа растворения ионов в зерне использовали метод импедансной спектроскопии. Этот метод по сравнению с ЭПР практически более предпочтителен, так как не требует дорогого оборудования [11].

Измерение электрических свойств зерен пшеницы проводили с помощью анализатора спектров Elins 1500J и Agilent E5061B в диапазоне частот от 1 Гц до 100 МГц [12].

В качестве контроля взяли образец с наименьшим временем ультразвуковой обработки (образец № 1). На рисунках 2 и 3 частотная зависимость этого образца соответствует верхним кривым.

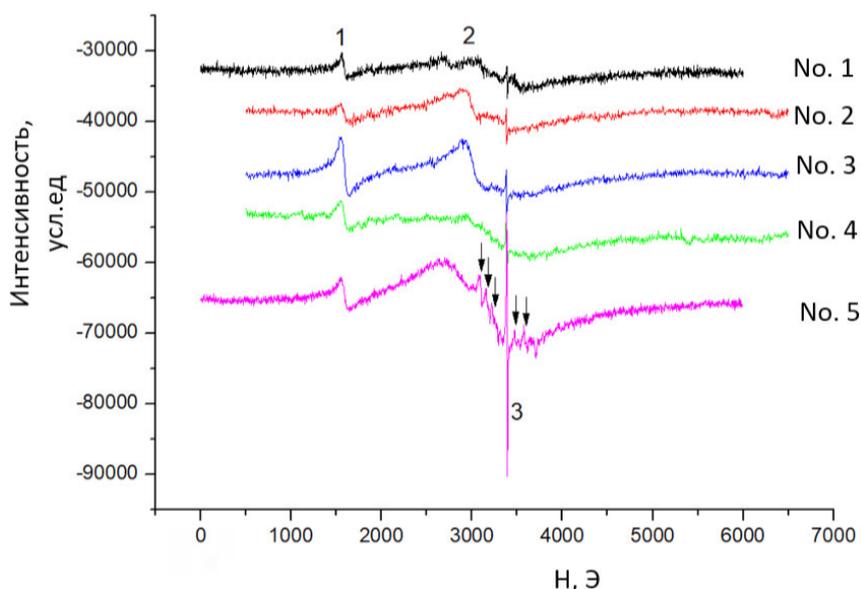


Рис. 1. Линии поглощения электронного парамагнитного резонанса зерен пшеницы в зависимости от напряженности магнитного поля в образцах с разным временем ультразвуковой обработки

Fig. 1. Electronic paramagnetic resonance absorption lines of wheat grains depending on the magnetic field strength in samples with different ultrasonic treatment duration

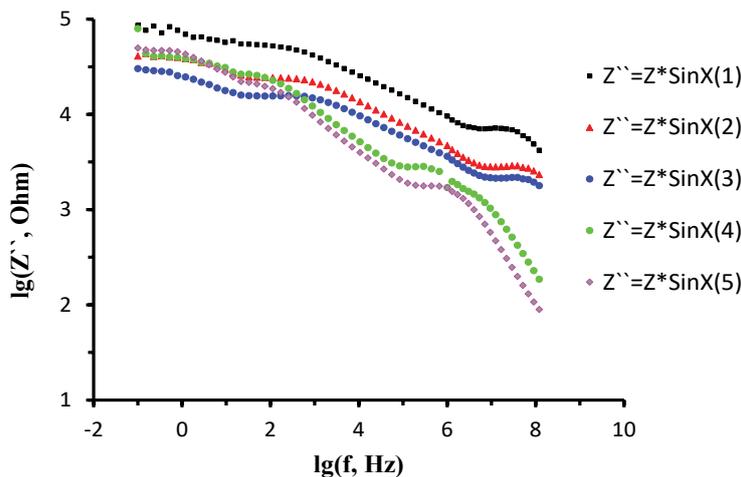


Рис. 2. Частотная зависимость мнимой части импеданса зерен пшеницы в образцах с разным временем ультразвуковой обработки

Fig. 2. Frequency dependency of the imaginary part of the impedance of wheat grains in samples with different ultrasonic treatment duration

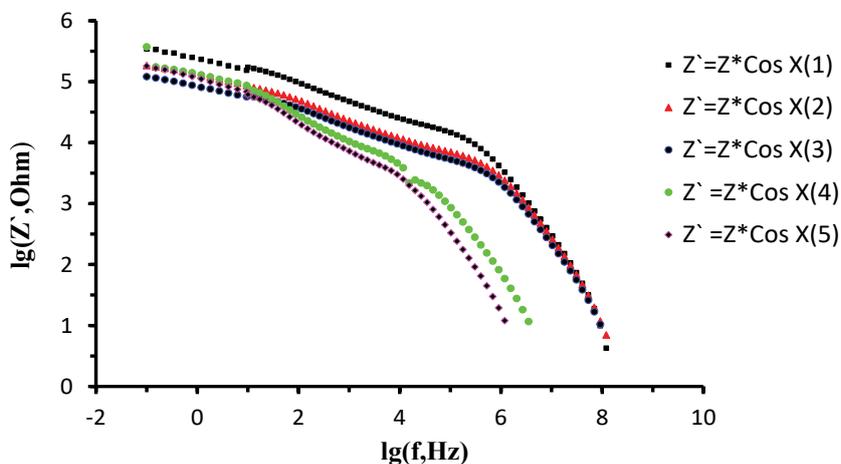


Рис. 3. Частотная зависимость действительной части импеданса зерен пшеницы в образцах с разным временем ультразвуковой обработки

Fig. 3. Frequency dependency of the real part of the impedance of wheat grains in samples with different ultrasonic treatment duration

Из рисунков 2 и 3 следует, что внедрение ионов железа приводит к уменьшению как действительной, так и мнимой частей электрического импеданса на частотах, превышающих 100 Гц.

На рисунке 4 показана зависимость относительной разницы между действительными частями импеданса Z'_1 и Z'_5 образцов № 1 и № 5 (максимально отличающихся по концентрации железа) от частоты электромагнитного поля. Как следует из рисунка 4, наибольшее отличие этой величины наблюдается в области частот свыше 1000 Гц или в области β -дисперсии [13]. Этот факт указывает на то, что ионы железа хорошо проходят сквозь мембрану, изолирующую клеточную часть структуры зерна от окружающего ее жидкого электролита.

Изменение относительной разницы между действительной частью импеданса Z'_1

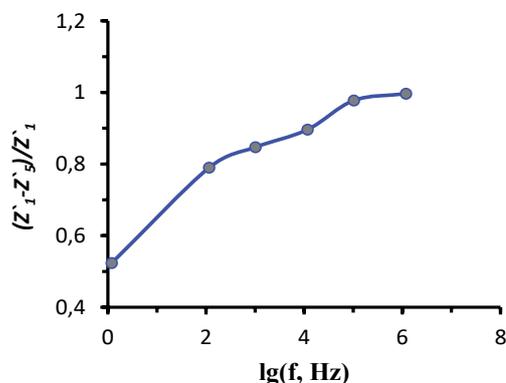


Рис. 4. Частотная зависимость относительного изменения разницы действительной части импеданса образцов 1 и 5

Fig. 4. Frequency dependency of the relative change in the difference in the real part of the impedance of samples No. 1 and 5

контрольного образца № 1 и действительной частью импеданса Z'_i остальных образцов (где i соответствует номеру образца 2, 3, 4, 5) показано на рисунке 5.

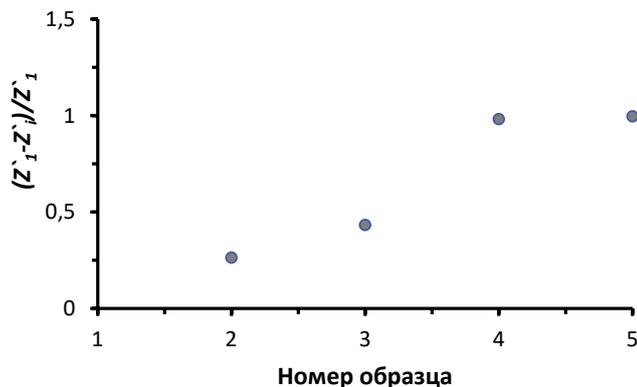


Рис. 5. Изменение действительной части импеданса образцов 2, 3, 4, 5 относительно контрольного образца 1

Fig. 5. Change in the real part of the impedance of samples No. 2, 3, 4, and 5 relative to control sample No. 1

Список источников

1. Rout G., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*. 2015;3:1-24. <https://doi.org/10.7831/ras.3.1>
2. Мойсеенок А.Г., Мотылевич Ж.В., Черемисин А.С. и др. Эссенциальность и дефицит железа в питании: углубление известной проблемы нутрициологии // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2023. Т. 16, № 2(60). С. 31-39. EDN: UUKUAU
3. Hurrell R.F. Ensuring the efficacious iron fortification of foods: A tale of two barriers. *Nutrients*. 2022;14(8):1609. <https://doi.org/10.3390/nu14081609>
4. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R. Guidelines on food fortification with micronutrients. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2006. 376 p. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43412/9241594012_eng.pdf
5. Способ обогащения крупяных продуктов микроэлементами: Патент № 2505078 С1 Российская Федерация, МПК А23L 1/10, А23L 1/304, А23K 1/00 / М.А. Янова, А.И. Гусев; заявл. 13.06.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. EDN: BXZHZQ
6. Викулин П.Д., Викулина В.Б. Влияние ультразвука на изменение рН воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 4 (80). С. 3-8. EDN: GJJZRU
7. Муранов К.О. Реакция фентона in vivo и in vitro. Возможности и ограничения // Успехи биологической химии. 2024. Т. 64. С. 219-246. <https://www.fbras.ru/wp-content/uploads/2024/02/7-Muranov.pdf>
8. Способ обработки зерна при его подготовке к помолу: Патент RU2405629 С1, МПК В02В1/04, В02В1/08 / Ф.Я. Рудик, В.И. Русин, В.Г. Ребров, И.Ф. Савельев; заявка: 2009114059/13; заявл. 13.04.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. EDN: YEJRDX
9. Галиев Б.Х., Ширнина Н.М., Байков А.С. и др. Влияние кавитационной обработки на химический состав, питательность и переваримость сухого вещества концентрированных кормов // Вестник мясного скотоводства. 2017. № 4 (100). С. 190-196. EDN: YLZXPC

Значения импедансов приведены для частоты 1 МГц. Рост указанной величины подтверждает увеличение концентрации ионов железа в зернах пшеницы с ростом длительности ультразвуковой обработки.

Выводы

1. Ультразвуковая обработка зерен пшеницы в водном растворе сульфата железа способствует обогащению зерен ионами Fe^{3+} , образуемыми в результате ультразвуковой кавитации.
2. С ростом длительности ультразвуковой обработки концентрация ионов железа внутри зерна увеличивается. Оптимальная продолжительность обработки составляет 25 мин.
3. Наибольшие отличия относительного изменения действительной и мнимой частей электрического импеданса образцов с разной степенью обработки наблюдали в области частот, превышающих 1000 Гц, или в области β -дисперсии, что указывает на хорошую проходимость ионов железа в клетку из межклеточной области сквозь изолирующую их мембрану.

References

1. Rout G., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*. 2015;3:1-24. <https://doi.org/10.7831/ras.3.1>
2. Moiseenok A.G., Motylevich Zh.V., Cheremisin A.S., Moiseenok E.A., Katkovskaya I.N., Titko O.V., Azizbekyan S.G. Essentiality and iron deficiency in nutrition: deepening a well-known problem of nutrition. *Food Industry: Science and Technologies*. 2023;16(60):31-39. (In Russ.)
3. Hurrell R.F. Ensuring the efficacious iron fortification of foods: A tale of two barriers. *Nutrients*. 2022;14:1609. <https://doi.org/10.3390/nu14081609>
4. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R. Guidelines on food fortification with micronutrients. World health organization and food and agriculture organization of the united nations. 2006. 376 p. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43412/9241594012_eng.pdf
5. Yanova M.A., Gusev A.I. Method for cereal products enrichment with microelements. Patent No. 2505078 C1 Russian Federation, IPC A23L 1/10, A23L 1/304, A23K 1/00, 2012. (In Russ.)
6. Vikulin P.D., Vikulina V.B. Effect of ultrasound on pH change in water. *Water and Ecology*. 2019;4(80):3-8. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.4.3-8>
7. Muranov K.O. Fenton Reaction in vivo and in vitro. Possibilities and limitations. *Uspekhi biologicheskoy khimii*. 2024;64:219-246. (In Russ.)
8. Rudik F.J., Rusin V.I., Rebrov V.G., Savel'ev I.F. Method of treatment grain for its preparation for grinding: Patent No. 2405629 C1 Russian Federation, IPC B02B1/04, B02B1/08, 2009. (In Russ.)
9. Galiev B.Kh., Shirnina N.M., Baykov A.S., Miroshnikov I.S., Korneichenko V.I., Sechin V.A. Effect of cavitation treatment on chemical composition, nutritional value and digestibility of dry matter in concentrated feeds. *Vestnik myasnogo skotovodstva*. 2017;4:190-196. (In Russ.)
10. Labanowska M., Filek M., Kurdziel M., Bednarska E., Dłubacz A., Hartikainen H. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy characterization of wheat

10. Labanowska M., Filek M., Kurdziel M. et al. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy characterization of wheat grains from plants of different water stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 2012;169(13):1234-1242. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.020>

11. Чжан А.В., Дрокин Н.А., Ничкова Н.М., Мороз Ж.М. Особенности спектральных характеристик электрического импеданса увлажненных зерен пшеницы // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 34-38. <https://doi.org/10.17513/use.37821>

12. Чжан А.В., Дрокин Н.А., Ничкова Н.М., Мороз Ж.М. Метод импедансной спектроскопии для тестирования увлажненных зерен пшеницы // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 2 (63). С. 59-68. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-59-68>

13. Pliquett U. Bioimpedance: A review for food processing. *Food Engineering Reviews*. 2010;2:74-94. <https://doi.org/10.1007/s12393-010-9019-z>

Информация об авторах

¹ Чжан Анатолий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор; avchz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2978-1691>; SPIN-код: 1428-7095, AuthorID: 623731

² Ничкова Надежда Михайловна, старший преподаватель, аспирант; nichkova_nm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1823-5687>; SPIN-код: 5935-7919, AuthorID: 738915

³ Воротынов Александр Михайлович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; sasa@iph.krasn.ru; SPIN-код: 2798-6062, AuthorID: 39560

⁴ Дрокин Николай Александрович, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; drokin@iph.krasn.ru; AuthorID: 56664

⁵ Янова Марина Анатольевна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; yanova.m@mail.ru; SPIN-код: 8788-9580, AuthorID: 489578

^{1,2,5} Красноярский государственный аграрный университет; 660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-кт Мира, 90

² Иркутский государственный университет путей сообщения. Красноярский институт железнодорожного транспорта; 660028, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2а

^{3,4} Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; 660036, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50

Вклад авторов

А.В. Чжан – концептуализация, руководство исследованием, описание результатов и формирование выводов исследования, создание окончательной версии (доработка) рукописи;

Н.М. Ничкова – обзор источников литературы, подготовка графических материалов, проведение исследований, создание черновика рукописи и ее редактирование;

А.М. Воротынов – методология, проведение исследований, программное обеспечение, верификация данных;

Н.А. Дрокин – методология, проведение исследований, программное обеспечение, верификация данных;

М.А. Янова – методология, проведение исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; поступила после рецензирования и доработки 05.05.2025; принята к публикации 06.05.2025

grains from plants of different water stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 2012;169(13):1234-1242. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.020>

11. Chzhan A.V., Drokin N.A., Nichkova N.M., Moroz Zh.M. Features of the spectral characteristics of the electrical impedance of wetted wheat grains. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;5:34-38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37821>

12. Zhan A.V., Drokin N.A., Nichkova N.M., Moroz Zh.M. Impedance spectroscopy method for testing moistened wheat crops. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2022;(2):59-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2022-63-2-59-68>

13. Pliquett U. Bioimpedance: A review for food processing. *Food Engineering Reviews*. 2010;2:74-94. <https://doi.org/10.1007/s12393-010-9019-z>

Author Information

A.V. Chzhan¹, DSc (Phys-Math), Professor; avchz@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2978-1691>

N.M. Nichkova², Senior Lecturer, postgraduate student; nichkova_nm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1823-5687>

N.A. Drokin³, DSc (Phys-Math), Senior Research Associate; drokin@iph.krasn.ru

A.M. Vorotynov⁴, CSc (Phys-Math), Senior Research Associate; sasa@iph.krasn.ru

M.A. Yanova⁵, DSc (Eng), Professor, the head of the department; yanova.m@mail.ru

^{1,2,5} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk; 660049, Russian Federation, Krasnoyarsk, Mira Ave., 90

² Irkutsk State Transport University. Krasnoyarsk Institute of Railway Transport; 660028, Russian Federation, Krasnoyarsk, Novaya Zarya Str., 2a

^{3,4} Kirensky Institute of Physics (KIPh), Russian Academy of Sciences, SB RAS; 660036, Russian Federation, Krasnoyarsk, Akademgorodok Str., 50

Author Contribution

A.V. Chzhan – conceptualization, research supervision, formulation of results and conclusions, writing – review and editing of the manuscript;

N.M. Nichkova – literature review, visualization, investigation, writing – original draft preparation;

A.M. Vorotynov – methodology, investigation, software, data verification;

N.A. Drokin – methodology, investigation, software, data verification;

M.A. Yanova – methodology, investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 17.01.2025; Revised 05.05.2025; Accepted 06.05.2025