

УДК 577.17:636.085.25

DOI: 10.33284/2658-3135-102-2-21

Физические параметры микрочастиц железа и биологическая доступность при воздействии сверхвысокими частотами

Н.В. Гарипова¹, Т.Н. Холодиллина^{1,2}, М.Я. Курилкина¹, В.В. Ванишин²

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург)

²Оренбургский государственный университет (г. Оренбург)

Аннотация. Биологическое действие металлов-микроэлементов определяется их физическими параметрами, такими как размер и пикнометрическая плотность. Размер исследуемых микрочастиц Fe составил 12,5-50 мкм, пикнометрическая плотность – 3,40 см³.

Выявлено, что включение Fe в состав опытных комплексов (ОК), подвергнутых электромагнитному воздействию СВЧ, увеличивает пористость продукта на 23,4 %. Оценка переваримости «in vitro» показала повышение коэффициента биодоступности сухого вещества исследуемых комплексов на 5,12 и 2,75 %. Включение микрочастиц Fe приводит к интенсификации процесса СВЧ обработки и увеличению температуры конечного продукта.

Визуализация образцов опытного комплекса с помощью оптического микроскопа позволила получить сведения о структурных преобразованиях, произошедших после электромагнитного воздействия сверхвысокими частотами. Была определена локализация частиц железа и установлен факт спекания магнитных агломератов и органического вещества. Что говорит о включении элемента в структуру продукта.

Ключевые слова: корма, микрочастицы железа, электромагнитная обработка (СВЧ), пористость ОК, переваримость корма.

UDC 577.17:636.085.25

Physical parameters of iron microparticles and bioavailability after exposure with very high frequency

NV Garipova¹, TN Kholodilina^{1,2}, MYa Kurilkina¹, VV Vanshin²

¹Federal Research Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)

²Orenburg State University (Orenburg, Russia)

Summary. The biological effect of trace metals is determined by their physical parameters, such as size and pycnometric density. The size of Fe microparticles under study was 12.5-50 μm, pycnometric density was 3.40 cm³.

It is revealed that the inclusion of Fe in the composition of the experimental complexes (EC), subjected to the electromagnetic influence of the microwave, increases the porosity of product by 23.4 %. Evaluation of digestibility «in vitro» showed an increase in bioavailability coefficient of dry matter of the studied complexes by 5.12 and 2.75 %. The inclusion of Fe microparticles leads to the intensification of microwave treatment process and an increase in the temperature of final product.

Visualization of samples of the experimental complex using an optical microscope made it possible to obtain information on the structural transformations that occurred after electromagnetic exposure with very high frequency. The localization of iron particles was determined and sintering of magnetic agglomerates and organic matter was established. That says about the inclusion of this element in the product structure.

Key words: feed, iron microparticles, electromagnetic treatment (SHF), porosity EC, feed digestibility.

Введение.

Механизм трансформации микрочастиц в желудочно-кишечном тракте и метаболизм всего организма мало известен и зависит от многих факторов, в частности это пути воздействия на организм, состав, форма, размер и т. д. (Powell JJ et al., 1999; Powell JJ et al., 2010) При энтеральном поступлении частиц металлов в организм процесс всасывания отдельных частиц происходит в ионной форме (Li CH et al., 2012; Seok SH et al., 2013), известно, что значительная часть из них поступает в организм в неизменном виде (Jain TK et al., 2008).

Исходя из существующих данных, очевидно, что по мере уменьшения размера высокодисперсных частиц металлов в корме их потенциальная реакционная способность и биодоступность будут возрастать. Данное утверждение подтверждается результатами исследований с использованием высокодисперсных минеральных комплексов, металлов и их соединений (Ле Вьет Фьонг, 2006; Сизова Е.А. и др., 2011).

Эффективность препаратов, содержащих микрочастицы, можно повысить путём обработки физическими методами (Сыроватка В.И., 2013). Наибольшее распространение при получении биологически активных добавок имеют различные методы теплового и барогидротермического воздействия, позволяющие эффективно преобразовать структуру и свойства конечного продукта. В отличие от традиционных методов нагрева методы электромагнитного воздействия обеспечивают возможность равномерного, быстрого нагрева, экологическую чистоту нагрева, высокое бактерицидное действие, сокращение времени технологических процессов, ценное сохранение важных питательных веществ пищевых продуктов и комбикормов (Будников Д.А. и Васильев А.А., 2013; Сыроватка В.И., 2014; Васильев А.А., 2018; Xu F et al., 2011; Liu W et al., 2016).

Цель исследования.

Изучение влияния физических свойств на переваримость биодобавок с включением микрочастиц железа, подвергнутых электромагнитному воздействию СВЧ.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Микрочастицы Fe, опытные комплексы (ОК) состоящие из отрубей и микрочастиц Fe, подвергнутые электромагнитному воздействию (СВЧ) при различной влажности.

Схема эксперимента. Исследования физических свойств были выполнены в лаборатории кафедры «Материаловедения и технологии материалов» Оренбургского государственного университета. Исследования переваримости ОК и биодоступности микрочастиц Fe были осуществлены в Испытательном центре ЦКП ФНЦ БСТ РАН (аттестат аккредитации № RA.RU.21ПФ59 от 02.12.2015 г.).

В ходе первой серии исследований были определены свойства используемых микрочастиц железа, чистота – 99,95 %, производитель – ЗАО НПП «Высокодисперсные металлические порошки» (Россия).

Размер частиц от 1 до 100 мкм определялся микроскопическим методом по ГОСТ 23402-78. Препарат из исследуемого порошка приготавливался на предметном стекле растиранием с помощью скипидара равномерным слоем. Размер частиц определялся с помощью окуляр-микрометра при увеличении в 640 раз. Методика подсчёта – стандартная. Количество измерений – около 100 частиц на каждый вид порошка. При необходимости измерялись ширина и длина частицы, а размер принимался как среднее значение между ними. Размер частиц порошка принимался равным размеру частиц, содержащихся во фракциях примерно от 10 процентов и выше.

При определении пикнометрической плотности (Кипарисов С.С. и Либенсон Г.А., 1980) пробу порошка помещают в тщательно высушенный и взвешенный пикнометр, представляющий собой мерный сосуд с известным объёмом (10, 25, 50 мл). Пикнометр заполняется порошком на две трети объёма и взвешивается, после чего оставшийся свободный объём заполняется пикнометрической жидкостью (бензиловый спирт), которая должна хорошо смачивать порошок и одновременно быть химически инертной к нему, обладать стабильной плотностью и минимальными значениями упругости паров, вязкости, поверхностного натяжения и размера молекул. Пикнометр с жидкостью и порошком снова взвешивается.

Результаты пикнометрической плотности Y_k микрочастиц металлов оцениваются с использованием формулы (1):

$$Y_k = \frac{P_2 - P_1}{V - \frac{P_3 - P_2}{Y_{ж}}} \quad (1)$$

где: P_1 – масса пикнометра, г; P_2 – масса пикнометра с порошком, г; P_3 – масса пикнометра с порошком и жидкостью, г; V – объём пикнометра, см³; $Y_{ж}$ – плотность жидкости, г/см³.

Плотность бензилового спирта составляет $Y_{20}=1,044$ г/см³.

В ходе второй серии исследования готовилась смесь отрубей и микрочастиц металла Fe в соотношении: отруби пшеничные – 100 г и микрочастицы Fe – 7 мг/кг, которая была подвергнута воздействию в электромагнитном поле сверхвысоких частот (ЭМП СВЧ). ЭМП СВЧ воздействие осуществлялось при мощности 320 кВт, время экспозиции – 90 сек.

В качестве образцов были исследованы опытные комплексы: ОК₁ – нативные отруби (влажность – 12,5 %); ОК₂ – отруби (влажность – 45 %)+ЭМП СВЧ; ОК₃ – нативные отруби (влажность – 12,5 %)+Fe; ОК₄ – отруби (влажность – 45 %)+Fe+ЭМП СВЧ.

Объём воды для увлажнения образцов определялся по формуле (2):

$$V = m \times \frac{(W_2 - W_1)}{(100 - W_2)} \quad (2)$$

где: V – объём воды, необходимый для увлажнения образцов, мл; m – масса образца, г; W_1 и W_2 – начальная и конечная массовая доля влаги, %.

В полученных ОК исследовали температурные показатели сразу после обработки, переваримость, биодоступность, пористость и проводили микроскопическую визуализацию.

Для оценки пористости образец ОК, предварительно высушенный до постоянного веса, высыпался во взвешенный мерный цилиндр ёмкостью 100 мл (диаметр – 25 мм). Наполнение цилиндра до метки 100 мл осуществляли порциями по 15-20 мл, с уплотнением образца ОК после насыпания каждой порции до 300 ± 10 г/л. Цилиндр с ОК взвешивался с точностью до 0,01 г и наполнялся ацетоном до постоянного уровня ацетона над слоем ОК. Через 30 минут избыток ацетона сливался и цилиндр с ОК взвешивался.

Пористость по ацетону x (в объёмных %) вычисляли по формуле (3):

$$x = \frac{(G''_{ц.о.} - G'_{ц.о.}) \times 100}{pV} = \frac{G''_{ц.о.} - G'_{ц.о.}}{p} \quad (3)$$

где: $G''_{ц.о.}$ – вес цилиндра с образцом ОК до пропитывания, г; $G'_{ц.о.}$ – вес цилиндра с образцом ОК, пропитанным ацетоном, г; p – плотность ацетона при температуре опыта, г/см³; $V=100$ см³ – объём образца ОК.

Визуальное исследование опытных комплексов проводилось на предмет модификации отрубного продукта и микрочастиц железа. Для микроскопии в режиме отражённого света 20 мкл образцы помещались на предметное стекло, затем предметное стекло помещалось на предметный столик микроскопа и получалось изображение, используя объектив с увеличением $\times 32$, поле зрения – 5,6 мм.

Переваримость сухого вещества определяли методом «in vitro» при помощи «искусственного рубца KPL 01» по методике В.В. Попова, Е.Т. Рыбиной в модификации Г.И. Левахина, А.Г. Мещерякова (Попов В.В. и Рыбина Е.Т., 1983).

Биодоступность микрочастиц Fe проводили по результатам «in vitro», в процентах по разнице содержания микрочастиц до и после экспозиции в искусственном рубце.

Оборудование и технические средства. Микроскопическое исследование микрочастиц Fe производилось на металлографическом исследовательском микроскопе «Альтами МЕТ 3» (Россия), с различным увеличением частиц при косом освещении. ЭМ СВЧ обработка ОК проводилась на установке «LG МН-6347ЕВ» (КНР) с рабочей частотой 2450 МГц и выходной мощностью 800 Вт. Определение температуры ОК проводилось с помощью электронного лабораторного термометра «ЛТ-300» (Россия).

Образцы ОК визуализировали при помощи оптического микроскопа «МБС-10» (Россия). Образцы фиксировали при помощи цифровой камеры «Leica DFC 290» (Германия).

Статистическая обработка. Основные данные были подвергнуты статистической обработке с использованием пакета программ «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Полученные по ходу эксперимента цифровые данные были обработаны методом вариационной статистики (Гатаулин А.М., 1992).

Результаты исследований.

В ходе визуального исследования микрочастиц металлов было отмечено, что частицы имеют неправильную губчатую форму. Размер микрочастиц составил от 12,5 до 50 мкм, что подтверждается низкой пикнометрической плотностью 0,63 см³.

При оценке переваримости ОК «in vitro» были выявлены значительные изменения при использовании электромагнитного воздействия СВЧ в комплексе с микрочастицами железа. Так, переваримость сухого вещества достигает 84,62 %, что на 5,12 % превышает контроль (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические свойства испытуемых кормовых средств, %
Table 1. Physico-chemical properties of the tested feed products, %

Образец/Sample	Переваримость сухого вещества «in vitro», %/ Digestibility of dry matter «in vitro», %	Биодоступность Fe «in vitro», %/ Bioavailability, Fe «in vitro», %	Пористость, %/ Porosity, %
OK ₁ /EC ₁	79,50±1,04	81,24±0,59	50,73±0,3
OK ₃ /EC ₂	82,25±0,53	82,98±1,20	61,71±7,2
OK ₄ /EC ₄	84,62±0,37	85,89±0,65	74,14±6,4

Сходные результаты были получены и при биодоступности опытных образцов корма. В этом случае, биодоступность железа в корме составляла: ОК₁ – 81,24 %; ОК₃ – 82,98 %; ОК₄ – 85,89 %.

Электромагнитное воздействие СВЧ на ОК₄ с микрочастицами железа даёт увеличение биодоступности исследуемого элемента на 4,65 %.

При оценке пористости образцов выявлено, что электромагнитное воздействие приводит к увеличению показателя с 50,73 до 61,71 %. Изменение влажности ОК с включением микрочастиц железа до 45 % увеличивает пористость до 74,14 %.

Влажность продукта перед СВЧ обработкой влияет на интенсивность происходящих процессов, что сказывается на значениях конечной температуры ОК (рис. 1).

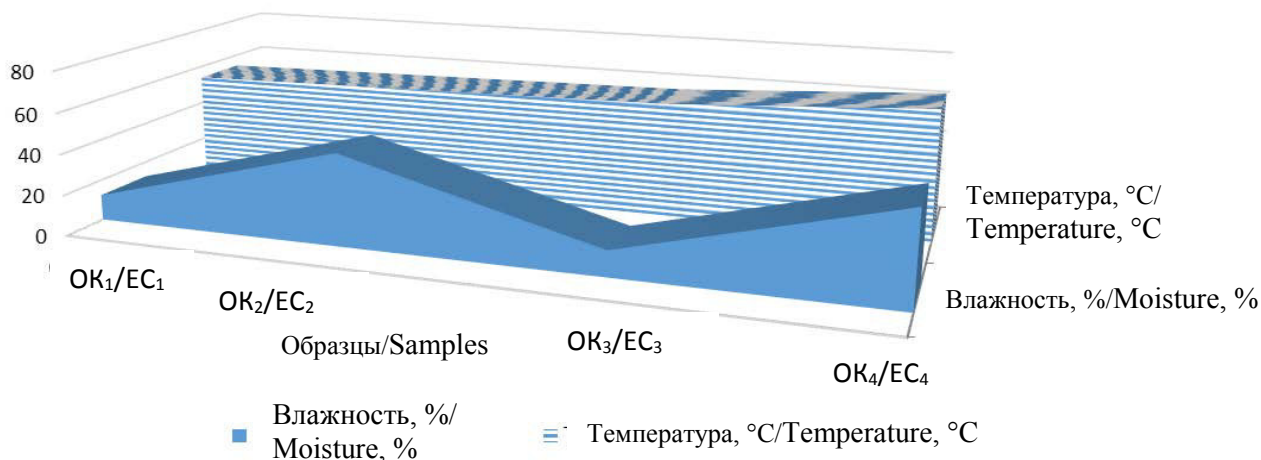


Рис. 1 – Влияние различных физических параметров при СВЧ воздействии на ОК
Figure 1 – The effect of different physical parameters when microwave exposed on EC

В результате введения микрочастиц Fe в ОК₃ и ОК₄ температура воздействия увеличивается по отношению к ОК₁ и ОК₂.

Визуализация ОК с помощью оптической микроскопии подтвердила формирование пористой структуры при температуре продукта на выходе +54 °С, а дополнительное увлажнение до 45 % увеличивает пористую структуру отрубей при температуре +56 °С.

Включение в ОК микрочастиц железа приводит к повышению температуры продукта на выходе до +65 °С, наблюдается незначительное спекание частиц Fe и образование магнитных агломератов (рис. 2).

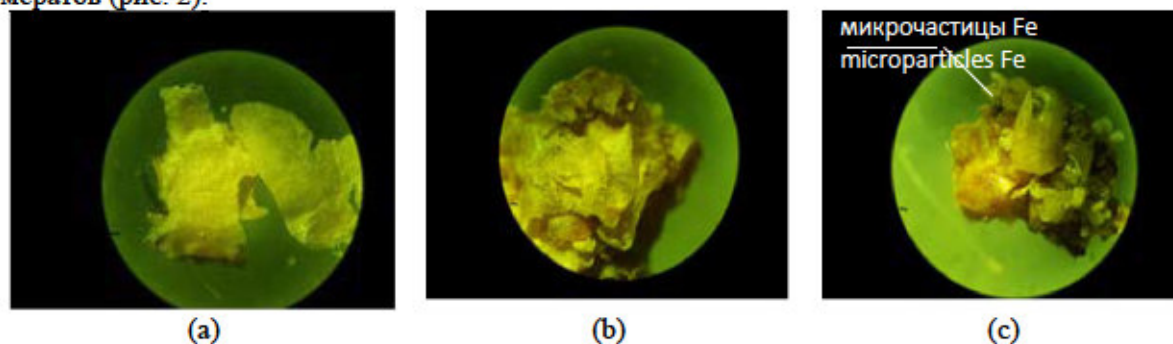


Рис. 2 – Микрофотографии модификации частиц отрубей при 32-кратном увеличении: (a) – ОК₁; (b) – ОК₂; (c) – ОК₄

Figure 2 – Photomicrographs of bran particles modified at 32x magnification: (a) – ОК₁; (b) – ОК₂; (c) – ОК₄

Обсуждение полученных результатов.

В науке активно ведутся работы по созданию высокоэффективных кормовых средств за счёт включения в их состав металлов, и закономерно возникает вопрос об оптимальности размерного ряда частиц в питании животных. Учитывая значительный объём частиц, поступающих в организм животных с кормом и водой, с высокой степенью вероятности можно предположить, что именно препараты микрочастиц металлов-микроэлементов следует рассматривать в качестве альтернативы существующим препаратам в питании животных. Перспективность микрофракционных кормов подтверждается исследованиями (Meng H et al., 2007; Cho WS et al., 2012). Причём в отличие от нанодисперсий препараты микрочастиц характеризуются меньшей токсичностью. Показано, что наночастицы металлов из-за высокой реакционной способности легко диссоциируют в ионные формы в кислой среде желудка, что приводит к тяжёлым токсическим реакциям, вызывая перегрузку ионов металлов в органах-мишенях (Aslam FM et al., 2014).

Площадь поверхности микрочастиц играет важную роль при взаимодействии с биологическими системами. С этой целью проводилось определение пикнометрической плотности. При этом известна закономерность: чем меньше пикнометрическая плотность микрочастиц металлов, тем больше площадь поверхности, что должно способствовать интенсификации биологических процессов в организме. Это влияние подтверждается результатами проведённых нами балансовых опытов, в которых показано достоверное увеличение переваримости органического вещества при использовании порошков с минимальной пикнометрической плотностью (Мирошников С.А. и др., 2018).

Эффект повышения пористости кормов при увеличении температуры и давления при баротермическом воздействии ранее описан в наших исследованиях (Мирошников И.С. и др., 2016). В свою очередь ЭМП СВЧ также оказывает тепловое воздействие и повышает пористость корма, тем самым влияя на всасывание частиц в организм в результате энтерального пищеварения (In-Chul L et al., 2016), что подтвердилось увеличением переваримости «in vitro» сухого вещества образцов корма.

Более высокая биодоступность микроэлементов железа для организма птицы обеспечивается электромагнитным воздействием СВЧ на опытные комплексы, определено достоверное увеличение на 4,65 % по отношению к ОК₁.

В свою очередь оптическая визуализация структуры ОК показала, что с увеличением температуры и влажности ОК в местах локализации металлических частиц железа при электромагнитном воздействии происходит спекание и формирование органических плёнок на поверхности микрочастиц железа. Можно предположить, что проникновение микрочастиц железа через энтеральный барьер в составе органической оболочки может быть легче. Фактором повышения биодоступности железа из ОК является активизация деятельности микрофлоры пищеварительного тракта (Мирошников С.А. и др., 2010).

Выводы.

Размер, форма и пикнометрическая плотность используемых металлов-микроэлементов определяют их биологические свойства.

Применение электромагнитного поля сверхвысокой частоты для изменения характеристик ОК с включением микродисперсных частиц Fe изменяет микроструктуру продукта, что коррелирует с повышением переваримости питательных веществ и ростом биодоступности железа «in vitro».

Литература

1. Будников Д.А., Васильев А.А. Влияние неравномерности распределения влаги в зерне на расчёт теплопроводности при СВЧ обеззараживании // Вестник ВИЭСХ. 2013. № 2(11). С. 41-44. [Budnikov DA, Vasilev AA. Vliyanie neravnomernosti raspredeleniya vlagi v zerne na raschet teploprovodnosti pri SVCh obezzarazhivani. Vestnik VIESKh. 2013;2(11):41-44. (In Russ)].
2. Васильев А.А. Постановка краевой задачи нагрева и теплообмена в блоках питания СВЧ-установок сельхозназначения // Вестник ВИЭСХ. 2018. № 2(31). С. 48-52. [Vasilev AA. Definition of boundary problem of heating and heat transfer in power supply units of microwave installations. Vestnik VIESKh. 2018;2(31):48-52. (In Russ)].
3. Гатаулин А.М. Система прикладных статистико-математических методов обработки экспериментальных данных в сельском хозяйстве. М.: Издательство ТСХА, 1992. 350 с. [Gataulin AM. Sistema prikladnykh statistiko-matematicheskikh metodov obrabotki eksperimental'nykh dannykh v sel'skom khozyaistve. Moscow: Izdatel'stvo TSKhA;1992:350 p. (In Russ)].
4. К разработке критериев безопасности наночастиц металлов при введении их в организм животных / Е.А. Сизова, Т.Н. Холодилина, С.А. Мирошников, В.С. Полякова, Н.Н. Глущенко // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 1. С. 40-42. [Sizova EA, Kholodilina TN, Miroshnikov SA, Polyakova VS., Glushchenko N.N. On development of safety criteria in metal nanoparticles while their introducing to animal organism. Vestnik of the Russian agricultural science. 2011;1:40-42. (In Russ)].
5. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1980. 496 с. [Kiparisov SS, Libenson G. Poroshkovaya metallurgiya: ucheb. posobie. Moscow: Metallurgiya;1980:496 p. (In Russ)].
6. Ле Вьет Фыонг. Использование высокодисперсных порошков железа, меди, марганца, цинка в премиксах цыплят-бройлеров: дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2006. С. 37-45. [Le V'et Fyong. Ispol'zovanie vysokodispersnykh poroshkov zheleza, medi, margantsa, tsinka v premiksakh tsyplyat-broilerov. [dissertation] Moscow; 2006:37-45. (In Russ)].
7. Мирошников С.А., Кван О.В., Нуржанов Б.С. Роль нормальной микрофлоры в минеральном обмене животных // Вестник Оренбургского государственного университета. 2010. № 6(112). С. 81-83. [Miroshnikov SA, Kvan OV, Nurzhanov BS. Role of normal microflora in mineral turnover of animals. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010;6(112):81-83. (In Russ)].
8. Попов В.В., Рыбина Е.Т. Метод определения переваримости корма «in vitro» // Животноводство. 1983. № 8. С. 37-39. [Popov VV, Rybina ET. Metod opredeleniya perevarimosti korma «in vitro». Zhivotnovodstvo. 1983;8:37-39. (In Russ)].

9. Продуктивное действие и переваримость кормов при использовании в кормлении птицы микрочастиц железа / С.А. Мирошников, Н.В. Гарипова, Т.Н. Холодилина, М.Я. Курилкина, Г.К. Дускаев // Животноводство и кормопроизводство. 2018. Т. 101. № 2. С. 7-16. [Miroshnikov SA, Garipova NV, Kholodilina TN, Kurilkina MYa, Duskaev GK. Productive action and digestibility of feeds after using iron microparticles for feeding of poultry. Animal Husbandry and Fodder Production. 2018;101(2):7-16. (*In Russ*)].
10. Сыrovатка В.И. СВЧ-обработка комбикормов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 1(9). С. 29-37. [Syrovatka VI. Microwave processing of animal feed. Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva. 2013;1(9):29-37. (*In Russ*)].
11. Сыrovатка В.И. Совершенствование технологических процессов производства комбикормов в хозяйствах // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. № 1(13). С. 4-11. [Syrovatka VI. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva kombikormov v khozyaistvakh. Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva. 2014;1(13):4-11. (*In Russ*)].
12. Физико-химические свойства и переваримость кормовых добавок, подвергнутых кавитационной обработке / И.С. Мирошников, Т.Н. Холодилина, Г.К. Дускаев, А.С. Васильченко // Вестник мясного скотоводства. 2016. № 4(96). С. 131-137. [Miroshnikov IS, Kholodilina TN, Duskaev GK, Vasilchenko AS. Physico-chemical properties and digestibility of feed additives, subjected to the cavitation. Herald of Beef Cattle Breeding. 2016;4(96):131-137. (*In Russ*)].
13. Aslam FM, Frazer DM, Faria N, Bruggraber SFA, Wilkins SJ, Cornel M, Powell JJ, Anderson GJ, Pereira DIA. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. The FASEB Journal. 2014;28(8):3671-3678. doi: <https://doi.org/10.1096/fj.14-251520>
14. Cho WS, Duffin R, Poland CA, Duschl A, Oostingh GJ, MacNee W, Bradley M, Megson IL, Donaldson K. Differential pro-inflammatory effects of metal oxide nanoparticles and their soluble ions in vitro and in vivo; zinc and copper nanoparticles, but not their ions, recruit eosinophils to the lungs. Nanotoxicology. 2012;6(1):22-35. doi: 10.3109/17435390.2011.552810
15. In-Chul L, Je-Won K, Sung-Hyun P, Na-Rae S, In-Sik S, Changjong M, Je-Hyun K, Young-Chan K, Jong-Chong K. Comparative toxicity and biodistribution assessments in rats following subchronic oral exposure to copper nanoparticles and microparticles. Particle and Fibre Toxicology. 2016;13:56-73. doi: 10.1186/s12989-016-0169-x
16. Jain TK, Reddy MK, Morales MA, Leslie-Pelecky DL, Labhasetwar V. Biodistribution, clearance, and biocompatibility of iron oxide magnetic nanoparticles in rats. Molecular Pharmaceutics. 2008;5(2):316-327. doi: 10.1021/mp7001285
17. Li CH, Shen CC, Cheng YW, Huang SH, Wu CC, Kao CC, Liao JW, Kang JJ. Organ biodistribution, clearance, and genotoxicity of orally administered zinc oxide nanoparticles in mice. Nanotoxicology. 2012;6(7):746-756. doi: 10.3109/17435390.2011.620717
18. Liu W, Xu F, Li Y, Hu X, Dong B, Xiao Y. Discussion on microwave-matter interaction mechanisms by in situ observation of «Core-Shell» microstructure during microwave sintering. Materials (Basel). 2016;9(3):120. doi: 10.3390/ma9030120
19. Meng H, Chen Z, Xing G, Yuan H, Chen C, Zhao F, Zhang C, Zhao Y. Ultrahigh reactivity provokes nanotoxicity: explanation of oral toxicity of nano-copper particles. Toxicology Letters. 2007;175(1-3):102-110. doi: 10.1016/j.toxlet.2007.09.015
20. Powell JJ, Faria N, Thomas-McKay E, Pele LC. Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract. Journal of Autoimmunity. 2010;34(3):226-233. doi: 10.1016/j.jaut.2009.11.006
21. Powell JJ, Whitehead MW, Ainley CC, Kendall MD, Nicholson JK, Thompson RP. Dietary minerals in the gastrointestinal tract: hydroxy polymerization of aluminum is regulated by luminal mucins. Journal of Inorganic Biochemistry. 1999;75(3):167-180.
22. Seok SH, Cho WS, Park JS, Na Y, Jang A, Kim H, Cho Y, Kim T, You JR, Ko S, Kang BC, Lee JK, Jeong J, Che JH. Rat pancreatitis produced by 13-week administration of zinc oxide nanoparti-

cles: biopersistence of nanoparticles and possible solutions. Journal of Applied Toxicology. 2013;33(10):1089-1096. doi: 10.1002/jat.2862

23. Xu F, Li YC, Hu XF, Au Y, Zhao J, Zhang Z. In situ investigation of metals microwave sintering. Materials Letters. 2011;67(1):162-164. doi: 10.1016/j.matlet.2011.09.052

References

1. Budnikov DA, Vasilyev AA. The influence of uneven distribution of moisture in the grain on the calculation of thermal conductivity during microwave disinfection. Vestnik VIESKH. 2013;2(11):41-44.

2. Vasilev A.A. Statement of the boundary-value of heating and heat transfer in power supply units for microwave installations for agricultural purposes. Vestnik VIESKH. 2018;2(31):48-52.

3. Gataulin AM. The system of applied statistical and mathematical methods for processing experimental data in agriculture. Moscow: Publishing House of TAA;1992:350 p.

4. Sizova EA, Kholodilina TN, Miroshnikov SA, Polyakova VS, Glushchenko N.N. On the development of criteria for the safety of metal nanoparticles after they are introduced into the organism of animals. Herald of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2011;1:40-42.

5. Kiparisov SS, Libenson GA. Powder metallurgy: study guide. Moscow: Metallurgy;1980. 496 p.

6. Le Viet Phuong. The use of highly dispersed powders of iron, copper, manganese, zinc in pre-mixes of broiler chickens [dissertation]. Moscow, 2006. p. 37-45.

7. Miroshnikov SA, Kvan OV, Nurzhanov BS. The role of normal microflora in the mineral metabolism of animals. VESTNIK Orenburg State University. 2010;6(112): 81-83.

8. Popov VV, Rybina ET. Method of estimation of feed digestibility «in vitro». Animal Husbandry. 1983;8:37-39.

9. Miroshnikov SA, Garipova NV, Kholodilina TN, Kurilkina MYa, Duskaev GK. Productive action and digestibility of feeds after using iron microparticles for feeding of poultry. Animal Husbandry and Fodder Production. 2018;101(2):7-16.

10. Syrovatka V.I. Microwave processing of compound feeds. Bulletin of All-Russia Research Institute of Animal Husbandry Mechanization. 2013;1(9):29-37.

11. Syrovatka V.I. Improving the technological processes of production of animal feed in farms. Bulletin of the All-Russia Research Institute of Animal Husbandry Mechanization. 2014;1(13):4-11.

12. Miroshnikov IS, Kholodilina TN, Duskaev GK, Vasilchenko AS. Physico-chemical properties and digestibility of feed additives, subjected to the cavitation. Herald of Beef Cattle Breeding. 2016;4(96):131-137.

13. Aslam FM, Frazer DM, Faria N, Bruggraber SFA, Wilkins SJ, Cornel M, Powell JJ, Anderson GJ, Pereira DIA. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. The FASEB Journal. 2014;28(8):3671-3678. doi: <https://doi.org/10.1096/fj.14-251520>

14. Cho WS, Duffin R, Poland CA, Duschl A, Oostingh GJ, MacNee W, Bradley M, Megson IL, Donaldson K. Differential pro-inflammatory effects of metal oxide nanoparticles and their soluble ions in vitro and in vivo; zinc and copper nanoparticles, but not their ions, recruit eosinophils to the lungs. Nanotoxicology. 2012;6(1):22-35. doi: 10.3109/17435390.2011.552810

15. In-Chul L, Je-Won K, Sung-Hyun P, Na-Rae S, In-Sik S, Changjong M, Je-Hyun K, Young-Chan K, Jong-Chong K. Comparative toxicity and biodistribution assessments in rats following subchronic oral exposure to copper nanoparticles and microparticles. Particle and Fibre Toxicology. 2016;13:56-73. doi: 10.1186/s12989-016-0169-x

16. Jain TK, Reddy MK, Morales MA, Leslie-Pelecky DL, Labhasetwar V. Biodistribution, clearance, and biocompatibility of iron oxide magnetic nanoparticles in rats. Molecular Pharmaceutics. 2008;5(2):316-327. doi: 10.1021/mp7001285

17. Li CH, Shen CC, Cheng YW, Huang SH, Wu CC, Kao CC, Liao JW, Kang JJ. Organ biodistribution, clearance, and genotoxicity of orally administered zinc oxide nanoparticles in mice. Nanotoxicology. 2012;6(7):746-756. doi: 10.3109/17435390.2011.620717

18. Liu W, Xu F, Li Y, Hu X, Dong B, Xiao Y. Discussion on microwave-matter interaction mechanisms by in situ observation of «Core-Shell» microstructure during microwave sintering. *Materials* (Basel). 2016;9(3):120. doi: 10.3390/ma9030120
19. Meng H, Chen Z, Xing G, Yuan H, Chen C, Zhao F, Zhang C, Zhao Y. Ultrahigh reactivity provokes nanotoxicity: explanation of oral toxicity of nano-copper particles. *Toxicology Letters*. 2007;175(1-3):102-110. doi: 10.1016/j.toxlet.2007.09.015
20. Powell JJ, Faria N, Thomas-McKay E, Pele LC Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract. *Journal of Autoimmunity*. 2010;34(3):226-233. doi: 10.1016/j.jaut.2009.11.006
21. Powell JJ, Whitehead MW, Ainley CC, Kendall MD, Nicholson JK, Thompson RP. Dietary minerals in the gastrointestinal tract: hydroxy polymerization of aluminum is regulated by luminal mucins. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 1999;75(3):167-180.
22. Seok SH, Cho WS, Park JS, Na Y, Jang A, Kim H, Cho Y, Kim T, You JR, Ko S, Kang BC, Lee JK, Jeong J, Che JH. Rat pancreatitis produced by 13-week administration of zinc oxide nanoparticles: biopersistence of nanoparticles and possible solutions. *Journal of Applied Toxicology*. 2013;33(10):1089-1096. doi: 10.1002/jat.2862
23. Xu F, Li YC, Hu XF, Au Y, Zhao J, Zhang Z. In situ investigation of metals microwave sintering. *Materials Letters*. 2011;67(1):162-164. doi: 10.1016/j.matlet.2011.09.052

Гарипова Наталия Викторовна, аспирант, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)77-39-97, e-mail: profnat27@mail.ru

Холодилина Татьяна Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий Испытательным центром ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)77-39-97, e-mail: icvniims@mail.ru; доцент кафедры «Экологии и природопользования» Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, e-mail: post@mail.osu.ru

Курилкина Марина Яковлевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник Испытательного центра ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)77-39-97, e-mail: icvniims@mail.ru

Ваншин Владимир Валерьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Технология пищевых производств», Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, e-mail: post@mail.osu.ru

Поступила в редакцию 14 июня 2019 г.; принята после решения редколлегии 17 июня 2019 г.; опубликована 28 июня 2019 г. / Received: 14 June 2019; Accepted: 17 June 2019; Published: 28 June 2019