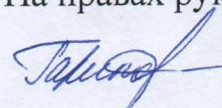


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР БИОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И АГРОТЕХНОЛОГИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

На правах рукописи



Гарипова Наталия Викторовна

ПРОДУКТИВНОСТЬ И КОНВЕРСИЯ ВЕЩЕСТВ И ЭНЕРГИИ У ЦЫПЛЯТ-
БРОЙЛЕРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОРМОВЫХ СРЕДСТВ НА
ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНО-МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ, ОБРАБОТАННОЙ
СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ И УЛЬТРАЗВУКОМ

4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и
производства продукции животноводства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный консультант: доктор
биологических наук, профессор
член-корреспондент РАН
С.А. Мирошников

Оренбург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	4
1	ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	
1.1	Использование минеральных веществ в кормлении цыплят бройлеров	10
1.2	Использование в птицеводстве ультрадисперсных форм жизненно необходимых химических элементов	13
1.3	Железо в кормлении птицы: источники и биологическая роль	20
1.4	Физические методы повышения биодоступности компонентов и повышения продуктивного действия кормов	33
1.5	Создание и применение кормовых добавок на основе растительных субстратов импрегнированных микро- и ультрадисперсными частицами металлов-микроэлементов	38
2	СОБСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	41
2.1	Программа и методы исследований	41
2.1.1	Физико-химическая экспертиза препаратов металлов-микроэлементов	43
2.1.2	Методики обработки кормовых смесей	44
2.1.3	Методика исследований опытных комплексов	48
2.1.4	Методика исследований на модели цыплятах-бройлерах	50
2.2	Результаты пилотного исследования опытных комплексов	55
2.2.1	Физико-химические свойства и переваримость опытных комплексов	55
2.2.2	Ферментативная активность и биодоступность сухого вещества исследуемых опытных комплексов	61
2.3	Оптимизация технологического процесса обработки отрубного комплекса СВЧ излучением и ультразвуком с применением полного факторного эксперимента	69
2.4	Результаты экспериментальных исследований на цыплятах-бройлерах	80
2.4.1	Результаты I эксперимента на птице	80
2.4.1.1	Условия содержания и кормления цыплят-бройлеров	80
2.4.1.2	Переваримость корма подопытной птицей	83
2.4.1.3	Рост и развитие подопытной птицы	85
2.4.1.4	Мясная продуктивность подопытной птицы	88
2.4.1.5	Конверсия энергии и протеина корма в продукцию подопытной птицы	90
2.4.1.6	Резюме по итогам I эксперимента на птице	92
2.4.2	Результаты II эксперимента на птице	93
2.4.2.1	Условия содержания и кормления цыплят-бройлеров	93

2.4.2.2	Переваримость корма подопытной птицей	95
2.4.2.3	Рост и развитие подопытной птицы	97
2.4.2.4	Биохимические показатели крови подопытных цыплят-бройлеров	99
2.4.2.5	Мясная продуктивность подопытных цыплят-бройлеров	102
2.4.2.6	Химический состав и содержание веществ в тканях тела подопытных цыплят-бройлеров	104
2.4.2.7	Конверсия энергии и протеина корма в продукцию подопытной птицы	110
2.5	Результаты производственной проверки	111
3	ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	113
4	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
5	ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ	124
6	ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	125
7	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Совершенствование кормовых добавок идет как по пути расширения состава компонентов – перечня новых жизненно необходимых веществ, так и по пути создания добавок способных оказывать воздействие на пищеварение и обмен веществ в организме сельскохозяйственных животных. К числу последних относятся мультиэнзимные комплексы, фитобиотики и ряд других кормовых добавок. В частности, ферментные препараты используются для расщепления некрахмальных полисахаридов и антипитательных веществ (Егоров И.А. и др., 2010), чёрный перец (*Piper nigrum*) для стимуляции обмена веществ (Moorthy M. et al 2009), фенольные экстракты черники (*Vaccinium corymbosum*) в качестве стимулятора роста цыплят (Salaheen S. et al 2017) и т.д.

Перспективным направлением совершенствования кормовых добавок представляется создание комплексов с поверхностью точек прикрепления ферментов и адгезии микрофлоры для формирования оптимальных условий полостного пищеварения (Курилкина М.Я., и др., 2010).

Степень разработанности темы. Известно, что в ходе полостного пищеварения происходит гидролиз до 50% углеводов и около 10 % белков (Каюмов А.Ф. и др., 2019). При этом расщепление, в ходе полостного пищеварения, некрахмальных полисахаридов, у моногастричных, представляет особый интерес, ввиду способности последних к связыванию и выведению из организма животных жизненно необходимых химических элементов, аминокислот и витаминов (Гречушкин А.И., 2009).

В связи с этим создание в полости кишечника центров адгезии микроорганизмов и прикрепления энзимов позволит повысить эффективность пищеварения. Это становится возможным через создание новых кормовых добавок с основой из полисахаридов в качестве матрицы. Ранее такие решения были реализованы для иммобилизации ферментов и различных биологически

активных веществ при отделке текстильных материалов (Фазилова, С.А. и др., 2010).

На практике использование кормовых средств на основе лигниноцеллюлозной матрицы, импрегнированной ультрадисперсными частицами металлов-микроэлементов позволяет изменять физиологическое действие кормов (Котельникова, Н.Е. Михайлиди А.М., 2009; Курилкина М.Я., и др., 2010). Включение в состав природных полимеров микро- и наноразмерных частиц позволяет изменить сорбционно-кинетические свойства субстрата (Курилкина М.Я. и др., 2011). Вышеописанное решение повышает адгезивные свойства растительных субстратов, стимулируя микробиологические процессы в полости кишечника и тем самым повышая переваримость некрахмальных полисахаридов (Кондакова, К.С. и др., 2012).

Между тем несмотря на многообразие проводимых исследований в этой области действие металлоорганических комплексов на базе лигниноцеллюлозной матрицы на продуктивность и обмен веществ животных не достаточно полно описано. Это стало основанием к проведению исследований по комплексной оценке кормовых средств, полученных путем обработки металлоорганических комплексов электромагнитным и другими видами воздействия, для формирования дополнительного электронного потенциала на поверхности кормовых субстратов, а так же центров прикрепления энзимов и адгезии микрофлоры.

Цель и задачи исследований. Целью данных исследований, которые выполнены по тематическому плану ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (2011-2024 годы №АААА-Б17-217061340056-1) и ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН» по программе ФНИ «Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (№ НИОКТР АААА-А19-119060490012-3, № 0761-2019-005), при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№

075-15-2024-550) являлась разработка новых решений по производству новых кормовых средств на основе кормосмесей и микрочастиц металлов-микроэлементов с последующим изучением действия кормовых средств на обмен веществ и продуктивность цыплят-бройлеров.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучить ферментативную активность, биодоступность сухого вещества «in vitro» и другие характеристики кормовых средств, полученных путем физической обработки смесей растительных субстратов с микрочастицами металлов-микроэлементов.

2. Изучить продуктивное действие и мясную продуктивность цыплят-бройлеров, получающих опытные кормовые средства.

3. Изучить биохимический состав крови цыплят-бройлеров при скормливаниях опытных кормовых средств.

4. Оценить эффективность биоконверсии обменной энергии и протеина корма в организме цыплят-бройлеров при скормливаниях опытных кормовых средств

5. Дать оценку экономической эффективности использования предложенных кормовых средств в кормлении цыплят-бройлеров.

Научная новизна. Впервые, на модели комбинированного физического воздействия высокочастотного (ТВЧ), ультразвукового и сверхвысокочастотного (СВЧ) воздействия на растительные субстраты с включением микрочастиц железа и меди, сформированы представления о повышении питательной ценности кормовых средств.

Впервые, получены экспериментальные данные о физиологическом и продуктивном действии кормовых средств, полученных путем обработки смеси растительных субстратов с микрочастицами железа и меди на организм цыплят-бройлеров. Получены новые для науки данные о биохимическом составе крови птицы при скормливаниях опытных кормовых средств. Впервые, в эксперименте выявлен факт стимулирования кормовыми добавками, полученными путем воздействия СВЧ на комплексы растительных кормов и

микрочастиц металлов-микроэлементов, обмена веществ и продуктивности цыплят-бройлеров (RU 2531321).

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в разработке гипотезы, описывающей свойства кормовых средств, полученных путем обработки растительных субстратов импрегнированных микрочастицами металлов-микроэлементов электромагнитным и другими видами воздействия, для формирования дополнительного электронного потенциала на поверхности кормовых субстратов в целях формирования центров прикрепления энзимов и адгезии микрофлоры. В работе представлены экспериментальные данные подтверждающие обоснованность гипотезы, в части изменения свойств опытных кормовых средств, с констатацией повышения пористости и формирования оптимальной микроструктуры экспериментальных кормов в ходе электромагнитной обработкой СВЧ комплексов растительных кормов с микрочастицами железа.

Использование нового решения по совместному скармливанию кормовых средств на основе растительных субстратов и препаратов микрочастиц железа и меди подвергнутых воздействию СВЧ и УЗ в кормлении цыплят-бройлеров позволяет повысить переваримость питательных веществ корма, и обеспечить повышение рентабельности производства мяса бройлеров на 3-4%.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения задач использовались стандартные зоотехнические, биохимические и физиологические методы исследования с использованием современного оборудования. Полученный результат обработан с применением общепринятых методик при помощи программного пакета «Statistica 10.0».

Основные положения, выносимые на защиту:

Корм, получаемый путем обработки сверхвысокими частотами (СВЧ) смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа по биологическим

характеристикам и продуктивному действию отличается от нативной смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа.

Скармливание цыплятам-бройлерам кормового средства, полученного путем СВЧ воздействия на смесь пшеничных отрубей и микрочастиц железа позволит снизить затраты кормов и повысить интенсивность роста птицы.

Включение в рацион цыплят-бройлеров корма, получаемого путем обработки сверхвысокими частотами (СВЧ) смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа экономически выгодно.

Степень достоверности и апробация работы. Научные положения, выводы и предложения производству обоснованы и базируются на аналитических и экспериментальных данных, степень достоверности которых доказана путем статистической обработки с использованием программного пакета Statistica 10.0.

Выводы и предложения основаны на научных исследованиях, проведенных с использованием современных методов анализа и расчета. Формирование баз данных проводилось с использованием современного оборудования Центров коллективного пользования ФГБОУ ВО «Оренбургского государственного университета» <http://www.osu.ru/doc/1328> и ФГБНУ «ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН» <https://цкп-бст.рф/>.

Основные материалы диссертационной работы доложены и получили положительную оценку на конференциях и семинарах различного уровня: Международной научно-практической конференции (Волгоград, 2009), Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Наука будущего – наука молодых" (Оренбург, 2022). Основные положения работы доложены и обсуждены на расширенном заседании научных сотрудников и специалистов отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормления им. профессора С.Г. Леушина ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (Оренбург, 2025) и Института биоэлементологии ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (Оренбург, 2008, 2013, 2015, 2025).

Реализация результатов исследований. Результаты исследований внедрены в производство на ЗАО «Птицефабрика Оренбургская».

Публикация материалов исследований. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 1 статья в изданиях, индексируемых в базах *Web of Science* и *Scopus*; 7 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки Российской Федерации. Новизна исследований подтверждена 1 патентом РФ на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертационная работа представлена на 149 страницах компьютерной верстки, состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием материалов и методов исследований, глав собственных исследований, обсуждения полученных результатов, выводов, предложений производству и перспектив дальнейшей разработки темы. Содержит 33 таблицы, 20 рисунков., 1 приложение. Список литературы включает 278 источников, в том числе 216 зарубежных.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Использование минеральных веществ в кормлении цыплят бройлеров

В настоящее время 44% всего произведенного в нашей стране мяса приходится на долю мяса птицы. При этом по данным на 2025 год, доля мяса бройлеров в структуре отечественного производства мяса птицы в России составляет около 92%. (Fisinin V. I., Egorova I. A., Lenkova T. N., 2016; <https://svoefarmerstvo.ru/svoemedia/articles/rynok-mjasa-pticy-ob-emy-trendy-perspektivy>). В связи с этим работы отечественных и зарубежных ученых, направленные на изучение влияния различных факторов на качество и безопасности мяса цыплят-бройлеров имеет большое значение (Егоров И.А. и др., 2004, 2005). В целях обеспечения нормальной жизнедеятельности и высокой продуктивности современных кроссов предъявляются особые требования к их кормлению (Фисинин В.И. и др., 2009; Egorov I. A., et al 2016; Lenkova T. N., et al 2019). Следует отметить, что за последние десятилетия в бройлерном производстве отмечался самый высокий рост суточных приростов среди всех видов сельскохозяйственных животных (Фисинин В.И. и др., 2005; 2010; 2011).

Данные исследования, предъявляют особые требования к формированию рационов птицы. В этой связи, заявленные в конце прошлого века требования к минеральной компоненте рационов бройлеров, сегодня очевидно не выдерживают требования (Манукян В.А., и др., 2015; Фисинин, В.И. и др., 2015). Сверхинтенсивное выращивание подтолкнуло бройлерную промышленность к использованию новых норм и новых источников минералов в рецептуре.

Как известно для птицы незаменимые макроэлементы включают Са, Р, калий (К), натрий (Na) и хлор (Cl). Избыток кальция в рационе негативно сказывается на биодоступности Р, Mg, Mn (NRC 1994). У растущих цыплят оптимальный рост тела и кальцификация костей происходят с уровнями Са в

диапазоне от 0,6 до 1,2 %, при доступном уровне Р 0,45–0,5 % (Scott et al. 1982), а уровни, рекомендуемые промышленностью 0,35–0,45% (Al-Masri 1995). Калий, натрий и хлор являются важными детерминантами кислотно-щелочного баланса (NRC 1994).

В перечень жизненно необходимых микроэлементов включают Mn, Zn, Fe, Cu, Mo, Se, I и Co (Околелова, Т.М. и др., 2000, 2012; Манукян В.А. и др., 2018). Как правило химические элементы этой группы являются кофакторами ферментативных систем организма птицы (Манукян В.А., Джавадов Э.Д., Дмитриева М.Е., и др., 2013). Некоторые элементы, в том числе фтор, никель, кремний, олово, ванадий и хром, как было показано, производят полезные эффекты в питании цыплят, но как это происходит, неизвестно. Эти элементы принято относить к условно-жизненно необходимым (Скотт и др., 1982). Молибден необходим для образования и поддержания нормальный уровень ксантиноксидазы в печени и кишечнике, но задержка роста из-за дефицита Мо не вызвана нарушение активности этого фермента. Молибден в изолированный соевый белок недоступен для цыплят. При этом принято, что связанный Мо из состава минеральных солей в среднем всасывается только 16% (Novotry J.A., Turnlund J., 2006).

Неорганические соли, обычно используемые в качестве кормовых добавок, характеризуются относительно не высокой биодоступностью для животных (Pantopoulos, K. et al., 2012; Manocha, S. et al., 2022). В этой связи может оказаться перспективным применение решений, предлагаемых нанотехнологиями, для минимизации этого негативного воздействия на окружающую среду, а также для улучшения здоровья и продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы. В настоящее время нанобиотехнология является новой областью зоотехнии и ветеринарии, в том числе применительно к терапевтическому, диагностическому и пищевому применению (Prasad, M. et al., 2018; Patra A., Lalhriatpuii M., 2020; Pardo, M. R. et al., 2021; El-Maddawy, Z. K. et al., 2022).

Дефицит или избыток отдельных жизненно необходимых химических элементов может привести к нарушению роста птицы, аномальному их развитию, затрагивающему все основные системы, в крайних случаях, к гибели эмбриона (Richards M. P., Steele N. C., 1987; Richards M. P., 1989). Дополнительное поступление эссенциальных веществ в яйцо из вне сопровождается повышением интенсивности роста и развития птицы. Так раствор аминокислот, введенный в куриные яйца на 7-й день инкубации, улучшил массу тела по сравнению с массой яйца (Ohta Y. et al., 1999). Эксперименты показали, что при кормлении яйцеклеток углеводами ИСБ, или как углеводы, так и НМВ увеличил массу тела бройлеров, в частности грудную мышцу. Также в этом эксперименте при контрольных обработках наблюдалось значительное увеличение начальной массы тела цыплят при введении УДЧ железа.

Seo et al. (2008) пришли к выводу, что содержание железа в мясе бройлеров можно эффективно повысить добавлением Fe в составе хелата Fe-Alimet в течение 5 недель. Аналогичные данные получены для концентраций железа в печени и почках свиней (Feng J. et al., 2009; Bertechini A. et al., 2012) и цыплят (Seo S. H. et al., 2008; Shinde P. L. et al., 2011). Наибольшее среднее увеличение составило 22 и 31,9 % для мышц и печени бройлеров, соответственно.

В последние годы в практическом кормопроизводстве все большее распространение стали получать препараты металлов-микроэлементов в микро- и ультрадисперсной форме (МУДМ). В их числе принято различать микрочастицы, с размером частиц от 100 нм до 10 мкм, а так же МУДМ с размером от 1 до 100 нм (Swain, P. S. et al., 2016; Сизова Е.А., 2017; Kociova S. et al., 2020). (Мирошников С.А., Сизова Е.А., 2017; Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., 2020).

Использование в кормлении животных минеральных веществ в ультрадисперсной форме оправдано более высокой биодоступностью (Сизова Е.А., и др., 2011, 2016; Аринжанов А.Е., и др., 2015; Xie, C. et al., 2019) и

такими уникальными свойствам, как небольшой размер и большая площадь поверхности (Saki A. A., Abbasinezhad M., Rafati A. A., 2014; Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., 2020). Уникальные биологические свойства МУДМ определяют перспективы применения этих веществ в животноводстве (Лебедев С.В. и др., 2008, 2009, 2018; Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., 2020; Abdollahi M., et al., 2020; Szuba-Trznadel, A. et al., 2021). Это позволит снизить стоимость продукции животноводства (Нестеров Д.В., 2009) и, таким образом, воздействие на окружающую среду, вызванное высокой концентрацией химических элементов в рационах современных кроссов птицы будет снижено (Егоров, И. и др., 2004, 2007, 2013; Vijayakumar, M., Balakrishnan, V., 2014; Ouyang, Z. et al., 2021). Сокращение массы минералов, добавляемых в рацион животных, также может снизить стоимость корма (Vijayakumar, M., Balakrishnan, V., 2014).

Включение МУДМ в корм сопровождается повышением интенсивности роста, использования корма и состояния здоровья птицы (Bąkowski, M. et al., 2018; Dawood, M. A. et al., 2021).

Металлы в ультрадисперсной форме перспективны для замещения кормовых антибиотиков (Егоров И. и др., 2013; Bąkowski, M. et al., 2018; Kumar I., Bhattacharya J., 2019; Sheiha, A. M. et al., 2020; Мирошникова М.С. и др., 2021). В связи с вышесказанным представляется актуальной всесторонняя оценка препаратов МУДМ как перспективных комплексов в кормлении птицы.

1.2 Использование в птицеводстве ультрадисперсных форм жизненно необходимых химических элементов.

Наука накопила значительные базы данных, раскрывающие механизмы и описывающие действие микро- и ультрадисперсных материалов на организм человека и животных. Так только на информационном ресурсе <https://www.ncbi.nlm.nih.gov> по ключевому слову «Nanoparticles» выявляется

более 415 тысяч полнотекстовых научных работ; по ключевым словам, «nanoparticles and chickens» более 5,8 тысяч!

Применение препаратов МУДМ в птицеводстве разнообразно. Наиболее широко применяются препараты МУДМ - меди, цинка, оксида цинка, золота, серебра, селена, хитозан, хром и другие. Последние используются в диагностических методах, препаратах вакцин, иммуностимуляторах, дезинфицирующих средствах, стимулировании производства, противомикробных препаратах (антибактериальных, противовирусных, противопаразитарных и противогрибковых), а также в средствах против микотоксинов (Patra, A., Lalhriatpuii M., 2020).

Ввиду уникальных свойств МУДМ по способности проникать в ткани, введение последних в организм возможно как перорально, ингаляционно, так и местно или инъекционно. Поглощение МУДМ через ЖКТ опосредовано пассивной диффузией через кишечную слизь. Скорость диффузии частиц зависит от их размера, заряда и поверхности. Более мелкие частицы демонстрируют более быструю диффузию и легко преодолевают барьер слизистых, чем более крупные. Как правило, эффективная доставка активных соединений с использованием МУДМ в целевые участки может улучшить биодоступность питательных веществ (Chen H., Weiss J., Shahidi F., 2006; Aminullah N. Et al., 2021).

Результаты показали, что УДЧ селена действуют аналогично органическому селену и потенциально могут использоваться в кормах для птицы в качестве добавки микроэлементов для улучшения конверсии корма и повышения интенсивности роста (Gangadoo, S. et al., 2020). Хитозан, липосомы, полимеры, такие как полимолочно-гликолевая кислота, используются для защиты силы и эффективности пероральной ультрадисперсной добавки и повышения биодоступности за счет защиты добавки от нежелательной ферментативной активности, а также разложения микроорганизмами.

Ранее изучался эффект использования различных типов препаратов МУДМ для улучшения продуктивности и производственных параметров цыплят-бройлеров (Abd El-Ghany, W. A., 2019). Добавление МУДМ фосфата в корм для цыплят-бройлеров показало более высокий коэффициент конверсии корма по сравнению с контрольными группами. Использование УДЧ Cu в концентрации 50 мг/кг рациона бройлеров оказывало проангиогенный эффект на системном уровне, с развитием кровеносных сосудов в процессе эмбриогенеза, что выражалось в увеличении грудных и ножных мышц и улучшении коэффициента конверсии корма у бройлеров куры (Mroczek - Sosnowska, N. et al., 2016). Добавление в корм МУДМ селена повысило показатели роста, качество мяса и антиоксидантный статус. Добавление медно-хитозановых УДЧ в корма бройлеров оказало положительное влияние на показатели их роста и показатели иммунитета. Точно так же УДЧ ZnO в корме (20 мг/кг) улучшали показатели роста и антиоксидантную способность (Anwar, M. I. et al., 2019). У индеек, получавших рацион, с включение МУДМ Se и Zn, было выявлено значительное улучшение конверсии корма. Добавление МУДМ Cu и Zn в рацион индюшат, в дозе, покрывающей 10% потребности, сопровождается оптимизации процессов гомеостаза в мышцах (Jóźwik A., et al., 2018).

Ультрадисперсные частицы ZnO действуют как антимикробный агент, ингибируя клеточные процессы бактерий, такие как гликолиз и трансмембранная транслокация протонов, и препятствуя репликации бактерий в дополнение к высвобождению ионов Zn^{2+} и активных форм кислорода (Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., 2015).

Препараты ультрадисперсных частиц меди, цинка и селена могут повышать активность фермента супероксиддисмутазы, который представляет собой очень важную антиоксидантную защиту от окислительного стресса (Kojouri G., Arbabi F., Mohebbi A., 2020; Hidayat, C. et al., 2021). В то же время в литературе есть ссылки на исследования демонстрирующие противоположные эффекты (Scott, A. et al., 2016; Bąkowski, M. et al., 2018).

При использовании МУДМ в кормлении животных важны несколько аспектов. МУДМ металлов-оксидов металлов, используемых в качестве кормовых добавок, могут быть добавлены непосредственно в корм или в питьевую воду. В случае домашней птицы введение МУДМ *in ovo* можно использовать как метод нанопитания, снабжая эмбрионы дополнительным количеством питательных веществ (Mroczek-Sosnowska, N. et al., 2017; Saeed, M. et al., 2019). Предполагается, что введение металлосодержащих МУДМ *in ovo* позволяет лучше использовать микроэлементы в процессе развития эмбриона, чем в случае кормовые добавки (Mroczek-Sosnowska N. et al., 2016). Другим методом введения металлосодержащих МУДМ является парентеральная инъекция – внутримышечная (например, цыплятам – (Matuszewski A., Łukasiewicz M., Niemiec J., 2020) или подкожная (например, кроликам – (Abdelsalam, M. et al., 2019).

Токсикологические исследования ультрадисперсного железа показали, что такие железные порошки малотоксичны. МУДМ оксида железа биосовместимы (Koh I. et al., 2006) благодаря их общей стабильности и способности разлагаться *in vivo* (Bronstein L. M. et al., 2007). Введение питательных веществ *in ovo* может стать альтернативным методом для птицеводческих компаний по увеличению веса цыплят в день вылупления. На цыплят влияют питательные вещества, содержащиеся в желтке, остающемся в брюшной полости после вылупления (Romanoff A. J., 1960).

M. Eskandani et al. (2021) сравнили влияние различных источников цинка в рационе цыплят-бройлеров, в том числе $ZnSO_4$, органо-аминокислотного комплекса и МУДМ Zn на продуктивность, характеристики тушки, гуморальный иммунитет, качество мяса и содержание цинка в мясе. Улучшение этих показателей наблюдалось при применении МУДМ Zn в дозе 70 мг/кг рациона. Также исследователи протестировали несколько доз МУДМ Zn (45, 90, 135 и 180 мг/кг) на бройлерах. Добавление МУДМ цинка до 90 мг/кг оказало положительное влияние на работоспособность, антиоксидантную активность и снижение популяции патогенных кишечных

бактерий (*E. coli* и *Salmonella sp.*). Кроме того, они проявляли противогрибковую активность против токсигенных плесеней в кормовых системах (*Aspergillus flavus*, *A. ochraceus* и *A. niger*). Масса лимфоидных органов у цыплят-бройлеров увеличилась, а также гуморальный иммунитет был улучшен за счет добавления МУДМ Zn (0,06 мг/кг рациона) аналогично 15 мг/кг рациона органического цинка (Sahoo, A. et al., 2014).

Также известно об увеличении продукции IgY и клеточного иммунитета (общее количество лимфоцитов, макрофагов, фагоцитарная активность и индекс) у цыплят-бройлеров при добавлении ZnO по сравнению с МУДМ ZnO. МУДМ цинка (20, 40, 60 и 80 мкг/яйцо), добавленная in ovo в оплодотворенные яйца бройлеров, не оказала вредного влияния на развитие эмбриона, не повлияла на выводимость и может быть использована для улучшения постнатальных показателей бройлеров (Joshua, P. P. et al., 2016).

Введение цинка в ультрадисперсной форме в рацион индюшат в дозе, покрывающей 10 % потребности (10 мг/кг рациона), поддерживало гомеостаз в мышцах индюков, о чем свидетельствует активность аминопептидаз (аланил, лейцил и аргинил) (Jóźwik, A. et al., 2018).

В литературе встречаются совершенно противоположные выводы по практике применения МУДМ. Так, M. Abbasi et al. (2017) при оценке дозозависимой реакции на добавку МУДМ ZnO (25, 50, 75 и 100 мг/кг) констатировал факт снижения толщины яичной скорлупы и механических характеристик костей. В то время как M. Abedini et al. (2018) обнаружили, что у кур-несушек, получавших 40 и 80 мг Zn/кг корма в виде МУДМ ZnO, увеличилась толщина и прочность яичной скорлупы.

Добавление МУДМ ZnO сопровождается смягчением негативных последствий теплового стресса. H. Akhavan-Salamat и H. Ghasemi (2019) сравнили три источника пищевого цинка (оксид цинка, Zn-метионин (Zn-Met) и МУДМ оксида цинка — МУДМ (ZnO) и три дозы дополнительного цинка (низкая: 20 мг/кг, достаточная: 40 мг/кг, и высокая: 80 мг/кг рациона) цыплятам-бройлерам, выращенным в условиях теплового стресса, начиная с

14-го по 42-й дни. Диетический Zn не влиял на показатели роста, вызванные содержанием Zn, относительный вес селезенки и активность супероксиддисмутаза в сыворотке в группах, получавших Zn-Met и МУДМ ZnO, были значительно выше, чем у получавших оксидную форму.

U. Mahmoud с соавторами (2021) показали, что пищевые добавки МУДМ ZnO в дозе 10, 20, 30 или 40 мг/кг рациона предотвращают множественную лекарственную устойчивость бактерий *Staphylococcus aureus*, которые вызывают дерматит подушечек лап, и ослабляют негативное влияние на поведение (стояние и ходьба), продуктивность (ежедневный прирост живой массы, коэффициент конверсии корма) у бройлеров. Кроме того, МУДМ оксида цинка продемонстрировали антикокцидийный эффект у цыплят-бройлеров, экспериментально инфицированных смесью *Eimeria maxima*, *E. acervulina*, *E. mivati* и *E. tenella*, и оказались такими же эффективными, как диклазурил, химический антикокцидийный препарат, при оценке показателей роста, паразитологических и гематологических параметров, а также антиоксидантной активности.

МУДМ меди изучаются во многих аспектах кормления птицы. В исследованиях N. Aminullah и др. (2021) показано, что неорганическая форма Cu (CuSO_4) может быть заменена 50% органической (Cu протеинат) или 25% ультрадисперсной формой без негативного влияния на продуктивность кур, выводимость, потомство и качество яиц. С.А. Мирошников и др. (2015) вводили УДЧ меди цыплятам-бройлерам путем однократной внутримышечной инъекции. Наблюдалась быстрая стимуляция роста и метаболические изменения. Концентрация меди и белка в сыворотке изменялась только через 7 и 21 сутки после введения. Также оценивалось влияние добавок МУДМ меди на всасывание кальция, железа и цинка в кишечнике. Пероральное введение МУДМ меди (5, 10 и 15 мг/л) цыплятам кросса Росс 308 приводило к накоплению этого элемента в стенках кишечника. При дозе МУДМ меди 15 мг/л концентрация меди в плазме увеличивалась. Предполагается, что накопление меди в кишечнике может снижать всасывание кальция и цинка, но

не влияет на всасывание железа. Для домашней птицы применение МУДМ меди *in ovo* показало многообещающие результаты.

N. Mroczek-Sosnowska с соавторами (2016) продемонстрировали, что *in ovo* введение МУДМ меди (0,3 мл 50 мг/л) оказало положительное влияние на продуктивность цыплят-бройлеров (например, массу тела) по сравнению с контрольной группой. Группа с МУДМ меди имела значительно более низкие коэффициент конверсии корма и смертность, а также более высокий процент мышц груди и ног в туше по сравнению с контрольной группой. N. Mroczek - Sosnowska с соавторами (2017) оценили препарат ультрадисперсной меди как средство, позволяющее свести к минимуму проблему слабость костей у цыплят-бройлеров, что обусловлено быстрым набором живой массы и нарушением баланса между приростом мышечной и костной массы. Введение МУДМ меди *in ovo* в начале эмбриогенеза привело к образованию бедренной кости, которая характеризовалась большей массой и объемом, а также достоверно большей устойчивостью к переломам по сравнению с контрольной группой. Кроме того, применение МУДМ меди *in ovo* на стадии развития куриного эмбриона не несет угрозы избыточного накопления меди в таких органах птицы, как печени, селезенки и мышц в зависимости от возраста на момент убоя.

S. Gangadoo и др. (2018, 2020) продемонстрировали, что МУДМ селена в дозе 0,9 мг/кг рациона показали наилучшие результаты, улучшили здоровье кишечника за счет увеличения популяции полезных бактерий, таких как *Lactobacillus* и *Faecalibacterium prausnitzii* и короткоцепочечных жирных кислот. Кроме того, добавление 0,3 мг ультрадисперсного селена на кг рациона цыплят-бройлеров, содержащихся при высокой температуре окружающей среды, облегчало его негативные последствия, такие как снижение прироста живой массы, потребление корма, коэффициент конверсии корма, массу грудных мышц. В группе ультрадисперсного селена наблюдалось снижение содержания малонового диальдегида в печени и грудной мышце и увеличение содержания селена и витамина Е в грудной

мышце. Аналогичные результаты на модели кур-несушек получены Р. Mohapatra, (2014).

Добавление в рацион подрастающих перепелов 0,2, 0,4 и 0,6 г/кг рациона МУДМ Se увеличивало прирост живой массы и коэффициент конверсии корма, в то время как потребление корма снижалось по сравнению с контрольной группой, при этом наибольший эффект был зарегистрирован при дозе 0,4 г/кг рациона. Они значительно улучшили липидный профиль плазмы, активность антиоксидантных ферментов, показатели иммуноглобулина G, биохимию крови и бактериальную среду кишечника перепелов (Alagawany, M. et al., 2021).

МУДМ ZnO при применении в дозах 40 и 80 мг/кг в качестве пищевой добавки для кур значительно улучшают активность глутатионпероксидазы и общую антиоксидантную способность в сыворотке крови и снижают содержание малонового диальдегида в сыворотке крови, который усиливает антиоксидантную функцию у бройлеров, усиливает активность антиоксидантных ферментов и снижает уровень свободных радикалов (Swain, P. S., 2016). Добавление МУДМ селена в рацион кур-несушек улучшило профиль жирных кислот в яйцах за счет снижения соотношения насыщенных и ненасыщенных кислот. Кроме того, уровень общих липидов и холестерина в сыворотке достоверно снижен, а уровень ЛПВП в яичном желтке и плазме кур-несушек повышен.

1.3 Железо в кормлении птицы: источники и биологическая роль

Железо (Fe) — это жизненно необходимый микроэлемент, играющий важную роль в транспортировке кислорода, синтезе нуклеиновых кислот и переносе электронов во время дыхания (Han, Miaomiao et al., 2022). Железо является жизненно важным кофактором многих ферментов, таких как ацетилкоэнзим А, сукцинодегидрогеназа, ксантиноксидаза и цитохромредуктаза. Железо транспортируется в эпителиальные клетки тонкой

кишки с помощью транспортера двухвалентного металла после восстановления формы железа (Fe^{3+}) дуоденальным цитохромом до формы железа (Fe^{2+}). Впоследствии железо накапливается в эпителиальных клетках тонкой кишки до тех пор, пока не будет транспортировано в кровоток с помощью ферропортина (Bai, Ding-Ping et al., 2018; Conrad et al., 2000).

Существующие сегодня требования к питательным веществам, рекомендации и таблицы руководств содержат различные рекомендации по использованию железа в кормлении птицы. В зависимости от возраста птицы и измеренных реакций рекомендации по добавлению железа в рацион варьируются от 20 до 100 частей на миллион без указания источника железа и ограниченной информации о различиях в доступности железа между источниками (Sheppard and Dierenfeld, 2002; FEDNA, 2008; Rostagno et al., 2011; Cobb-Vantress, 2013; M. Abbasi, M. et al., 2015; Егоров И.А., и др., 2017).

Генетический отбор значительно увеличил яйценоскость производителей и ранний рост цыплят-бройлеров; однако влияние этого на потребности в Fe неизвестно. С другой стороны, было показано, что содержание железа в желтке, выводимость оплодотворенных яиц, а также гематокрит (Ht) и гемоглобин (Hb) у кур и цыплят зависят от концентрации железа в рационе (Morck T.A., Austic R.E., 1981; Bertechini et al., 2000). Увеличение яйценоскости родительского стада бройлеров и высокие темпы раннего роста вылупляющихся цыплят, возможно, привели к увеличению потребностей в пищевых добавках, особенно из-за того, что производители придерживаются ограниченного режима кормления.

Железо накапливается в организме в больших количествах, главным образом в ретикулоэндотелиальных клетках печени, селезенки и костного мозга. Пищевые потребности в железе можно регулировать, увеличивая или уменьшая скорость усвоения этого микроэлемента различными путями в зависимости от уровня железа в организме (Grotto, 2008). Эти процессы связаны с рецепторами на поверхности энтероцитов, например, с белком-переносчиком гема 1 (HCP1), который отвечает за всасывание гема-Fe в

кишечнике (Shayeghi et al. 2005), тогда как переносчик двухвалентного металла 1 (DMT1) может захватывать неорганический Fe^{+2} и высвобождать его непосредственно в цитоплазму (Mackenzie B., Garrick M.D., 2005). Экспрессия DMT1 повышается, когда уровни Fe в организме низкие (Leong et al., 2003).

Не было замечено влияния железа, усвоенного из кормов на соотношение компонентов яйца, удельный вес яичной скорлупы или цвет яичной скорлупы; однако производство яиц значительно увеличилось при добавлении железа. Количество яиц на одну размещенную курицу было максимальным при 96,2 и 87,3 промилле (модели BL и QR соответственно), тогда как количество инкубационных яиц было максимальным при 96,8, 76,4 и 97,9 промилле (модели BL, QR и EA соответственно).

Исследований взаимосвязи между пищевым железом и его отложением в желтке, о которых сообщается в литературе, немного. T.A. Morck, R.E. Austic (1981) продемонстрировали, что куры-несушки производили яйца с пониженным содержанием железа в желтке (68 частей на миллион) после того, как их кормили диетой с дефицитом железа (15 частей на миллион общего содержания железа) в течение 3 недель. M. Abbasi et al. (2015) продемонстрировали линейное увеличение содержания Fe в желтке до 212, 215, 229 и 243 частей на миллион соответственно, когда кур-производителей кормили Fe из сульфата при 37, 52, 67 и 82 частях на миллион с 62 по 68 недель. Поскольку желток представляет собой самое большое скопление большинства необходимых микроэлементов в яйце, он важен как основной источник железа, передаваемого эмбриону во время инкубации.

Включение железа в рацион кур оказывало непосредственное влияние на уровень Hb и Ht в их крови. У людей показатель железа в плазме и сыворотке, ферритин, а также концентрация рецептора трансферрина клеточной поверхности (TfR) и отношение TfR к ферритину (Abbaspour N., et al., 2014) являются другими измерениями, используемыми в дополнение к измененным Hb и Ht при анемии. В настоящем исследовании использовалась большая

популяция животных, и поскольку не было никаких признаков других заболеваний, связанных с Fe, Ht и Hb считались адекватными показателями статуса Fe в организме. Положительную корреляцию между Ht и добавленным Fe наблюдали T.A. Morck, R.E. Austic (1981), используя 6 увеличивающих уровни Fe с 10 до 50 частей на миллион, добавленных к очищенному рациону, содержащему 15 частей на миллион Fe, у кур-несушек в возрасте от 29 до 36 недель. Корректировки QR и BL, наблюдаемые в настоящем исследовании, произошли при максимальных реакциях куриц на Ht при 130 и 135 и на Hb при 133,8 и 77,9 промилле пищевого Fe. С другой стороны, ожидается, что увеличение содержания Ht и Hb в выводящихся цыплятах по мере увеличения рациона Fe, который скармливают курам, принесет пользу при помещении цыплят в условия окружающей среды с неоптимальной концентрацией кислорода, например, в высокогорных районах или в бройлерных помещениях без надлежащего обновления воздуха.

Железо в практическом птицеводстве, обычно не считается очень важным химическим элементом для домашней птицы, поскольку оно широко распространено в природе, имея разумные концентрации в большинстве ингредиентов корма, включая некоторые с очень высоким содержанием, такие как известняк (NRC, 1994). С практической точки зрения считалось, что это предотвращает дефицит железа, хотя его биодоступность из известняка остается в значительной степени неизвестной. Модели выбора, используемые в исследованиях на животных для обеспечения оценки потребностей, основаны на различных регрессионных методах, но все они должны соответствовать математической и биологической значимости (Rodehutsord M., Rack M., 1999). Сравнение моделей по их R², а также по сумме остаточных квадратов обычно выбирается для определения потребностей в питательных веществах, поскольку они обеспечивают соответствие, которое наилучшим образом соответствует реакции кур при используемых уровнях добавок. В этом исследовании все протестированные модели были статистически

значимыми, а R² уравнений регрессии QR, BL и EA был одинаковым для большинства данных.

Исследования показывают, что рационы, дополненные соответствующими дозами органического железа, могут улучшить показатели роста, повысить иммунный и антиоксидантный статус и улучшить качество яиц (Sarlak, S. et al., 2021; Jarosz, Ł. Et al., 2021). Национальный исследовательский совет заявляет, что потребность в железе у бройлеров составляет примерно 80 мг/кг (NRC, 1994). Однако исследования по питанию домашней птицы показали, что рекомендации сильно варьируются в пределах 45-136 мг Fe/кг (Lin, X. Et al., 2020). Сообщалось, что потребность в железе на уровне 97-136 мг/кг сухого вещества в рационе бройлеров повышает экспрессию Fe-содержащих ферментов в печени или сердце (Ma, X. Et AL., 2020; Liao, X. ET AL., 2017). Однако, когда потребление железа превышает пищевую потребность, избыток железа откладывается в печени. Перегрузка железом может вызывать окислительный стресс (Galaris, D.; Barbouti, A.; Pantopoulos, K., 2019), ослаблять иммунитет, высвобождая воспалительные цитокины, ускоряют апоптоз гепатоцитов и вызывают серьезные структурные и функциональные повреждения печени, сердца или кишечника (Zhang, Y. et al., 2020; Luo, Q. Et al., 2021).

Введение в рацион с высоким содержанием железа (500 мг Fe/кг массы тела) в форме гептагидрата сульфата железа уменьшает отложение абдоминального жира и накопление триглицеридов в печени у самцов бройлеров Ross 308 (Bai, S. et al., 2021). Кроме того, перегрузка железом может привести к патогенезу атеросклероза, поскольку избыток Fe тесно связан с образованием активных форм кислорода (АФК), окислением липопротеинов и активация тромбоцитов у мышей (Wan, Q. Et al., 2021; Marques, V.B. et al., 2019). Следовательно, следует учитывать потенциальное токсическое воздействие высокого содержания железа в рационах бройлеров.

Железо как химический элемент в кормах, в основном присутствует в неорганических формах в виде сульфата железа, в формах органических

кислот в виде фумарата и цитрата или в виде аминокислотных хелатов с глицином и метионином, а также в форме ультрадисперсных препаратов (Hertrampf E.; Olivares, M., 2004; Zhang, L.Y. et al., 2017). Аминокислотные хелаты железа обладают значительно более высокой биодоступностью и стабильностью, чем неорганические формы (Jarosz, Ł. Et al., 2021). Кроме того, органические формы являются экологически безопасными и менее токсичными, чем неорганические формы. Хелаты железа с лизином и глутаминовой кислотой (Fe–LG) представляют собой новую форму комплексных аминокислотных хелатов, которая рассматривается как замена другим разрешенным добавкам Fe и не увеличивает нагрузку на окружающую среду Fe (EFSA Panel., 2019). Fe–LG обладает несколькими питательными функциями, производными от Fe, лизина и глутаминовой кислоты. Лизин важен для развития мышц и иммунитета у цыплят (Tesseraud, S. et al., 1996; Konashi, S.; Takahashi, K.; Akiba, Y., 2000). Глутаминовая кислота необходима для биосинтеза глутамина, ключевого нейромедиатора (Kumar, P. et al., 2021).

Внесение железа 40 мг/кг не оказало никакого влияния на показатели роста цыплят–бройлеров, что согласуется с результатом, сообщенным Европейским управлением по безопасности пищевых продуктов (EFSA) о 40 мг Fe/кг в форме Fe-LG в Бройлеры Ross 308 (EFSA Panel., 2019). Lin, X. et al. (2020) указали, что показатели роста в Линнэне на желтых цыплятах-бройлеров не влияли рационы с добавлением 50-150 мг/кг в виде FeSO₄·7H₂O.

X.Ma, et al. (2016) указали на то, что рационы с добавлением 40-60 мг Fe/кг в форме FeSO₄·7H₂O увеличивали массу тела, но рационы с добавлением 80-120 мг Fe/кг не испытывал эффекта роста производительности с 1-го по 21-й день. Кроме того, предыдущие исследования показали оптимальную дозу Fe 127 мг/кг и 118 мг/кг в форме FeSO₄·7H₂O, основанную на максимальных показателях роста (Ma, X. et al., 2016).

Согласно Руководству по оценке безопасности кормовой добавки (EFSA Panel., 2017), уровень использования Fe был установлен на уровне 80 мг/кг в одном исследовании (Fu, X.S. et al., 2021), а уровни в другом исследовании

были установлены на уровне 400 мг/кг (5-кратный уровень использования) и 800 мг/кг (10-кратный уровень использования). В исследовании добавка к рациону, содержащему 800 мг железа/кг, снизила массу тела бройлеров на 21-й день и ADG на 1-21-й дни. Кроме того, не было никаких различий в ADFI и FCR ни во время фазы роста, ни в течение всего экспериментального периода, что может быть связано со снижением поглощения Fe с возрастом (Сао, J. et al., 1996). Текущий результат согласуется с предыдущими результатами, в которых сообщалось, что введение с пищей железа в количестве 690 мг/кг в виде сульфата железа снижает показатели роста бройлеров в течение 1-21 дней (Bai, S. et al., 2021). Однако EFSA (EFSA Panel., 2019) сообщило, что масса тела, потребление корма и FCR у цыплят Ross 308 не изменялись в ответ на потребление рациона, содержащего 290 или 590 мг/кг железа в форме Fe–LG, в то время как масса тела и потребление корма увеличиваются при добавлении 590 мг/кг железа в форме сульфата железа. Однако у FCR не было обнаружено никаких очевидных эффектов, независимо от уровней добавок (290 или 590 мг Fe/кг) или форм (Fe–LG или сульфат Fe).

Z.Y. Gou, et al. (2018) сообщили, что у бройлеров Lingnan, которых кормили 700 и 1400 мг железа/кг в форме глюконата железа в течение 1-21 дней отмечалось увеличение массы тела. Следовательно, разное влияние на показатели роста может быть обусловлено стадиями и породами животных, дозами железа и биодоступностью источников железа. Органный индекс является важным параметром, отражающим состояние развития органов у животных (Maatjens, C.M. et al., 2016).

S. Bai, et al. (2021) сообщили, что значительные по массе добавки железа (500 мг Fe/кг) в форме гептагидрата сульфата Fe не влияют на массу печени и выход данного органа в течение 1-21 дней у бройлеров кросса Ross 308. В текущем исследовании показатели массы печени на 42-й день снизились у бройлеров, которых кормили рационами, дополненными 400 и 800 мг железа/кг. Кроме того, добавление железа в количестве 800 мг /кг значительно снизило показатели сердца, селезенки и почек, что может быть вызвано

отложением железа в организме или изменениями в липидном обмене из-за высокого содержания железа в рационе бройлеров.

Анализ биохимических параметров представляет собой ценные показатели для оценки интенсивности и направления метаболических изменений, происходящих в организмах, или их реакции на кормовые добавки (Dmoch, M.; Polonis, A., 2011). Печень является основным органом-мишенью для детоксикации токсинов и тяжелых металлов, кроме почек (Tsiouris, V. et al., 2021). Сывороточные ферменты, такие как ALP, ALT и AST, служат биомаркерами функции печени (Ozer, J. Et al., 2008). ALP в основном вырабатывается в печени, почках и костях, и он повышает уровень неорганического фосфата и активирует коллагеновые волокна в костном матриксе; таким образом, ALP способствует минерализации костей, а также функциям печени и почек (Liu, Z. et al., 2021; Kriseldi, R. et al., 2021). В текущем исследовании активность ALP в сыворотке крови снизилась у бройлеров, получавших высокую дозу Fe–LG, что согласуется с результатами, сообщенными Yamasaki et al. (Yamasaki, K.; Hagiwara, H., 2009), которые сообщили, что высокое воздействие Fe может подавлять активность ALP в остеобластных клетках. АСТ и АЛТ являются цитозольными и митохондриальными ферментами. Утечка этих двух ферментов в кровотоки указывает на повреждение целостности клеточной мембраны или митохондриальной мембраны, а также проницаемости, вызванной попаданием в организм вредных веществ, таких как токсины и металлы, желчный холестаз и гиперплазия желчных протоков (Arak, H. et al., 2020; Barati, M. et al., 2018). АЛТ обычно локализуется в клетках печени и является более специфичным, чем АСТ, биомаркером повреждения печени, поскольку АСТ присутствует в различных органах, таких как почки, сердце, мышцы, мозг и легкие (Ha, K.H. et al., 2016). Активность АЛТ и АСТ была повышена у бройлеров, получавших 800 мг железа/кг, что указывает на то, что воздействие высокого содержания железа может в определенной степени вызвать повреждение печени бройлеров (Gholampour F., Saki N., 2019).

Избыточное потребление Fe приводит к образованию АФК в кровотоке, и затем Fe^{2+} окисляется до нерастворимого Fe^{3+} (Kohgo, Y., 2008). Сывороточный ALB играет важную роль в транспорте, метаболизме и распределении нерастворимых в воде компонентов, таких как жирные кислоты и ионы металлов. ALB может связываться с различными ионами металлов с различной геометрией и координационными свойствами металлов. Связывание Fe^{3+} с ALB сводит к минимуму токсические эффекты перегрузки Fe. Конечный комплекс растворим в воде и выводится с мочой (Kaviani, S. et al., 2020). Сыворотка CREA и UN служат эндогенными индикаторами для оценки скорости клубочковой фильтрации, отражающими состояние почек, и высвобождаются в плазму с относительно постоянной скоростью при нормальных условиях (Hokamp, J.A., Nabity, M.B., 2016). В настоящем исследовании уровни CREA и UN были повышены у бройлеров подкармливают 800 мг Fe/кг. Это может быть объяснено тем фактом, что воздействие высоких доз Fe нарушает функции почек, и CREA и UN в основном выводились через клубочек почек, что согласуется с результатами, сообщенными ранее (Gholampour, F., Saki, N., 2019; Ige, A.O. et al., 2019). Следовательно, высокий уровень железа в рационе может привести к нарушениям функции печени и почек у бройлеров. В текущем исследовании добавки с 40 и 80 мг Fe/кг не влияли на содержание Fe в сыворотке крови и печени, что соответствовало предыдущему исследованию, включавшему рацион с добавлением 50-150 мг Fe/кг ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) у китайских желтых бройлеров-самцов (Lin, X. et al., 2020). Различные результаты для Fe отложения у бройлеров могут быть обусловлены различными путями поглощения различных форм железа. Избыточные уровни Fe индуцируют генерацию АФК и гибель клеток (Chen, X., 2020). T-AOC, SOD, CAT и MDA рассматриваются как показатели антиоксидантной функции. Уровни T-AOC отражают состояние систем антиоксидантной защиты, таких как антиоксидантные ферменты и антиоксидантные вещества (Lu, X.; Wang, C.; Liu, B., 2015). Кроме того, синтез SOD в условиях стресса может

способствовать дисмутации супероксидных радикалов в молекулярный кислород и перекись водорода, и САТ может превращать перекись водорода в воду и кислород в качестве первой линии защиты от вредного воздействия свободных радикалов и АФК (Surai, P.F. et al., 2019). МДА является одним из конечных продуктов перекисного окисления полиненасыщенных жирных кислот в клетках и служит индикатором изменений текучести и хрупкости мембран (Niki, E., 2010). В настоящем исследовании содержание МДА в сыворотке крови увеличилось у бройлеров на 21-й день; однако на содержание МДА в сыворотке и печени на 42-й день это не повлияло диетой с высоким содержанием Fe. Однако уровень Т-АОС и активность SOD в печени 42-дневных цыплят-бройлеров снизились в группе, получавшей 800 мг Fe/кг. Gou, Z.Y. et al. (2018) указали, что добавление в рацион 700 и 1400 мг Fe/кг в форме глюконата железа увеличивало содержание MDA в слизистой оболочке тощей кишки китайских желтых бройлеров на 21-й день, тогда как содержание MDA в плазме крови не зависело от воздействия Fe с пищей. Добавка 97-136 мг/кг ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) оказывал положительное влияние на экспрессию Fe-содержащих ферментов, таких как сукцинатдегидрогеназа, каталаза или цитохром. С оксидазы у цыплят-бройлеров AA (Ma, X. et al., 2016). Следовательно, соответствующая доза Fe^{2+} важна для транспорта кислорода, энергетического метаболизма и выработки железосодержащего белка в митохондриях (Tang, D. Et al., 2020), тогда как накопление железа может, сопровождаться генерированием избыточного количества АФК, вызывая окислительные повреждения (Chen, X. et al., 2020). Следовательно, в этом исследовании воздействие 800 мг Fe/кг в форме Fe-LG индуцировало окислительный стресс. Транспортёр двухвалентного металла 1 (DMT1) распределен в щеточной кайме ворсинок и крипт двенадцатиперстной кишки и транспортирует свободный Fe^{2+} из желудка в энтероциты кишечника (Lu, L. Et al., 2018). Fe накапливается в эпителиальных клетках тонкой кишки или транспортируется в кровотоки через FPN1, который является единственным идентифицированным переносчиком, способствующим оттоку Fe из

энтероцитов в кровотоки (Zhang, L.Y. et al., 2017). Таким образом, DMT1 и FPN1 являются важными транспортерами для поддержания баланса железа в организме. Диета с высоким содержанием железа может снижать экспрессию DMT1 и FPN1 у мышей, свиней и бычков (Dupic, F. Et al., 2002; Hansen, S.L. et al., 2010; Hansen, S.L. et al., 2009). В домашней курице (бройлеры Ross 308 или *Gallus gallus*), экспрессия DMT1 и FPN1 снижается в двенадцатиперстной кишке в условиях высокого содержания Fe в рационе (Wang, Q.Y. et al., 2017; Tako, E.; Rutzke, M.A.; Glahn, R.P., 2010). Аналогичным образом, текущее исследование показало, что DMT1 и FPN1 экспрессия была снижена в рационах бройлеров, получавших добавки в 400 и 800 мг Fe/кг. Это снижение экспрессии мРНК FPN1 может подавлять отток Fe из энтероцитов, попадающих в кровотоки, чтобы избежать травм, опосредованных перегрузкой Fe. Эти результаты также свидетельствуют о том, что экспрессия генов переносчиков, связанных с железом, может быть связана с уровнями железа в рационе или транспортными формами. Однако неясно, происходит ли всасывание органического железа из кровотока в эпителиальные клетки кишечника в форме Fe²⁺ или все хелаты образуются через пептидный транспортер (Bai, S. et al., 2021).

Железо в организме птицы необходимо для транспортировки и хранения кислорода, в ходе белкового обмена, снабжения энергией и разворачивания процессов антиоксидантной защиты (Xie, C. et al., 2019). Железо является кофактором целого ряда ферментов.

F. Bess и др. (2012) показали, что оптимизация уровня железа в рационе родительского поголовья бройлеров на уровне 60 мг/кг корма может повысить продуктивность.

Железо необходимо для оптимального роста домашней птицы, а железодефицитная анемия с уменьшением объема гепатоцитов является наиболее распространенным во всем мире заболеванием, связанным с метаболизмом железа (Lieu, P. T., 2001). У птиц с цветным оперением железо незаменимо во многих каталитических процессах и связано с меланином в

различных пигментах оперения. Дефицит железа у птиц вызывает потерю пигментации перьев. Из-за низкой биодоступности, высокой экскреции и гигроскопичности избыточное добавление железа в рацион птицы является обычной попыткой удовлетворить или превысить эти потребности в питании, чтобы избежать дефицита железа. Например, поскольку присутствие фитиновой кислоты снижает биодоступность железа, рационы на основе кукурузы и сои обычно содержат более 80 мг/кг железа (Bess, F. et al., 2012).

В исследованиях F. Khattak et al. (2018) показано, что TYPLEX Chelate (железный тирозин, Akeso Biomedical, Inc., Waltham, MA) способен ингибировать колонизацию и образование биопленки *Campylobacter jejuni* у цыплят-бройлеров.

У домашней птицы, как и у человека, основным местом всасывания железа является двенадцатиперстная кишка. Было показано, что редуктазы трехвалентного железа, такие как дуоденальный цитохром b (DcytB) на апикальной щеточной каемке кишечного эпителия, способны восстанавливать трехвалентное железо до двухвалентного для лучшего поглощения эпителиальными клетками (Pantopoulos, K. et al., 2012). DMT1, также известный как макрофагальный белок 2, связанный с природной резистентностью, или переносчик двухвалентных катионов, принадлежит к семейству переносчиков растворенных веществ 11 членов 2. DMT1 переносит железо через апикальную мембрану. Когда трехвалентное железо и двухвалентное железо достигают мембраны щеточной каймы двенадцатиперстной кишки, окислительно-восстановительная система, которая представляет собой преимущественно DcytB, начинает работать и восстанавливает трехвалентное железо до двухвалентного железа, которое может транспортироваться в энтероцит с помощью DMT1 (Pantopoulos, K. et al., 2012). Внутри клетки железо либо хранится в виде ферритина, либо экспортируется в кровоток посредством координации FPN и гефестина. Затем трехвалентное железо связывается с трансферрином для распределения по всему телу через систему циркуляции плазмы. Другой способ всасывания

железа гема применяется в двенадцатиперстной кишке, где оно всасывается путем эндоцитоза. Процессу поглощения гема может способствовать везикулярная транспортная система после связывания с белком-носителем 1 гема (Hallberg, L., 1981).

Исследование R. Shi, et al. (2015) показало, что замена FeSO₄ на Fe-Gly при равных уровнях железа в рационах птицы эффективно улучшало биохимические параметры крови и антиоксидантную активность. Это может быть связано с тем, что хелатные источники железа имеют более высокую относительную биодоступность, чем неорганические источники.

D. Taschetto et al. (2017) сообщили, что адекватный уровень железа благотворно влияет на здоровье кур, продуктивность родительских яиц, содержание железа в яичном желтке и гематологические параметры вылупившихся цыплят. Тем не менее, для адекватного добавления железа в коммерческие корма ингредиенты корма должны быть тщательно исследованы до составления корма, чтобы избежать ненужного избытка железа в коммерческом производстве. Количество добавляемого железа зависит от состава ингредиентов корма (Vu H. et al., 2014).

Вообще говоря, в кормах домашней птицы содержится достаточное количество железа, потому что большинство натуральных кормовых ингредиентов содержат достаточное количество железа. Однако очень высокая концентрация железа в рационе птицы может привести к чрезмерному размножению кишечных патогенов и вызвать окислительный стресс у бройлеров (Gou, Z. Y. et al., 2018). Следовательно, при составлении рационов для домашней птицы следует ограничивать включение железа. Также крайне важно повысить биодоступность железа у цыплят и свести к минимуму доступ к железу сальмонеллы. Необходимы дальнейшие исследования на домашней птице, чтобы определить, как патогены используют голодание по железу для ускорения своего роста и победы в битве за железо, а также как это можно использовать для борьбы с инфекцией

сальмонеллы у домашней птицы. Кроме того, необходимо определить влияние *Salmonella* на метаболизм железа хозяина у цыплят.

В следующем исследовании в возрасте 14 дней цыплятам однократно внутримышечно (в мышцу бедра) вводили: I группа – раствор МУДМ железа (2 мг/кг живой массы). Непосредственно перед введением МУДМ смешивали со стерильным 0,9 % раствором NaCl и обрабатывали ультразвуком в течение 30 мин. В эксперименте описано повышение интенсивности опытной птицы. Что касается количества лейкоцитов, то в ходе эксперимента отмечено значительное увеличение их величины. Значения общего белка характеризовались увеличением показателей через сутки после инъекции. Раствор МУДМ железа приводил к достоверному увеличению концентрации железа в тканях (Yausheva, E. V. et al., 2021). Аналогичные результаты были получены в исследованиях A. A. Saki, et al., (2014)

В эксперименте P. Mohan, R., Mala (2019) показано, что ультрадисперсные частицы оксида железа с размерами 23-25 нм подавляют грамположительные *Staphylococcus aureus* и грамотрицательные *Pseudomonas aeruginosa*, выделенные из коммерческих кормов для птицы.

Металлосодержащие ультрадисперсные частицы предложены для замены неорганических солей в составе кормовых добавок. Однако следует тщательно изучить вопросы, связанные с их потенциальной токсичностью и безопасностью для сельскохозяйственных животных, птицы, человека и окружающей среды.

1.4 Физические методы повышения биодоступности компонентов и повышения продуктивного действия кормов

Для повышения доступности питательных веществ кормов и получения экологически безопасной продукции разработаны различные технологии подготовки кормов (Alarcon-Rojo D. et al., 2018). В числе последних микрофилтрация, обработка кормов высоким давлением, электрическими импульсами, ультразвуком и другие.

Ультразвуковая обработка (УЗИ) — это современная технология, имеющая множество применений в пищевой промышленности (Muthupandian A., 2014) использующая в качестве действующего фактора ультразвук - звуковые волны, с частотами выше 20 000 Гц (Al-Hilphy, Asaad Al. H. et al., 2020).

Механизм действия ультразвука на растительные субстраты связан с возникновением волны давления, с образованием полостей и/или пузырей. Рост пузырьков, полученных серии электрических циклов становится неограниченным, что приводит к их разрушению и создает высокую температуру и давление, влияющие на биологические материалы как на макро, так и на микроскопическом уровне (Balachandran S. et al., 2006; Kentish S.E. et al., 2008; Singla R. et al., 2009).

Акустическая кавитация создает экстремальные физические и химические воздействия на субстраты в жидкостях. Механическое перемешивание, микроструи, сдвиг силы, микропотоки, горячие точки и ударные волны — вот некоторые из физических сил, которые эффективно используются при эмульгировании и экстракции (Mason T.J., 1990-2001; Adewuyi Y.G., 2005; Ashokkumar M. et al., 2007; Ashokkumar P.M., 2011).

Экстремальная тепловая среда, создаваемая внутри кавитационных пузырьков, приводит к инициированию разнообразных химических реакций, включая образование высокореактивных радикалов (Okitsu K. et al., 1996; Dhas N.A., Gedanken A., 1997; Ashokkumar M., Yusof N.S.M., 2013). В зависимости от характера применения, будь то физическое или химическое, или и то, и другое эффекты акустической кавитации могут использоваться выборочно. В процессах экстракции и эмульгирования в основном используются физические силы, возникающие при акустической кавитации (Balachandran S. et al., 2006; Kentish S.E. et al., 2008).

Известно, что низкочастотный высокоинтенсивный ультразвук создает сильные сдвиговые и механические усилия. Частота в диапазоне 20-40 кГц и интенсивность приложенной мощности $> 10 \text{ Вт / см}^2$ получило широкое

распространение (Mason T.J., Peters D., 2002). Такие системы могут быть полезными для получения эмульсий типа "масло в воде" в диапазоне размеров 40-200 нм (Leong T.S.H. et al., 2009). Другие области применения включают уменьшение молекулярных массы полимеров, извлечение различных биологически активных и органических соединений и их очистку (Paniwnyk L. et al., 2001, 2009; Cai M., Zhao S., Liang H., 2010; Feng H., Weiss J., Barbosa-Cánovas G., 2011; Briars R., Paniwnyk L., 2013). Эти решения находят свое применение в пищевой промышленности (Топурия Г.М., и др., 2013; Зинина О.В., и др., 2016)

Высокочастотный ультразвук с низкой плотностью мощности широко используется в случаях, когда необходимо большое количество окислительно-восстановительных радикалов (Price G.J., 1992; LuY., Riyanto N., Weavers L., 2002; Singla R., Grieser F., Ashokkumar M., 2009; Okitsu K., 2011; Srivastava P., Chauhan M., 2011).

Получены данные о воздействии ультразвука на различные материалы в виде порошков после смешивания с водой, додеканом или разбавленной уксусной кислотой (5%). После обработки, наблюдалось уменьшение размера частиц, с последующим образованием неожиданных и неизвестных соединений в микроскопическом масштабе. Для железа и его оксидов было обнаружено, что магнитные свойства были изменены незначительно. Изменение температуры перехода Морина для альфа- Fe_2O_3 было связано с образованием примесей. Для неорганических оксидов (Cu_2O , PbO , Pb_3O_4 и Mn_3O_4), обработанных ультразвуком в разбавленной уксусной кислоте, образование ацетатов металлов достигается легко и происходит быстро (10 с для PbO) (Gasgnier M., Beaury L., Derouet J., 2000).

Высокочастотный ультразвук, в диапазоне от 200 кГц до менее 1 МГц, был признан полезным для таких реакций. Это происходит из-за генерации большого количества активных кавитационных пузырьков. Различные исследования были направлены на максимизацию кавитационной активности в такие системы путем изменения экспериментальных параметров, которые

включают частоту, мощность и т.д. (Ashokkumar M. et al., 2008; Sivakumar M., Ashokkumar M., 2014).

При кавитационной обработке кормов происходит ряд процессов, изменяющих их структуру, оказывающих губительное воздействие на гнилостные, патогенные микроорганизмы, микотоксины. При этом длинные молекулы целлюлозы при кавитационной обработке кормовых средств разрываются с образованием крахмала, который затем подвергается гидролизу с образованием простых сахаров, в результате повышается переваримость сухого вещества (Бреховских Л.М., Годин О.А., 1989; Натынчик Т.М., Лемешевский В.О., 2014). Недавнее исследование показало, что добавление продуктов кавитационной обработки подсолнечного шлама в рацион бройлеров в количестве 6% от общей массы корма положительно влияет на степень переваривания в период роста. Более того, введение в рацион продуктов кавитационной обработки шлама подсолнечника цеолитом оказывает положительное влияние на снижение расхода корма на 1 кг прироста живой массы с 2,04 до 1,46 кг (Вуков А. et al., 2019).

Эффективным способом подготовки кормов к скармливанию и улучшению биодоступности питательных компонентов является экструзия, представляющая кратковременный процесс при высокой температуре и давлении (Li R. et al., 2023). Принцип работы заключается в том, что материал постепенно подвергается воздействию большого давления на пресс-форму, которое длится 30-300 секунд, а температура нагрева находится в диапазоне 50-180°C (Menis-Henrique M.E.C. et al., 2020). На этой стадии происходят химические изменения: желатинизация крахмала, связывание белков и формирование вкуса (Gómez M. et al., 2011; Logié, N. et al., 2018). Мгновенная декомпрессия вызывает вспенивание воды и расширение пара, что приводит к формированию пористой структуры. Экструзия имеет определенные преимущества, включая снижение содержания микроорганизмов, инактивация некоторых ферментов и антипитательных факторов и модификация сенсорных характеристик (Roye C. et al., 2020; Zhang S. et al., 2022; Gómez M. et al., 2011).

Предыдущие исследования показали, что экструзия может изменять физико-химические свойства пшеничных отрубей, ускоряют биодоступность и функциональность растворимых пищевых волокон в отрубных материалах (Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K.O., 2019; Roye C. et al., 2020; Khanpit V.V., Tajane S.P., Mandavgane S.A., 2022;)

Микроволновый нагрев является одной из новых технологий, нашедших широкое применение в пищевом и сельскохозяйственном секторах. Основным действующим началом этой технологии является электромагнитная энергия с диапазоном частот от 300 МГц до 300 ГГц. В пищевой промышленности и сельском хозяйстве для сушки, стерилизации, дезинфекции, экстракции ферментами, утилизации отходов наиболее широко используются частоты в диапазоне от 915 до 2450 МГц и многих других (Guo W. et al., 2010; Jiao S. et al., 2011; Taheri S., Brodie G.I., Gupta D., 2022).

Потенциальные возможности использования микроволновой или сверхвысокочастотной (СВЧ) энергии заключается в значительных качественных изменениях в продуктах. В результате бесконтактного нагрева, способности СВЧ-энергии проникать внутрь продукта на значительную глубину можно нагревать продукты до заданной температуры независимо от продолжительности процесса, объема и формы продуктов (Ребезов М.Б., и др., 2016; Yakunin, A. et al., 2022). Высокочастотный нагрев (ТВЧ) – прогрессивный технический прием, позволяющий интенсифицировать ряд термических процессов. Токи высокой частоты угнетающе действуют на некоторые виды микрофлоры, что обусловлено выделением тепла непосредственно в микробной клетке. Таким образом, суммарное воздействие температуры нагретого продукта на микроорганизмы, а также нарушение функций жизнедеятельности их под непосредственным воздействием ТВЧ, создает предпосылки к сокращению времени обработки кормового сырья, а, следовательно, позволяет сохранить пищевую ценность продукта (Лукин А.А., Меренкова С.П., 2014; Лисовой В.В., Викторова Е.П., 2015; Винеvский Е.И., 2018).

Таким образом, с целью повышения продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы, перспективным представляется обработка кормов различными физическими методами с целью повышения энергетической ценности и питательности кормов. Физические методы могут включать термическую обработку, облучение, кавитацию, гранулирование и экструзию.

Между тем, очевидны перспективы использования физических методов обработки для создания нового класса кормовых добавок со способностью оказывать влияние на пищеварение и разворачивание энтерального гомеостаза.

1.5 Создание и применение кормовых добавок на основе растительных субстратов импрегнированных микро- и ультрадисперсными частицами металлов-микроэлементов

Классическая концепция определяет пищеварение как совокупность двух тесно связанных процессов – пристеночного и полостного пищеварения. При этом в ходе полостного пищеварения расщепляется от 20 до 50 % субстратов, в ходе мембранного от 50 до 80 %.

Как известно, пристеночное или мембранное пищеварение у сельскохозяйственных животных осуществляется на границе между внеклеточным и внутриклеточным пищеварением в тонком кишечнике, за счет микроворсинок. При этом в процессе пищеварения принимают участие эндогенные гидролазы. Ферменты иммобилизируются на клеточной мембране, что определяет их эффективность и относительно высокую длительность работы.

В свою очередь полостное пищеварение реализуется через работу как эндогенных, так и экзогенных гидролаз, а так же и микроорганизмов прикрепляющихся в полости кишки к поверхности частиц корма. В результате полостного пищеварения органические полимеры расщепляются до стадии олигомеров. Известно, что в ходе полостного пищеварения происходит

гидролиз до 50% углеводов и около 10 % белков (Каюмов А.Ф. и др., 2019). При этом расщепление в ходе полостного пищеварения - некрахмальных полисахаридов, у моногастричных, представляет особый интерес, ввиду способности последних к связыванию и выведению из организма животных жизненно необходимых химических элементов, аминокислот и витаминов (Гречушкин А.И., 2009).

В связи с этим создание в полости кишечника центров адгезии микроорганизмов и прикрепления энзимов позволит повысить эффективность пищеварения. Это становится возможным через использование полисахаридов в качестве матрицы. Ранее такие решения были реализованы для иммобилизации ферментов и различных биологически активных веществ при отделке текстильных материалов (Фазилова, С.А. и др., 2010).

На практике, в кормлении животных с использованием кормовых средств на основе лигниноцеллюлозной матрицы, импрегнированной ультрадисперсными частицами металлов позволяет изменять физиологическое действие кормов (Котельникова Н.Е., Михаилиди А.М., 2009; Курилкина М.Я. и др., 2010), в том числе изменить сорбционно-кинетические свойства субстрата (Курилкина, М.Я. и др., 2011). При этом можно изменить адгезивные свойства растительных субстратов, стимулируя микробиологические процессы в полости кишечника и тем самым повысить переваримость некрахмальных полисахаридов (Кондакова, К.С. и др., 2012). В частности, в исследованиях Т.Н. Холодилиной, А.С. Васильченко и К.С. Кондаковой (2013), показано, что через гидробаротермическую обработку смеси растительных субстратов и карбоната кальция возможно повысить адгезию микроорганизмов к поверхности кормовых частиц с 23-24% до 98-99 %. В то же время при замене карбоната кальция на сульфат кальция имеет место быть снижение адгезии микроорганизмов до 52-58 %.

Следует отметить, что связывание Ca^{2+} и Mg^{2+} с растительными субстратами путем гидробаротермической обработки позволяет повысить адгезию бактерий к питательной среде, тем самым способствует увеличению

биодоступности корма (Курилкина М.Я., Холодилина Т.Н., 2011) и повышению продуктивного действия кормовых добавок (Кондакова К.С., и др., 2011; Холодилина Т.Н., и др., 2013).

При этом происходящие физико-химические изменения в обрабатываемом продукте приводят к увеличению удельной поверхности, а следовательно и к изменению ионообменных свойств. В связи с этим следует разработать новые подходы к использованию технологии электромагнитного воздействия сверхвысокого диапазона, чтобы получать кормовые средства с включением микрочастиц металлов-микроэлементов (Курилкина М.Я., и др., 2010; Мирошников И. С., и др., 2016).

Между тем несмотря на многообразие проводимых исследований в этой области действие металлоорганических комплексов на базе лигниноцеллюлозной матрицы на живой организм не достаточно полно описано и для более глубокого понимания особенностей влияния изучаемых опытных комплексов необходимо изучение механизмов их воздействия на процессы пищеварения, с детальной оценкой как общих и частных характеристик. В связи с этим при планировании своих исследований нами предложена рабочая гипотеза, включавшая использование методов электромагнитного воздействия СВЧ и/или других, для модификации металлоорганических комплексов на основе отрубей, лузги и др. и микрочастиц металлов-микроэлементов с целью обеспечить таким образом формирование дополнительного электронного потенциала на поверхности кормовых субстратов для формирования центров прикрепления ферментов и адгезии микрофлоры. Это по нашему мнению должно было привести к изменению продуктивного действия кормовых средств. Ниже приведенные результаты подтвердили правильность нашей гипотезы.

2 СОБСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Программа и методы исследований

Исследования были выполнены в период с 2008 по 2025 год в Институте биоэлементологии ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» и отделе кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. профессора С.Г. Леушина ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН» (ФГБНУ «Всероссийский НИИ мясного скотоводства» до 2018г.). Общая схема исследований представлена на рисунке 1.

Экспериментальная часть исследований включала четыре этапа. На первом этапе была произведена серия экспериментов по оценке эффективности обработки комплекса порошков микрочастиц металлов-микроэлементов и растительных субстратов (отруби и др.) методами ТВЧ, УЗ, СВЧ и экструзии, с целью получения кормовой добавки с улучшенными свойствами.

На втором этапе проведены лабораторные исследования по оценке физико-химических и биологических свойств опытных кормовых средств (удельная поверхность, размер и плотность микрочастиц металлов-микроэлементов, биодоступность сухого вещества «in vitro», активность пищеварительных ферментов). Установлены оптимальные параметры и режимы СВЧ и УЗ воздействия с помощью методов планирования эксперимента.

Третий этап включал в себя два эксперимента на модели цыплят-бройлеров с целью оценки действия разработанного кормового средства на продуктивность и обменные процессы в организме птицы.

На четвертом этапе проведена производственная проверка полученных результатов.

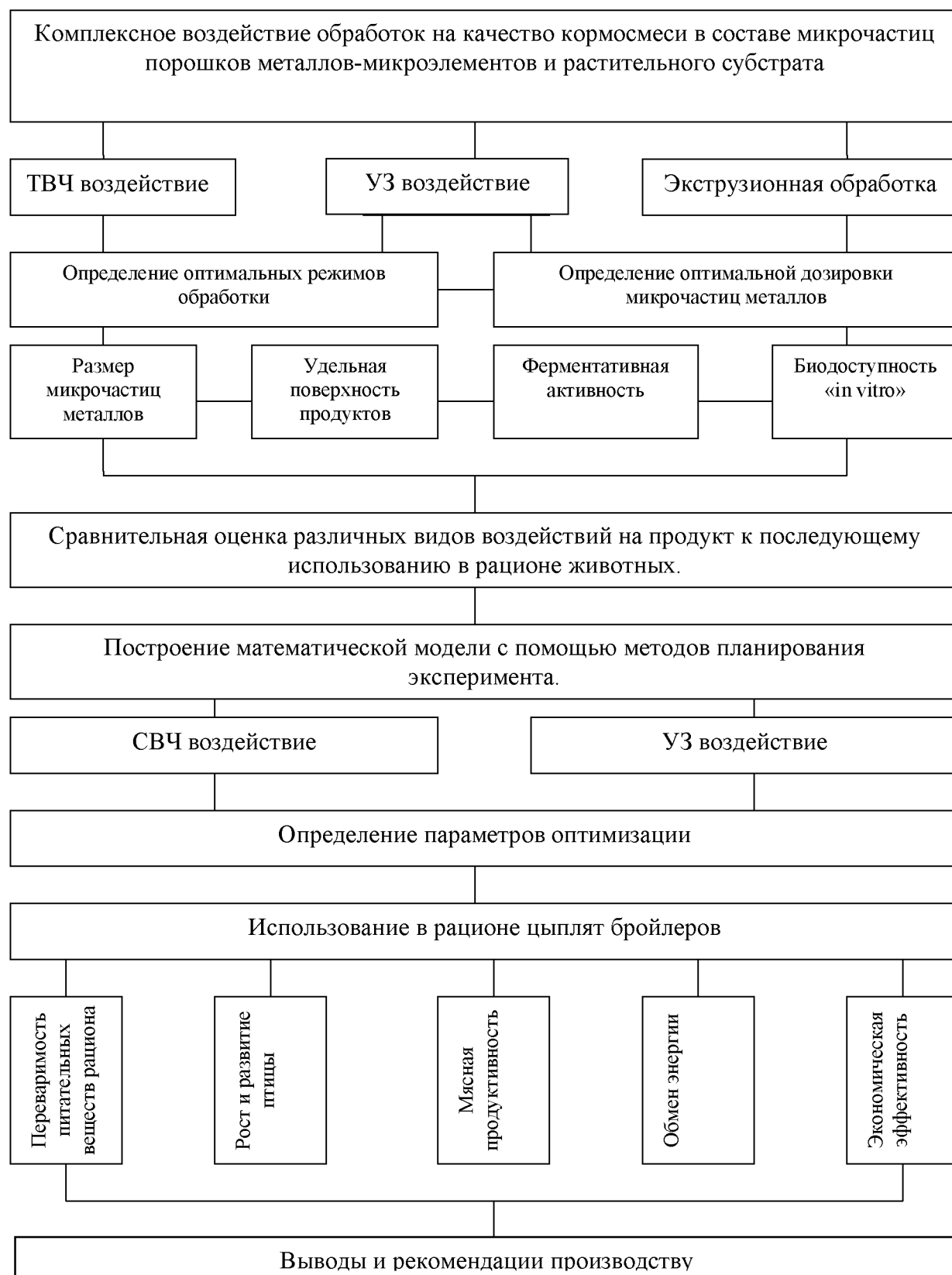


Рисунок 1 – Общая схема исследования

2.1.1 Физико-химическая экспертиза препаратов металлов-микроэлементов

В ходе экспериментальных исследований микрочастицы (МЧ) применялись в качестве источников микроэлементов, железа с размером 12,5 – 50 мкм, меди 5 – 12,5 мкм, алюминия 12,5 – 25 мкм, хрома 6,25 – 12,5 мкм и никеля 25 мкм. Препараты микрочастиц приобретены у компании ЗАО НПП «Высокодисперсные металлические порошки» (чистота – 99,95 %). Исследования были проведены в лабораториях кафедры «Материаловедения и технологии материалов» Оренбургского государственного университета. Микроскопическое исследование микрочастиц металлов производилось на металлографическом исследовательском микроскопе «Альтами МЕТ 3» (Россия) с различным увеличением частиц.

В ходе первой серии исследований были определены свойства используемых микрочастиц. Размер частиц от 1 до 100 мкм определялся микроскопическим методом (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 подсчета стандартная <https://docs.cntd.ru/document/1200010914> . 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 по С.С. Кипарисов и А.А. Либенсон (1980) пробу металлического порошка помещали в тщательно высушенный и взвешенный пикнометр, представляющий собой мерный сосуд с известным объемом (10, 25, 50 мл). Пикнометр заполняется порошком на две трети объема и взвешивается, после чего оставшийся свободный объем 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 Fe, Cu, Al, Cr, Ni, оценивается 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 – объем пикнометра, см³; $Y_{ж}$ – плотность жидкости, г/см³.

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

Для получения биологического комплекса в качестве сырья выбраны отруби пшеничные – побочные продукты переработки зерна, грубый и объемистый корм, состоящий из оболочек зерна различного размера и небольшого количества пшеничных зерен. Отбор проб был осуществлен на базе ряда предприятий г. Оренбурга, специализирующихся на переработке зерна: комбинатах хлебопродуктов №1 и №3 (КХП-1, КХП-3), а также комбикормовом заводе. Питательная ценность отрубей составляет в среднем 15,8% сырого протеина, 4,2 % сырого жира, 9,1% сырой клетчатки. Из-за большого содержания клетчатки отруби плохо усваиваются организмом птицы.

2.1.2 Методики обработки кормовых смесей

В ходе первого этапа исследований образцы подвергались различному виду обработки: ультразвуковая обработка (УЗ); обработка токами высокой частоты (ТВЧ); экструзия и электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ).

В качестве субстрата для обработки использовали смеси пшеничных отрубей и микрочастиц металлов-микроэлементов (Fe, Ni, Al, Cr, Cu).

Для ультразвуковой обработки кормосмеси применяли установку УЗУ-0,25 (рабочая частота 18 кГц и выходная мощность – 0,25 кВт., Россия). Использование ультразвуковой обработки позволяет активизировать процессы ферментации, ускорить процессы биологической трансформации отходов производства.

Установка УЗУ-0,25 предназначена для очистки, промывки небольших деталей и изделий от механического загрязнения. Хорошо очищает сложные, скрытые, внутренние полости и каналы. Может применяться в различных областях прикладных исследований, таких как гидрология, медицина, биология и других отраслях промышленности.

Изделие состоит из двух блоков: генератора и ванны для промывки. Генератор состоит из трех основных узлов: задающего генератора; двухступенчатого предварительного усилителя; усилителя мощности. С выходного трансформатора напряжение подается на пьезоэлектрические преобразователи.

В процессе ультразвуковой обработки происходят волновые колебания образцов, вызывая интенсивные микро- и макропотоки, приводящие к быстрому и качественному перемешиванию компонентов среды.

В ходе экспериментальных исследований контролировались такие величины, как: температура воды 20 °С, рабочая частота 18 кГц. Для проведения исследования готовили смеси отрубей 100 г с металлическими микрочастицами в количестве 0,5 мг (Fe, Al, Ni, Cr, Cu). Время, затраченное на один образец, составляет 1 мин.

Количество воды необходимое для увлажнения образцов определяли по формуле (2):

$$V = m (W_2 - W_1) / (100 - W_2), \quad (2)$$

где: V – количество воды необходимое для увлажнения образцов, мл;

m – масса образца, г;

W_1 и W_2 – начальная и конечная массовая доля влаги, %.

Ультразвуковая обработка увлажненных и исходных образцов проводилась на ультразвуковой установке с рабочей частотой 18 кГц и выходной мощностью – 0,25 кВт. Полученные образцы распределяли по пакетам, а затем помещали в установку УЗ с водой, где прижимали грузом весом 1 кг. Количество воды в УЗ взято согласно паспортным данным. Время, затраченное на один образец, составляет 2 мин.

Полученные после ультразвуковой обработки увлажненные образцы подвергались сушке в термостате ТС – 1/8 СПУ при температуре 60 °С.

Для проведения обработки кормовых смесей токами высокой частоты (ТВЧ) использовали установку ТВЧ установку ВЧИ 63/044-3П-Л01 (мощностью 63 кВт, работающий на частоте 44 кГц, предназначенный для поверхностной закалки или нагрева, габариты 3250x830x2200 мм).

Данный вид обработки был применен для активации микрочастиц металлов-микроэлементов в кормосмеси, в результате нагрева электрическим током высокой частоты. При обработке током высокой частоты (ТВЧ) происходит распределение электричества на поверхности образца.

В ходе экспериментальных исследований контролировались такие величины, как: сетка = 0,5, анод = 4, напряжение катодное. Величина диаметра индуктора $d = 5$ см. Размеры индуктора зависят от условий нагрева, величины и конфигурации нагреваемой поверхности, а также от мощности и частоты источника питания. Для обработки током высокой частоты, готовили смеси отрубей с микрочастицами металлов-микроэлементов. Для наилучшей токопроводящей способности исследуемые образцы увлажняли.

В качестве базового оборудования для проведения экструзионной обработки опытных комплексов использовали пресс-экструдер ПШЗО/1 (номинальная производительность, 200-500кг/час, температура процесса, 110-

135°C, установленная мощность, 55кВт, частота вращения шнека, 350мин, габаритные размеры, 1940x1620x1560, масса, 1220 кг. Россия).

В процессе проведения экструдирования готовили смеси отрубей с включением микрочастиц железа (2%) и смеси микрочастиц железа, никеля, алюминия, хрома и меди. Экструдирование увлажненных образцов проводилось на пресс-экструдере с установленной фильерой $d = 10$ мм и длиной 60 мм частоте вращения шнека $n = 160$ об/мин. Время, затраченное на один образец, составляет 1 мин.

Альтернативу вышеперечисленных способов обработки представляет способ воздействия при помощи сверхвысокочастотного поля (СВЧ), этот вид обработки позволяет повысить питательность и снизить расход кормов на единицу продукции, без больших затрат электроэнергии, что делает процесс производства экономически выгодным.

Цель исследования заключалась в изучении влияния некоторых факторов СВЧ – поля (экспозиции и скорости нагрева) на качественные и количественные показатели кормосмеси отрубей с микрочастицами металлов-микроэлементов. В результате воздействия СВЧ происходит процесс расщепления молекул нативного крахмала, что повышает усвояемость продукта сельскохозяйственными животными.

Для проведения опыта в СВЧ приборе, готовили смеси отрубей с микрочастицами металлов-микроэлементов Fe. Сверхвысокочастотная обработка увлажненных образцов проводилась на СВЧ установке LG MH-6347EB (КНР) с рабочей частотой 2450 МГц и выходной мощностью 800 Вт. В ходе экспериментальных исследований контролировались такие величины, как: время (1,5 мин.) затраченное на обработку каждого образца, мощность (320 кВт) регулируемая во время воздействия. Подготовленные образцы распределяли по пакетам, а затем помещали в установку. Время, затраченное на один образец, составляет 1,5 мин. Полученные после СВЧ обработки увлажненные образцы подвергались сушке в термостате ТС – 1/8 СПУ при температуре 60°C.

2.1.3 Методика исследований опытных комплексов

Для оценки пористости образец опытных комплексов – кормовой смеси порошков микрочастиц металлов-микроэлементов и растительных субстратов (ОК), образец, предварительно высушенный до постоянного веса, помещали во взвешенный мерный цилиндр, емкостью 100 мл (диаметр 25 мм). Наполнение цилиндра до метки 100 мл осуществляли порциями по 15-20мл, с уплотнением образца ОК после переноса 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 объеме, %) 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 – объем образца ОК.

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

Визуальное исследование опытных комплексов проводилось на предмет модификации отрубного продукта и микрочастиц железа. Для микроскопии в режиме отраженного 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.

Массовую долю влаги в продуктах переработки и отходах зерноперерабатывающих предприятий определяли в соответствии с ГОСТ 13586.5-85.

Для оценки удельной поверхности сырья применяли методику измерения пористости по ацетону (ГОСТ 9391—80).

Биодоступность сухого вещества определяли методом «in vitro» при помощи «искусственного рубца KPL 01» по методике В.В. Попова, Е.Т. Рыбиной (1983) в модификации Г.И. Левахина, А.Г. Мещерякова (2003).

Оценка биодоступности микрочастиц металлов-микроэлементов «in vitro» производилась на модели «искусственного рубца KPL 01». Далее определяли содержание исследуемых элементов, согласно ГОСТу 30178-96. Биодоступность элементов вычисляли в процентах по разнице содержания оцениваемых элементов до и после экспозиции в искусственном рубце.

В ходе исследований предполагалось изучить влияние микрочастиц металлов-микроэлементов на амилолитическую активность продукта в дозировках для Fe – 7,0 мг/кг субстрата, для комплекса микрочастиц 0,5 мг/кг субстрата, для Cu – 3,0 мг/кг субстрата и провести сравнительное изучение воздействия микрочастиц металлов-микроэлементов на амилолитическую активность.

Амилолитическую активность определяли фотоколориметрическим методом (ГОСТ 20264.4—89). В качестве субстрата был взят растворимый I крахмал. Ферментный препарат вносился в количестве, рекомендуемом для цыплят бройлеров. Инкубацию проводили в течение 60 минут при температуре 39°C используя в качестве буфера фосфатный буфер с Рн 7.0, после чего производили фильтрование. У полученного фильтрата измеряли оптическую плотность.

Подготовка растворов: 1) 0,1%-ный раствор растворимого крахмала на фосфатном буфере с Рн 7,0; 2) 0,3%-ный раствор металлического йода в 3%-ном растворе йодистого калия. Перед анализом разводится водой в

соотношении 1:3:3 мл раствор соляной кислоты для остановки ферментативной реакции.

Полученный раствор колориметрируют в фотоколориметре при красном светофилтре в кюветах против раствора, содержащего те же реактивы и в том же количестве, которые использовались в опыте, только вместо инкубационного раствора, содержащего крахмал, добавляют 1 мл соответствующего буфера или дистиллированной воды. Периодически составляемые калибровочные кривые обнаруживают хорошую линейную зависимость в избранной зоне между показателями прибора и концентрацией полисахарида. Амилолитическую активность оценивали методом сравнения оптических плотностей контрольного и испытуемых образцов.

2.1.4 Материалы и методы исследований на модели цыплят-бройлеров

В условиях экспериментально-биологической клиники Оренбургского государственного университета, изучалось воздействие на организм цыплят-бройлеров специально разработанных компонентов, основу которых составила смесь отрубей и микрочастиц металлов-микроэлементов.

Для первого эксперимента было отобрано 120 семидневных цыплят-бройлеров финального кросса «Смена-7». Методом аналогов их распределили на четыре группы по 30 голов в каждой. В состав основного рациона был включён опытный комплекс (ОК) – 10% пшеничных отрубей. В подготовительный период цыплята находились в одинаковых условиях кормления и содержания, в учётный период начиная с 14-дневного возраста нативные пшеничные отруби (10 % основного рациона) заменяли опытными кормосмесями (смесь пшеничных отрубей – 99,9 % и микрочастиц железа – 0,007 %), содержание контрольной группы предполагалось на основном рационе (ОР). I опытная группа получала опытный комплекс (ОК₁) – отруби (влажность 45 %) + Fe (7 мг/кг) + ЭМП СВЧ, II опытная опытный комплекс

(ОК₂) – отруби (влажность 45 %) + Fe 7 мг/кг + УЗ, III опытная – опытный комплекс (ОК₃) – отруби (влажность 12,5 %) + Fe 7 мг/кг. Кормление цыплят-бройлеров в ходе исследований производилось полнорационными комбикормами, разработанными на основе рекомендаций.

Таблица 1 – Схема первого исследования на цыплятах-бройлерах

Объект исследований	Группа	Период опыта	
		подготовительный	учетный
		Возраст, сутки	
Цыплята-бройлеры, кросса «Смена – 7» (n= 30)		7-13	13-42
	контрольная	Основной рацион (ОР)	ОР
	I опытная		ОР+ ОК ₁ (Fe 7 мг/кг +СВЧ)
	II опытная		ОР+ ОК ₂ (Fe 7 мг/кг +УЗ)
	III опытная		ОР+ ОК ₃ (Fe 7 мг/кг)

В рамках второго исследования была сформирована группа из 150 голов пятнадцатидневных цыплят-бройлеров финального кросса «Смена-7». Методом аналогов их распределили на пять групп по 30 голов. В состав основного рациона был включён опытный комплекс (ОК) – 10% пшеничных отрубей. В подготовительный период цыплята находились в одинаковых условиях кормления и содержания, в учётный период начиная с 14-дневного возраста нативные пшеничные отруби (10 % основного рациона) заменяли опытными кормосмесями, в I опытной получала опытный комплекс (ОК₁) отруби (влажность 45 %) + Fe (7 мг/кг), обработанный ЭМП СВЧ; II опытная опытный комплекс (ОК₂) отруби (влажность 45 %) + Fe 7 мг/кг, обработанный ультразвуком; III опытная получала опытный комплекс (ОК₃) – отруби (влажность 45 %) + Fe (7 мг/кг), без обработки IV опытная получала опытный комплекс (ОК₄) отруби (влажность 45 %) + Cu (3 мг/кг).

Кормление и содержание птицы производилось в соответствии с рекомендациями ВНИТИП (Егоров И.А. и др., 2019; Фисинин В.И. и др., 2009).

Таблица 2 – Схема второго исследования на цыплятах-бройлерах

Объект исследований	Группа	Период опыта	
		подготовительный	учетный
		Возраст, сутки	
Цыплята-бройлеры, кросса «Смена – 7» (n= 30)		7-13	13-42
	контрольная	Основной рацион (ОР)	ОР
	I опытная		ОР+ ОК ₁ (Fe 7 мг/кг +СВЧ)
	II опытная		ОР+ ОК ₂ (Fe 7 мг/кг +УЗ)
	III опытная		ОР+ ОК ₃ (Fe 7 мг/кг)
	IV опытная		ОР+ОК ₄ (Cu 3 мг/кг)

Регламентом выполнения экспериментальных исследований предполагалось выполнения двукратного в сутки кормления птицы; учет поедаемости кормов ежесуточно; учет параметров климата в помещении в соответствии с методикой; индивидуальное взвешивание цыплят один раз в неделю утром до кормления.

Физиологические исследования, в том числе выполнение балансовых исследований проводили по ВНИТИПу (2004).

Химический состав кормов, остатков кормов, помета изучали по методике зоотехнического анализа. Убой и изучение мясной продуктивности подопытной птицы выполняли по ВНИТИПу (2000).

Исследования химического состава кормов, помета и биосубстратов производились в Испытательном центре ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН» (аккредитация Госстандарта России № РОСС RU 0001.21 ПФ 59).

Оценка влияния опытного комплекса на эффективность межуточного обмена в организме подопытной птицы производилась при сопоставлении данных по поступлению в тело обменной энергии корма с затратами ее на поддержание жизни и с отложением чистой энергии в продукции. Для чего на основании данных по ежесуточному взвешиванию птицы и с учетом

рекомендаций Н.Г. Григорьева и др. (1989), ВНИТИПа (2000), рассчитывали значение чистой (ЧЭ под) и обменной энергии (ОЭ под), необходимой для поддержания жизни в каждый из дней эксперимента:

$$\text{ЧЭ под} = 347 \times M^{0,75}, \quad (4)$$

$$\text{ОЭ под} = 1,22 \times \text{ЧЭ под}$$

где М – средняя живая масса птицы на день определения, кг.

Количество чистой энергии в приросте живой массы цыплят устанавливалось методом сравнительных убоев. Для этого в ходе контрольных убоев производилось разделение тела птицы на отдельные ткани и органы. При этом учитывали: массу тканей и органов при убое, химический состав образцов, содержание в них энергии. Это позволило рассчитать сначала содержание энергии в теле животных, затем количество чистой энергии в приросте как разницу между содержанием энергии в теле подопытной птицы на конец и начало оцениваемого периода.

С целью установления взаимосвязи энергетического и пластического обменов было установлено значение энерго-протеинового отношения по формуле:

$$\text{ЭПО} = 17,84 \times \text{ПП} \setminus \text{ОЭ} \quad (5)$$

где: ПП – количество переваримого протеина, поступившего в организм с кормом, г/гол.;

ОЭ – обменная энергия корма, кДж.

Для характеристики энергетического обмена организма с внешней средой определялись значения валовой и обменной энергии по уравнениям регрессий, предложенным А.П. Калашниковым, Н.И. Клейменовым, В.Н. Бакановым и др. (1986).

Валовая энергия рассчитывалась по формуле:

$$\text{ВЭ} = 23,95 \times \text{СП} + 39,77 \times \text{СЖ} + 20,05 \times \text{СК} + 17,46 \times \text{СБЭВ}, \quad (6)$$

где: ВЭ – валовая энергия рациона, кДж;

СП – сырой протеин, г;

СЖ – сырой жир, г;

СК – сырая клетчатка, г;

СБЭВ – сырые безазотистые экстрактивные вещества, г.

Обменная энергия:

$$ОЭ = 17,84 \times ПП + 39,78 \times ПЖ + 17,71 \times (ПК + ПБЭВ), \quad (7)$$

где: ОЭ – обменная энергия рациона, кДж;

ПП, ПЖ, ПК, ПБЭВ – переваримые протеин, жир, клетчатка, безазотистые экстрактивные вещества, г.

На основании данных по содержанию обменной энергии в поедаемом корме и затрат энергии на поддержание жизни определяли количество обменной энергии сверхподдержания (продукции):

$$ОЭ \text{ прод} = ОЭ - ОЭ \text{ под}, \quad (8)$$

где ОЭ прод – обменная энергия сверхподдержания;

ОЭ – общее количество обменной энергии, поступившей в организм;

ОЭ под – обменная энергия, необходимая на поддержание жизни.

Эффективность трансформации корма в ткани тела подопытной птицы определялась по В.И. Левахину и др. (1999).

Апробация полученных результатов, с расчетом экономической эффективности производства мяса птицы проводили на птицефабрики ЗАО «Оренбургской».

Статистический анализ выполняли с использованием программного пакета Statistica 10.0 («StatSoftInc.», США) и Microsoft Excel и включал расчет среднего значения (M) и стандартной ошибки среднего ($\pm SEM$). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен на $p \leq 0,05$.

2.2 Результаты пилотного исследования опытных комплексов.

2.2.1 Физико-химические свойства и переваримость опытных комплексов.

Рабочей гипотезой наших исследований предполагалось, что электромагнитным воздействием СВЧ и/или другими методами, удастся модифицировать металлоорганические комплексы на основе отрубей, лузги и др. и микрочастиц металлов-микроэлементов (Fe, Cu, Al, Cr, Ni) и обеспечить таким образом формирование магнитных микросфер, дополнительного электронного потенциала на поверхности кормовых субстратов для формирования центров прикрепления энзимов и адгезии микрофлоры. В свою очередь биологическое действие препаратов микрочастиц металлов-микроэлементов определяется их физическо-химическими параметрами, такими как размер и пикнометрическая плотность. Для детального изучения последних нами в ходе первой серии исследований были изучены физико-химические свойства препаратов микрочастиц металла-микроэлемента. В том числе: Fe, Cu, Al, Cr, Ni. Проведена стандартизация микрочастиц: размер Fe составил 12,5 – 50,0 мкм, Cu 5,0 – 12,5 мкм, Al 12,5 – 25 мкм, Cr 6,25 – 12,5 мкм, Ni 25 мкм.

На представленных микрофотографиях почти все микрочастицы металлов имеют неправильную форму: округлую и губчатую.

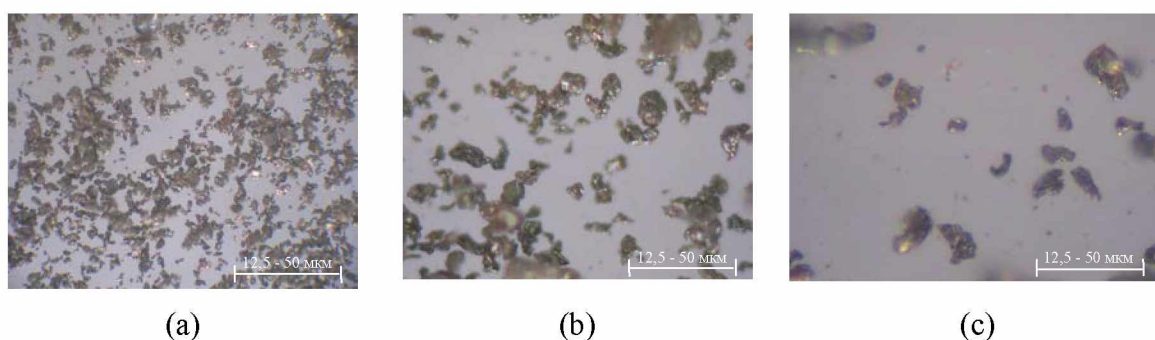


Рисунок 2 – Микрофотографии порошковых частиц Fe.: (a) – при увеличении в 80 раз.; (b) – при увеличении в 160 раз.; (c) – при увеличении в 640 раз.

На рисунке 2 видно, что микрочастицы Fe имеют губчатую форму,

размер от 12,5 до 50 мкм, что подтверждается минимальной пикнометрической плотностью.

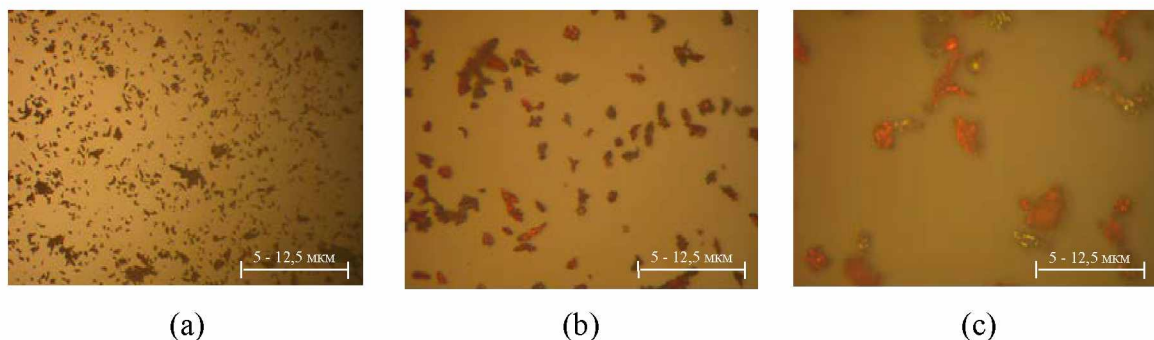


Рисунок 3 – Микрофотографии порошковых частиц Cu.: (a) – при увеличении в 80 раз.; (b) – при увеличении в 320 раз.; (c) – при увеличении в 640 раз.

На рисунке 3 видно, что микрочастицы Cu имеют губчатую форму, размер от 5,0 до 12,5 мкм.

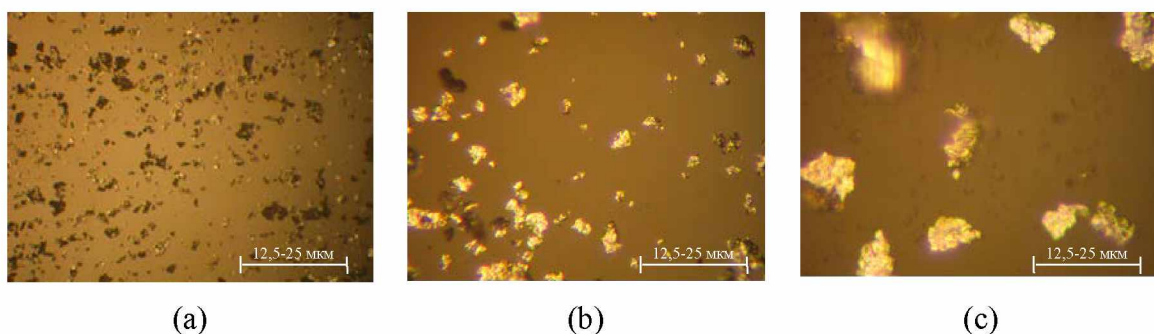


Рисунок 4 – Микрофотографии порошковых частиц Al.: (a) – при увеличении в 80 раз.; (b) – при увеличении в 320 раз.; (c) – при увеличении в 640 раз.

На рисунке 4 видно, что микрочастицы Al имеют округлую форму, размер от 12,5 до 25,0 мкм.

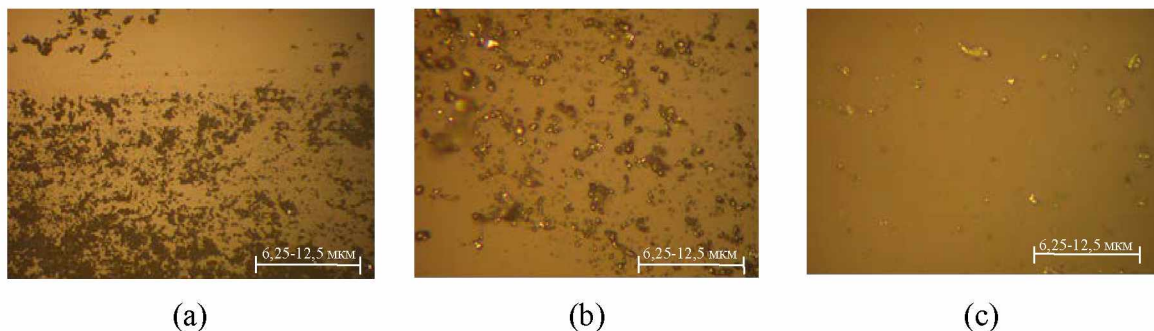


Рисунок 5 – Микрофотографии порошковых частиц Cr.: (a) – при увеличении в 80 раз.; (b) – при увеличении в 320 раз.; (c) – при увеличении в 640 раз.

На рисунке 5 видно, что микрочастицы Cr имеют губчатую форму, размер от 6,25 до 12,5 мкм.

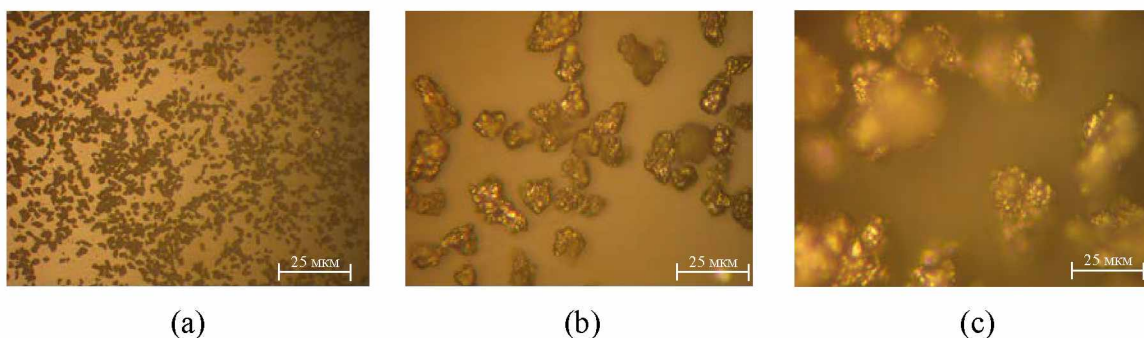


Рисунок 6 – Микрофотографии порошковых частиц Ni.: (a) – при увеличении в 80 раз.; (b) – при увеличении в 320 раз.; (c) – при увеличении в 640 раз.

На рисунке 6 видно, что микрочастицы Ni имеют округлую форму, размер 25 мкм, что подтверждается максимальной пикнометрической плотностью.

В соответствии с данными, приведенными в таблице 3, минимальная пикнометрическая плотность, и, соответственно, максимальная площадь поверхности, наблюдается у препарата микрочастиц железа.

Таблица 3 – Пикнометрическая плотность использованных препаратов микрочастиц металлов, см³

Металлы	Пикнометрическая плотность
Fe	0.63
Cu	2.38
Ni	3.40
Al	3.84
Cr	2.93

Вторая серия исследований включала определение температурных показателей, пористости и визуального исследования ОК, при ЭМ воздействии

СВЧ. В качестве образца были исследованы опытные комплексы (ОК₁) – нативные отруби + ЭМП СВЧ, опытный комплекс (ОК₂) – отруби+ вода 45% + ЭМП СВЧ, опытный комплекс (ОК₃) нативные отруби (влажность 12,5%) + Fe 7 мг/кг, опытный комплекс (ОК₄) – отруби + Fe 7 мг/кг + вода 45% + ЭМП СВЧ.

В ходе исследований динамики влияния температуры и влажности на свойства ОК при ЭМ воздействии СВЧ, было выявлено, что при внесении микрочастиц Fe в (ОК₃) и (ОК₄), температура воздействия увеличивается по отношению к (ОК₁) и (ОК₂) (рисунок 7).

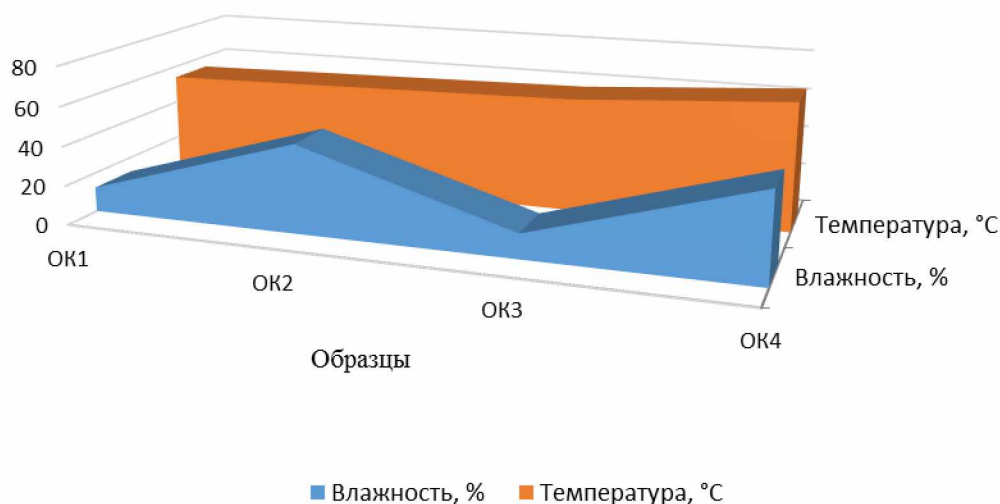


Рисунок 7 – Влияние параметров температуры и влажности на ОК при ЭМ воздействии СВЧ

Была проведена оценка физико-химических свойств ОК, полученных при смешивании отрубей с микрочастиц металлов-микроэлементов Fe, подвергнутого электромагнитному воздействию (СВЧ). В исследованиях установлен факт увеличения пористости ОК₃ на 74,1% при влажности 45%, по отношению к ОК₁.

Биодоступность сухого вещества опытных образцов корма возросла до 84,6 %, что на 5,12 % выше контрольных значений (таблица 4).

Таблица 4 – Физико-химические свойства испытуемых кормовых средств, %

Образец	Биодоступность сухого вещества «in vitro», %	Биодоступность Fe «in vitro», %	Пористость, %
ОК ₁	79,50±1,04	81,2±0,59	50,7±0,3
ОК ₃	82,25±0,53	82,9±1,20	61,7±7,2
ОК ₄	84,62±0,37	85,9±0,65	74,1±6,4

Анализ биодоступности питательных веществ в опытных образцах корма продемонстрировал сходную тенденцию. Наибольшая биодоступность железа была зафиксирована в следующих группах: ОК₁ – 81,2 %; ОК₃ – 82,9 %; ОК₄ – 85,9 %.

Применение электромагнитной обработки СВЧ в сочетании с микрочастицами железа (ОК₄) обеспечило увеличение биодоступности данного микроэлемента на 4,65% по сравнению с контрольными показателями.

Исследование структурных характеристик образцов выявило существенное влияние обработки на пористость, где базовая пористость – 50,7%. После СВЧ-обработки – 61,7%. При дополнительном увлажнении до 45% с микрочастицами железа – 74,1%.

Полученные данные свидетельствуют о синергетическом эффекте комбинированной обработки, что подтверждается как улучшением биодоступности питательных веществ, так и изменением структурных свойств корма.

Визуальное исследование опытных комплексов проводили на предмет модификации растительных субстратов в условиях внешнего электромагнитного воздействия с включением микрочастиц железа. Выявлено, что преобразование отрубей при влажности 45% в процессе электромагнитного воздействия (СВЧ) дает высокопористую структуру отрубей при температуре 56°C. Двойное модифицирование отрубей и микрочастиц железа в электромагнитном воздействии СВЧ при температуре 65°C и выходной мощности 800 Вт приводит к незначительному спеканию и

образованию магнитных агломератов и преобразованию структурных изменений отрубного продукта (рисунок 8).

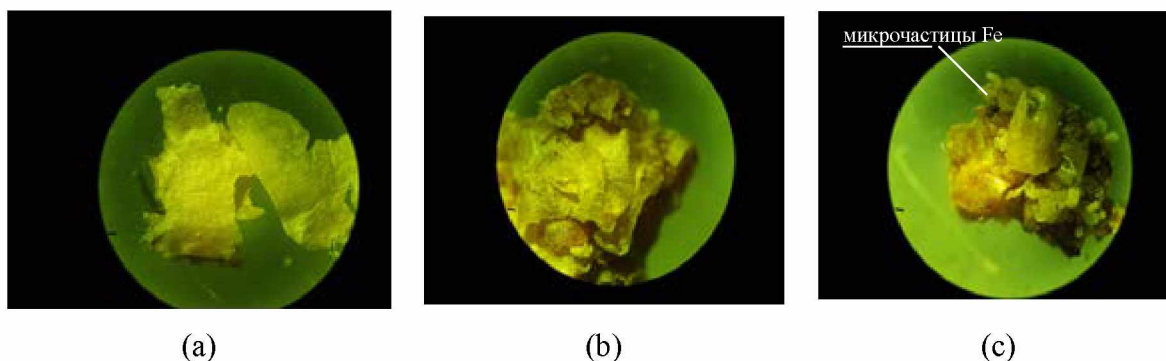


Рисунок 8 – Микрофотографии модификации частиц отрубей при 32 кратном увеличении: (a) – ОК1; (b) – ОК2; (c) – ОК4.

Эффективность микрофракционных кормовых добавок подтверждается исследованиями Н. Meng et al. (2007) и W.S. Cho et al. (2012). Важным преимуществом микрочастиц по сравнению с ультра дисперсиями является их значительно меньшая токсичность. Как показано в работе F.M. Aslam et al. (2014), МУДМ металлов благодаря высокой реакционной способности легко диссоциируют в ионные формы в кислой среде желудка, что приводит к тяжелым токсическим реакциям и перегрузке ионами металлов органов-мишеней.

Площадь поверхности микрочастиц является ключевым фактором их взаимодействия с биологическими системами. Для оценки этого параметра проводилось определение пикнометрической плотности. Установлена обратная зависимость: чем ниже пикнометрическая плотность микрочастиц металлов, тем больше площадь их поверхности, что теоретически должно усиливать биологические процессы в организме. Данная закономерность подтверждается результатами наших балансовых экспериментов, показавших статистически значимое улучшение переваримости органического вещества при использовании порошков с минимальной пикнометрической плотностью (Мирошников С.А. и др., 2018).

В предыдущих исследованиях нами было показано, что баротермическая обработка (повышение температуры и давления) увеличивает пористость кормов (Мирошников И.С. и др., 2016). Аналогичный эффект достигается при электромагнитной СВЧ-обработке, которая также вызывает тепловое воздействие и повышает пористость корма. Это улучшает абсорбцию частиц в процессе энтерального пищеварения (In-Chul L. Et al., 2016), что подтверждается увеличением показателей биодоступности сухого вещества «in vitro» в наших экспериментах.

Электромагнитная обработка СВЧ опытных кормовых комплексов достоверно повышает биодоступность железосодержащих микроэлементов для птицы на 4,65% по сравнению с контрольной группой (ОК₁).

Оптический анализ структуры образцов выявил, что при электромагнитном воздействии в условиях повышенных параметров температуры и влажности происходит спекание металлических частиц железа с образованием органических пленок на их поверхности. Биологические свойства микрочастицы металлов-микроэлементов определяются тремя ключевыми параметрами: размером, формой и пикнометрической плотностью частиц.

Обработка электромагнитным полем СВЧ кормов с микрочастицами металлов-микроэлементов железа вызывает структурные изменения продукта, которые коррелируют с повышением биодоступности питательных веществ и увеличением биодоступности железа «in vitro».

2.2.2 Ферментативная активность и биодоступность сухого вещества исследуемых опытных комплексов.

Одной из основных задач решаемых нами при выполнении диссертационного исследования являлось установление перспективности создания на поверхности кормовых частиц дополнительных центров прикрепления ферментов и мест адгезии микроорганизмов. Эти решения по

нашей рабочей гипотезы были призваны повысить эффективность полостного пищеварения у животных, что в свою очередь могло не только повысить биодоступность корма, но увеличить поедаемость кормов.

Для проверки нашей гипотезы нами были предприняты последовательно исследования по оценке ферментативной активности в среде опытных кормовых образцов, а в последствии дана и сама оценка биодоступности сухого вещества кормов *in vitro*.

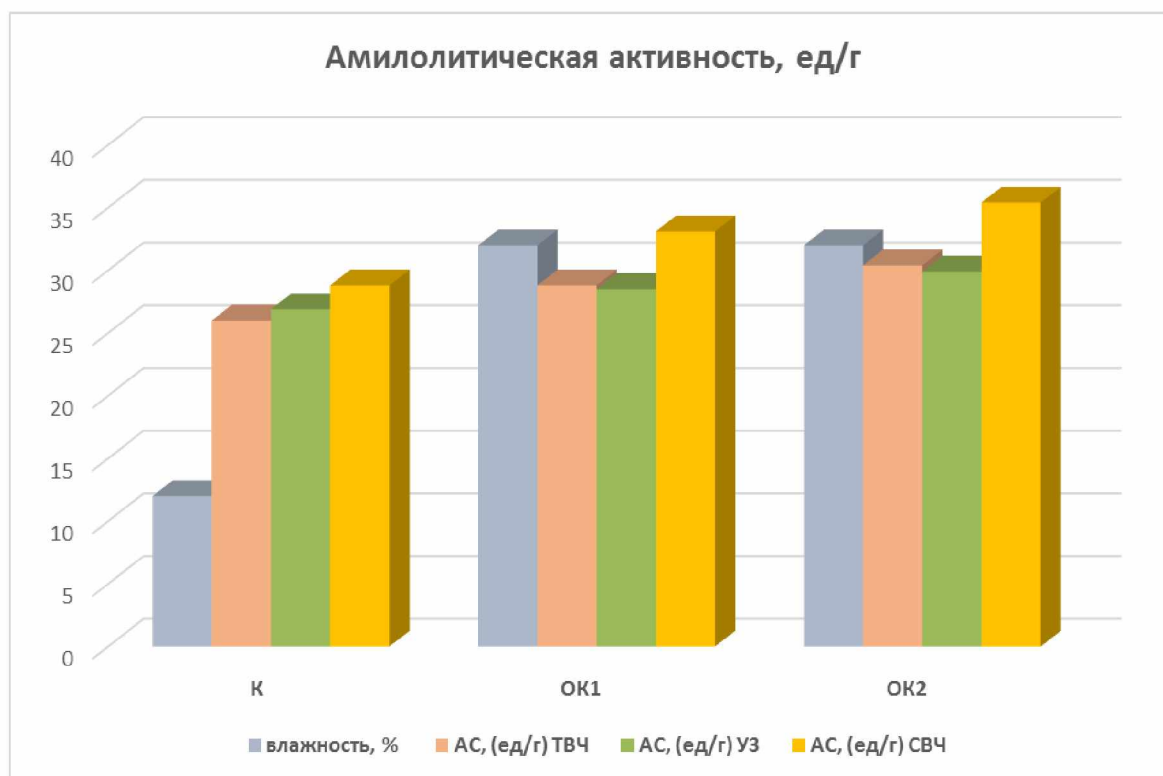
В качестве образца были исследованы опытные комплексы, обработанные ТВЧ, СВЧ и УЗ: К (контроль) – нативные отруби (влажность 12%); опытный комплекс (ОК₁) – отруби+ вода 32% + обработка; опытный комплекс (ОК₂) – отруби + микрочастицы Fe + вода 32% + обработка; опытный комплекс (ОК₃) – отруби + вода 32%+ микрочастицы Fe, Al, Cu, Cr, Ni+ обработка.

В ходе первой серии исследований предполагалось изучить влияние влажности отрубного продукта и микрочастиц металла-микроэлемента Fe на амилолитическую активность продукта в дозировке Fe – 7,0 мг/кг отрубного продукта и провести сравнительное изучение воздействия обработок ТВЧ, СВЧ и УЗ на амилолитическую активность.

Как следует из полученных нами результатов реализация комплекса решений по обработке кормов, в том числе введение металлических микрочастиц, гидротация способствовали повышению ферментативной активности среды, места присутствия опытных образцов и как следствие определили рост биодоступности сухого вещества корма.

Оценка биологических свойств образцов, подвергнутых воздействию ТВЧ, УЗ и СВЧ-обработок выявила повышение ферментативной активности. Так обработки опытных комплексов Fe-модифицированных отрубей при влажности 32% обеспечивает статистически значимое увеличение амилолитической активности (АС) на 17,1% ($p<0,05$), на 11,3%, ($p<0,05$), на 22.8% ($p<0,05$) относительно контроля. Эффект ТВЧ обусловлен синергией

термомеханической активации субстрата и каталитических свойств микроразмерного железа (рисунок 9).



Примечание: К – Отруби исх. (контроль 12%); ОК1 – Отруби + вода 32%; ОК2 – Отруби + вода 32% + Fe 7мг/кг.

Рисунок 9 – Амилолитическая активность образцов, подвергнутых ТВЧ, УЗ и СВЧ воздействию.

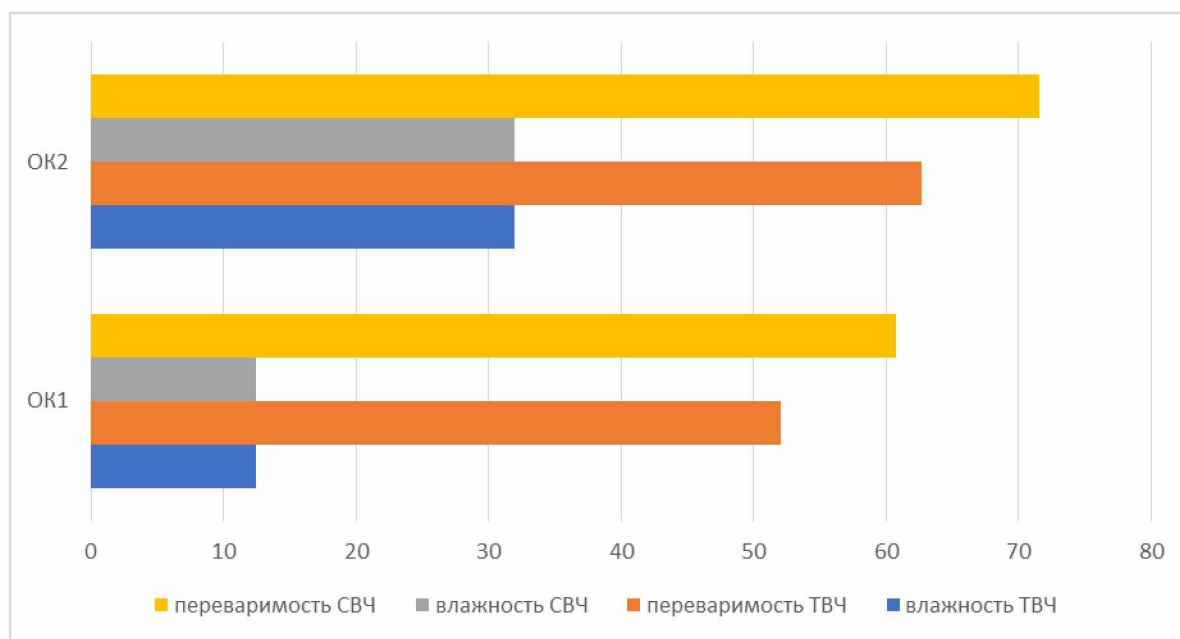
Ультразвуковая гидратация Fe-микрочастиц сопровождается ростом ферментативной активности амилазы, что дает улучшение доступа к крахмалу.

СВЧ-индуцированная поляризация микрочастиц Fe способствует усилению амилолитической активности за счёт увеличения поверхности контакта частиц с субстратом. Локальные микроперегревы при точечном нагреве, повышают активацию амилолитических центров фермента, вследствие чего наблюдается денатурация ингибирующих белков матрицы.

Биодоступность сухого вещества определяли методом «in vitro» при помощи «искусственного рубца KPL 01» (Попов В.В., Рыбина Е.Т., 1983). Выбранные образцы подвергались различным видам обработкам: током высокой частоты (ТВЧ), ультразвуковой (УЗ), экструзионной и

сверхвысокочастотной (СВЧ). Исходными образцами при всех видах обработки считались образцы не прошедшие обработку с влажностью в состоянии поставки.

Увлажненность исходного сырья в результате обработки ТВЧ и ЭМП СВЧ значительно улучшает биодоступность на 14 % (рисунок 10).



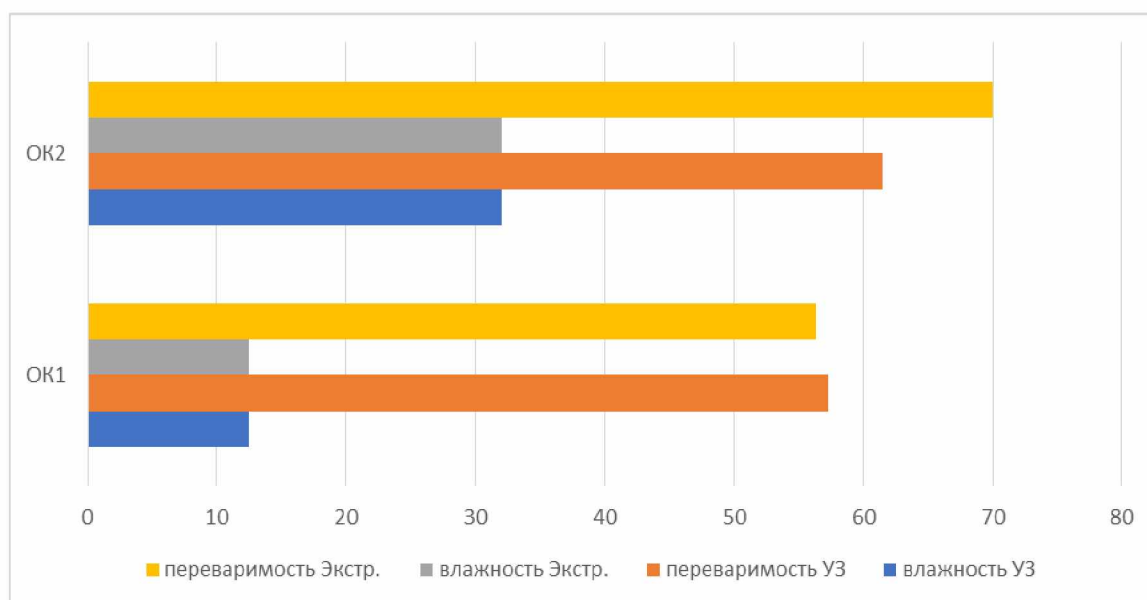
Примечание: ОК1 – Отруби исх. (контроль 12%); ОК2 – Отруби + вода 32% + Fe 7мг/кг.

Рисунок 10 – Биодоступность «in vitro» используемых опытных комплексов, подвергнутых ТВЧ и СВЧ обработкам

Включение микрочастиц железа в опытные комплексы перед СВЧ и ТВЧ обработками дает наилучший эффект при влажности 32%, что соответствует достоверному повышению биодоступности сухого вещества на 10,86% ($p \leq 0,05$) и 20,0 % ($p \leq 0,05$).

В ходе исследований биодоступности сухого вещества опытных образцов, полученных в ходе ультразвукового и экструзионного воздействия установлено, что влажность исходного материала является ключевым фактором, определяющим эффективность применяемых обработок.

Повышение биодоступности сухого вещества при добавлении микрочастиц железа в отруби отмечалось при влажности 32%, относительно контроля на 2,2 % при ультразвуковой обработке и на 24 % ($p \leq 0,05$), при экструзионной (рисунок 11).



Примечание: ОК1 - Отруби исх. (контроль 12%); ОК2 - Отруби + вода 32% + Fe 7мг/кг.

Рисунок 11 – Биодоступность *in vitro* используемых опытных комплексов, подвергнутых УЗ и экструзионной обработкам

Однако, не при всех физических воздействиях на кормовые смеси мы констатировали факт нарастания биодоступности сухого вещества при введении микрочастиц железа. Так при введении препарата микрочастиц железа в кормосмесь перед барогидротермической обработкой кормовой смеси достоверно снижает биодоступность сухого вещества корма *in vitro* с 70,0 до 66,25% или на 3,75% ($p \leq 0,05$).

Дальнейший детальный анализ и сопоставление характеристик опытных кормовых средств, в том числе по амилалитической активности и биодоступности сухого вещества позволило нам выявить зависимость между этими параметрами (таблица 5).

Таблица 5 – Данные полученные в ходе первой серии исследований

Наименование образца	Состав опытного образца	Технология обработки	Ферментативная активность, ед/г	Биодоступность сухого вещества in vitro, %
К (контроль)	Отруби исх.	ТВЧ Р = 63 кВт, Т = 1 мин.	26,00±1,4	52,10±6,3
ОК ₁	Отруби + вода 32%		28,82±1,4	59,50±0,1
ОК ₂	Отруби + вода 32% + Fe 7мг/кг		30,44±2,1*	62,70±0,5*
К (контроль)	Отруби исх.	СВЧ Р = 320 кВт, Т = 1,5 мин.	28,82±1,4	56,90±2,0*
ОК ₁	Отруби + вода 32%		33,10±0,6*	60,77±3,0
ОК ₂	Отруби + вода 32% + Fe 7мг/кг		35,38±0,6**	71,63±2,1*
К (контроль)	Отруби исх.	УЗ f = 18 кГц, Р = 0,25 кВт, Т = 1 мин.	26,92±0,5	57,30±0,9
ОК ₁	Отруби + вода 32%		28,53±1,1	60,90±1,5
ОК ₂	Отруби + вода 32% + Fe 7мг/кг		29,97±1,6*	62,30±2,9

Подтверждением тесной зависимости биодоступность сухого вещества in vitro от ферментативной активности образцов является достоверная корреляционная связь между признаками $r=0,89$.

Как следует из анализа полученных материалов, дополнительная ферментативная активность, возникшая на фоне введения в образцы микрочастиц железа обусловила и рост биодоступности самих образцов оцениваемых кормовых добавок (рисунок 12). В частности, линейная зависимость между этими показателями, в случае аргумента – показателя ферментативной активности можно представить в виде уравнения:

$$Y = 2,0279x \quad (10)$$

где y - биодоступность сухого вещества *in vitro*, %

x - ферментативная активность, ед/г

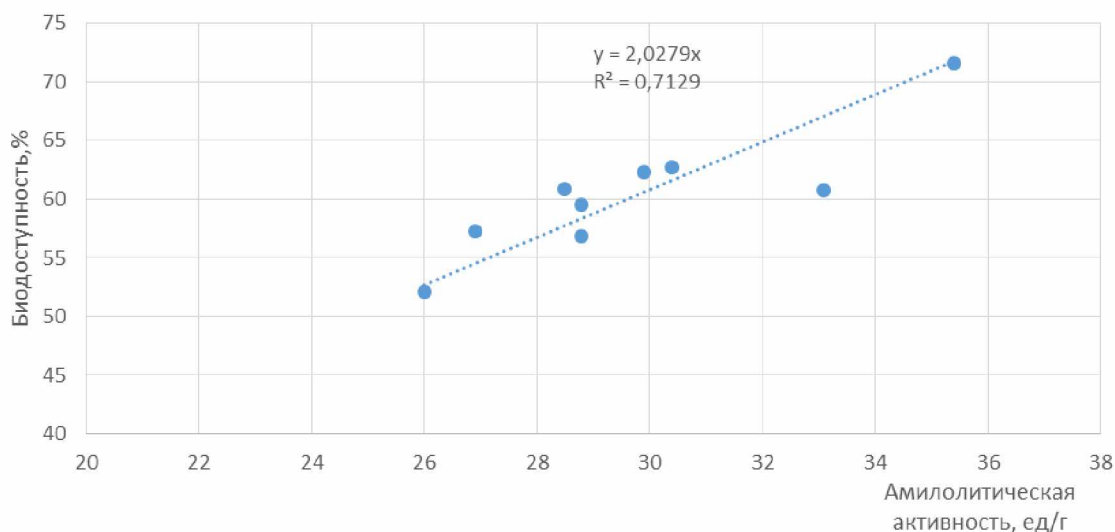


Рисунок 12 – Зависимость биодоступности сухого вещества опытных кормовых добавок от амилолитической активности среды культивирования добавок (линейка – контроль, ОКД1, ОКД2)

При этом высокие значения коэффициента аппроксимации – $R^2 = 0,7129$ указывают на высокую точность теоретической модели.

В ходе второй серии исследований предполагалось изучить влияние влажности отрубного продукта, микрочастиц металла-микроэлемента Fe и микрочастиц (Fe, Al, Cu, Cr, Ni) на амилолитическую активность и биодоступность сухого вещества корма после воздействия ТВЧ, СВЧ и УЗ.

При планировании этих исследований мы исходили из того, что полиметаллические микрочастицы в составе кормовой добавке при физическом воздействии могут оказаться более предпочтительными чем микрочастицы железа. Между тем, как следует из полученных результатов, введение микрочастиц пяти металлов, взамен микрочастицам железа не сопровождалось повышением биодоступности сухого вещества кормов, напротив, после ТВЧ воздействия этот показатель снизился на 3,3%; после СВЧ на 14,7%, после УЗ на 0,1%. Аналогичное снижение амилолитической

активности среды культивирования опытных образцов составила 29,4; 22,9 и 22,5%, соответственно.

В то же время законы, по которым изменялась зависимость биодоступности сухого вещества от амилолитической активности образцов были различны для ОКД2 и ОКД3 (рисунок 13).

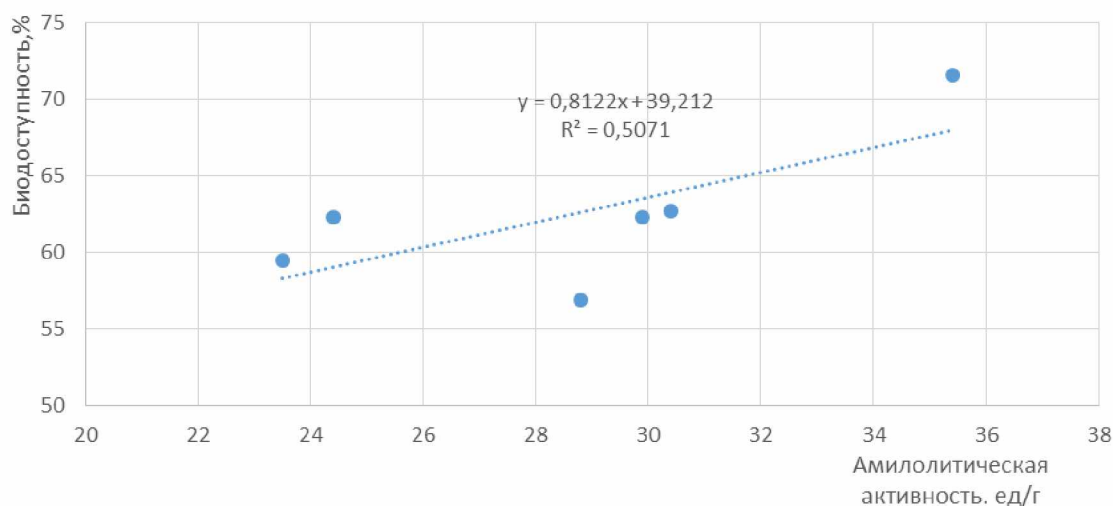


Рисунок 13 – Зависимость биодоступности сухого вещества опытных кормовых добавок от амилолитической активности среды культивирования добавок (линейка – ОКД2, ОКД3)

В частности, коэффициент аппроксимации для уравнения $y = 0,8122x + 39,212$ снизился до 0,5071.

Таким образом, нами показано, что введение микрочастиц железа в кормовую смесь перед ТВЧ, СВЧ и УЗ-обработках сопровождается ростом биодоступности сухого вещества корма и амилолитической активности среды, причем между этими параметрами корма отмечается тесная зависимость. В то время как замена препарата микрочастиц железа на полиметаллический состав (Fe, Al, Cu, Cr, Ni) не позволяет увеличить не биодоступности сухого вещества корма, ни амилолитической активности среды.

Между биодоступности сухого вещества корма *in vitro* и амилолитической активности среды существует высокая связь

2.3 Оптимизация технологического процесса обработки отрубного комплекса СВЧ излучением и ультразвуком с применением полного факторного эксперимента.

При проведении исследований по оценке ферментативной активности в среде опытных кормовых образцов и оценке биодоступности сухого вещества кормов *in vitro*, был дан сравнительный анализ воздействия ТВЧ, СВЧ и УЗ на опытный комплекс с микрочастицами металла/металлов.

Предварительная оценка биологических свойств опытных кормовых образцов, обработанных ТВЧ, УЗ и СВЧ, показала перспективность методов СВЧ и УЗ. Для определения оптимальных режимов их применения в последующем эксперименте на птице было принято решение использовать метод математического планирования эксперимента. Применение метода математического планирования эксперимента дает возможность одновременного изучения большого числа факторов, влияющих на процесс обработки, возможность количественно определить влияние отдельного фактора и эффекты межфакторных взаимодействий.

Для изучения технологического процесса обработки опытных кормовых образцов возможно использование моделирования для сложных систем, т.е. экспериментальное определение физических и математических моделей, обладающих определённым приближением к реальным процессам. При помощи моделирования можно воспроизвести изменения в состоянии системы, их оптимизацию и прогнозирование (Адлер Ю.П., Маркова Е.В., 1986)

Задача построения математической модели технологических процессов обработки опытных кормовых образцов с помощью методов планирования эксперимента требует количественной формулировки цели исследования. Такой количественной характеристикой является параметр оптимизации, который представляет реакцию от воздействия изучаемых факторов на исследуемый процесс.

Параметр оптимизации был выбран с учетом комплекса требований:

- универсальным и всесторонне отражать свойства процесса;
- характеризовать количественную сторону процесса, иметь числовую оценку;
- эффективным как с точки зрения достижения цели, так и в статистическом смысле;
- простым, с ясным физическим смыслом.

Для выявления наиболее рациональных значений факторов, влияющих на эффективность обработки УЗ, было исследовано влияние следующих факторов: влажность отрубей (X_1), продолжительность обработки (X_2), температура опытных кормовых образцов (X_3).

Для СВЧ-излучения было исследовано влияние следующих факторов: влажность отрубей (X_1), продолжительность обработки (X_2), СВЧ мощность (X_3). При анализе требований предъявляемых к параметру оптимизации наиболее оптимальным, удовлетворяющим большинству требований, является время обработки.

Такие факторы как влажность (W , %), продолжительность обработки (T , мин) и температура (τ , °C) опытных образцов при ультразвуковой обработке, главным образом влияют на ферментативную активность и определяют адгезионные свойства комплекса. Так, влажность влияет на вязкость среды и эффективность воздействия, где оптимальная влажность (30-45%) обеспечивает лучшее проникновение ультразвуковых волн и активацию микрочастиц металлов. Контроль влажности предотвращает пересушивание или переувлажнение, которые могут снизить эффективность обработки и стабильность кормовой смеси.

Длительность воздействия УЗ определяет степень диспергирования микрочастиц и модификации структуры отрубей. Избыточное время может привести к деградации питательных веществ. Подбор времени обработки направлен на максимизацию выхода целевых показателей ферментативной

активности и биодоступность микроэлементов при минимальных энергозатратах.

Температура влияет на скорость диффузии микрочастиц в матрице отрубей и интенсивность ультразвуковых процессов. Контроль температуры (30-55°C) предотвращает термическую денатурацию компонентов. Поддержание оптимальной температуры снижает вязкость системы и повышает эффективность передачи ультразвуковой энергии.

Частота ультразвука 19 кГц и мощность подобраны для обеспечения устойчивости ультразвуковых волн в вязких средах.

При СВЧ-обработке учитывались следующие параметры: влажность образцов (W, %), продолжительность воздействия (Т, мин) и мощность излучения (Р, Вт). Влажность определяет диэлектрическую проницаемость материала, влияя на эффективность поглощения СВЧ-энергии. Оптимальная влажность 25-45% обеспечивает равномерный прогрев без локальных перегревов. Контроль влажности предотвращает термическую деградацию компонентов: при избыточной влажности возможен перегрев из-за интенсивного парообразования, при недостаточной - неравномерный прогрев.

Время экспозиции определяет суммарную энергию, передаваемую образцу. Оптимизация времени направлена на достижение целевых температурных параметров без перерасхода энергии. Достаточная продолжительность обеспечивает инактивацию антипитательных веществ, модификацию структуры клетчатки и активацию микрочастиц металлов.

Мощность определяет скорость теплогенерации в материале. Диапазон 300-800 Вт обеспечивает контролируемый температурный режим 40-70°C. Оптимальная мощность позволяет обеспечить равномерность прогрева по всему объему образца, сохранить термолабильные компоненты корма, а так же активировать взаимодействие микрочастиц с матрицей отрубей.

Выбранные факторы в полной мере удовлетворяют основным требованиям, таким как: управляемость, однозначность, совместимость и отсутствие линейной корреляции.

Следующий этап подготовки к проведению эксперимента это выбор модели. Главное требование к модели – это способность предсказывать направление дальнейших опытов. Исходя из этого, выбран полином первой степени. Данная модель содержит информацию о направлении градиента, с другой стороны в нем минимально возможное число коэффициентов при данном числе факторов.

Гипотеза о достаточности для получения адекватного описания процесса линейной модели более вероятна на начальных этапах экспериментального исследования, когда естественно предположить наличие достаточно большого расстояния до поверхности отклика и равномерной пологости поверхности отклика в пределах диапазона изменения факторов оптимизации.

Выбор экспериментальной области факторного пространства связан с тщательным анализом априорной информации. При выборе основного уровня заранее была известна подобласть, в которой процесс протекает достаточно хорошо, поэтому выбираем случайную точку в подобласти. Для принятия решения об интервале варьирования используется информация о точности фиксирования факторов, кривизне поверхности отклика и диапазоне изменения параметра оптимизации. Так как диапазон изменения параметра оптимизации неизвестен и кривизна поверхности отклика неизвестна, при высокой точности фиксирования факторов выбран средний интервал варьирования.

При использовании моделирования для сложных систем при числе факторов равное трем выбран полный факторный эксперимент типа 2^k , в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов и включает восемь опытов. Так как нет полной гарантии, что в выбранном интервале варьирования факторов процесс описывается линейной моделью, то необходимо количественно оценить эффекты взаимодействия. Для этого к матрице планирования добавляем еще четыре столбца. Строили матрицу планирования, значения интервалов и уровней варьирования факторов приведены в таблице 6 по обработке УЗ, СВЧ излучении в таблице 7.

Таблица 6 – Матрица 1 планирования полного факторного эксперимента по определению оптимальных режимов ультразвуковой обработки

Факторы	Среднее арифметическое значение	Влажность	Время	Темпера- тура	Эффекты двойного взаимодействия			Эффект тройного взаимодействия	Амилитическая активность
Обозначение		$W, \%$	$T, \text{ мин}$	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$					
Основной уровень (0)		30	5	40					
Предел варьирования		15	3	15					
Верхний уровень (+)		45	8	55					
Нижний уровень (-)		15	2	25					АС, ед/г
Код Опыт	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	26,9
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	28,5
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	24,6
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	25,3
5	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	25,4
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	29,9
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	25,4
8	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	24,3

Таблица 7 – Матрица 2 планирования полного факторного эксперимента по определению оптимальных режимов обработки СВЧ

Факторы	Среднее арифметическое значение	Влажность	Время	Мощность	Эффекты двойного взаимодействия			Эффект тройного взаимодействия	Амилитическая активность
Обозначение		$W, \%$	$T, \text{мин}$	$P, \text{Ватт}$					
Основной уровень (0)		30	<u>2</u>	480					
Предел варьирования		15	<u>0,5</u>	160					
Верхний уровень (+)		45	<u>2,5</u>	640					
Нижний уровень (-)		15	<u>1,5</u>	320					
Код Опыт	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	АС, ед/г
1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	27,3
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	26,4
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	26,9
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	28,8
5	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	21,9
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	34,6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	28,3
8	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	24,6

На каждый опыт использовалось по три образца. Чтобы исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями, проводили опыты по таблице случайных чисел. Получили последовательность: 4, 3, 8, 5, 7, 2, 1, 6 в соответствии с которой по матрице планирования проводилась обработка образцов.

Свободный член уравнения:

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N X_0 Y_u}{N} \quad (11)$$

Оценка линейных коэффициентов регрессии:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} Y_U}{N} \quad (12)$$

Определяли коэффициенты регрессии парных взаимодействий факторов оптимизации:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} Y_U}{N} \quad (13)$$

Коэффициент регрессии тройного взаимодействия факторов оптимизации:

$$b_{ijz} = \frac{\sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} X_{zU} Y_U}{N} \quad (14)$$

где: X_{iU} – значение i -го фактора в U -ом опыте; X_{jU} – значение j -го фактора в U -ом опыте; X_{zU} – значение z -го фактора в U -ом опыте; N - число опытов.

Тогда уравнение регрессии для каждого вида обработки примет вид:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (15)$$

После расчёта коэффициентов получили уравнение регрессии по ультразвуковой обработке:

$$Y_{уз} = 26,3 + 1,4W - 2,8T + 1,2t - 1,6WT + 0,02Wt - 0,3Tt + 0,08WTt$$

После расчёта коэффициентов получили уравнение регрессии по обработке СВЧ:

$$Y_{свч} = 27,4 + 2,5W - 0,4T + 4,8P - 3,4WT + 1,4WP - 2TP - 0,02WTP$$

Для проверки адекватности этого уравнения, была рассчитана дисперсия адекватности и подтверждена гипотеза об однородности дисперсий (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты определения ферментативной активности после обработок СВЧ-излучением и ультразвуком по матрице планирования

№	W	T	t, P	АС, ед/г	Эффективность АС, %	Образец
Обработка ультразвуком						
1	15	2	55	26,9	109	Отруби+Fe
2	45	2	25	28,5	115	
3	15	8	25	24,6	100	
4	45	8	55	25,3	102	
5	15	2	25	25,4	103	
6	45	2	55	29,9	121	
7	15	8	55	25,4	103	
8	45	8	25	24,3	98	
Обработка СВЧ-излучением						
9	15	1,5	640	27,3	111	Отруби+Fe
10	45	1,5	320	26,4	107	
11	15	2,5	320	26,9	109	
12	45	2,5	640	28,8	117	
13	15	1,5	320	21,9	89	
14	45	1,5	640	34,6	140	
15	15	2,5	640	28,3	115	
16	45	2,5	320	24,6	100	
Контрольные образцы(без обработки)						
17				24,7		Отруби+Fe
18				24,3		Отруби
К				24,1		Отруби

Адекватную модель использовали для быстрого приближения к такому сочетанию факторов, которое обеспечивает биологическую ценность опытных кормовых образцов. Можно утверждать, что модель адекватно описывает эффект воздействия трех факторов на параметр оптимизации, причем наиболее сильное влияние оказывает время обработки и влажность (рисунок 14, 15).

УЗ обработка

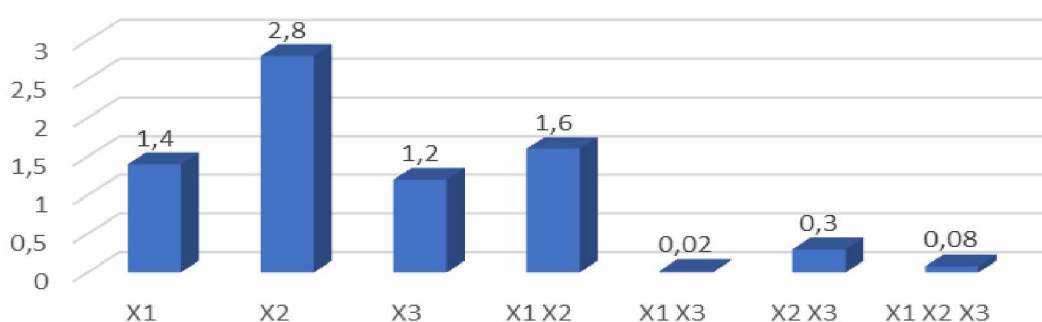


Рисунок 14 – Влияние факторов на параметр оптимизации при УЗ обработке

СВЧ обработка

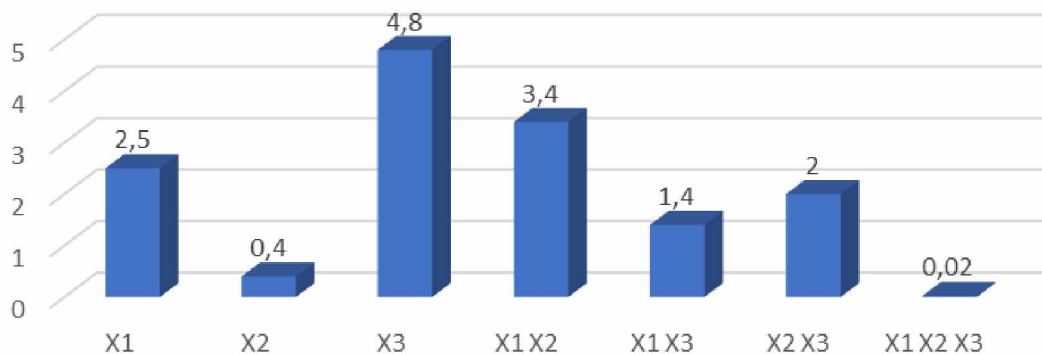


Рисунок 15 – Влияние факторов на параметр оптимизации при СВЧ обработке

В качестве проверки проведенного математического анализа и для наглядности построены графические зависимости (рисунок 16, 17).

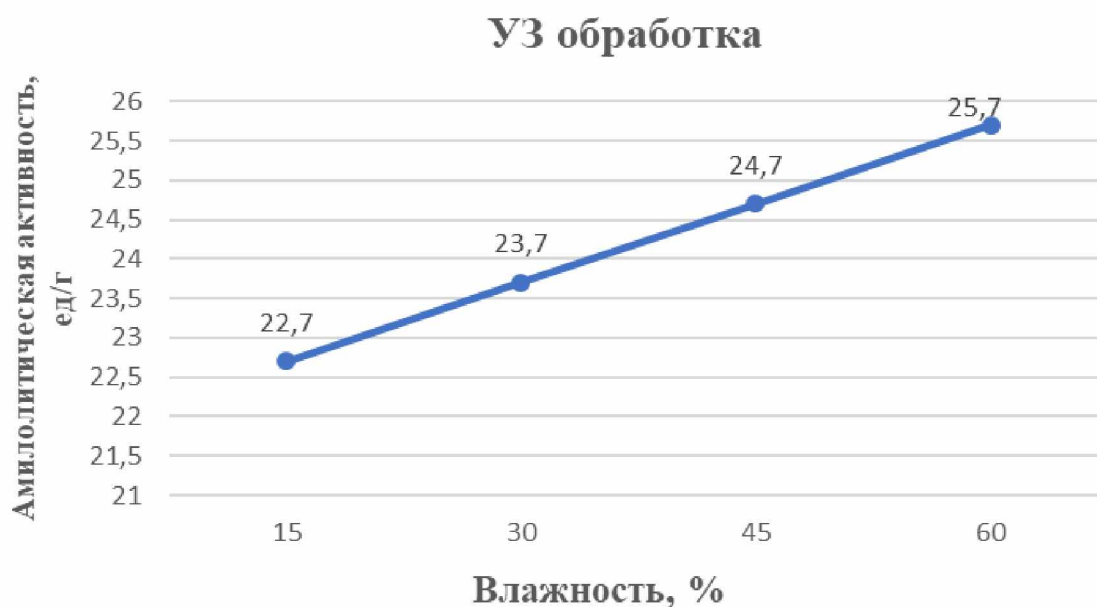


Рисунок 16 – Модель процесса при УЗ обработке

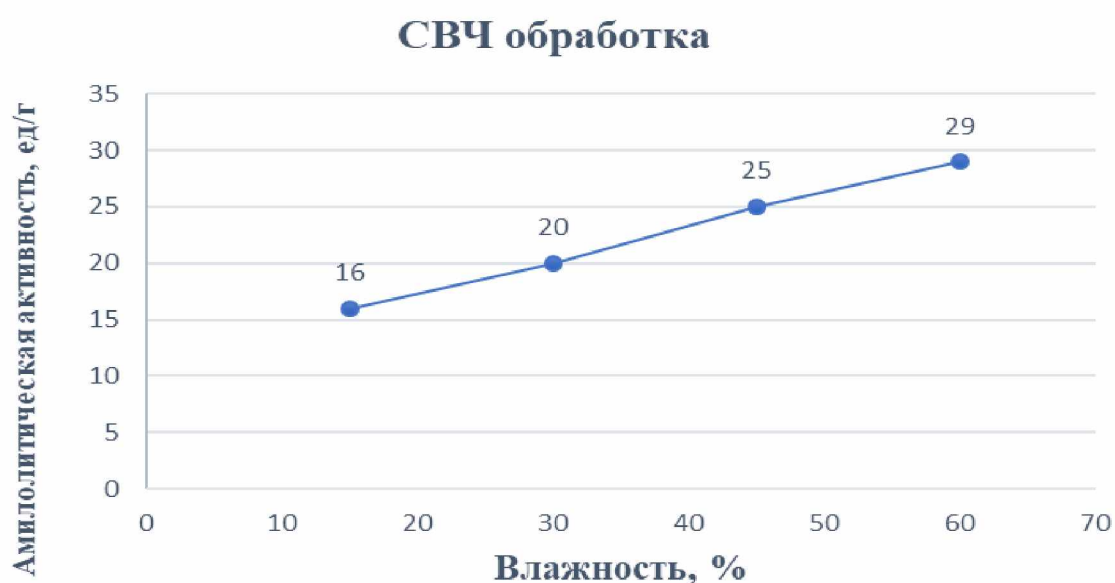


Рисунок 17 – Модель процесса при СВЧ обработке

Математическая обработка полного факторного эксперимента позволила сделать вывод о том, что наибольшее влияние на эффективность ультразвуковой обработки отрубей оказывает увеличение влажности и температуры, время воздействия следует снизить. В сравнение с УЗ

обработкой, СВЧ воздействие оказалось наиболее эффективным, такие факторы как мощность СВЧ энергии и время обработки следует снизить, а влажность 45% по верхнему уровню.

На основе комплексного изучения влияния УЗ обработки и СВЧ воздействия отрубей, с внесением микрочастиц металла Fe, установлена взаимосвязь физико-химических и технологических свойств, с помощью которых обоснованы рациональные режимы, обеспечивающие повышения качества отрубного сырья, используемого для производства комбикормов.

Установлены наиболее рациональные режимы УЗ обработки опытных кормовых образцов, которые приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Оптимальный режим УЗ обработки

Наименование фактора оптимизации	Код	Обозначение	Оптимальная область значений
Влажность сырья	W	%	45
Время обработки	T	мин	2
Температура воды	τ	°C	55

Альтернативные режимы обработки СВЧ-излучением опытных кормовых образцов представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Оптимальный режим обработки СВЧ-излучением

Наименование фактора оптимизации	Код	Обозначение	Оптимальная область значений
Влажность сырья	W	%	45
Время обработки	T	мин	1,5
Мощность СВЧ энергии	P	Вт	320

В результате математической обработки установлено, что модель адекватно описывает эффект воздействия трех факторов на параметр оптимизации УЗ обработки, причем наиболее выраженное влияние оказывает

влажность и температура, что следует повысить по верхнему уровню. Время обработки следует снизить по нижнему уровню.

Математическая модель СВЧ обработки показала эффект воздействия трех факторов на параметр оптимизации таким образом, что время и мощность воздействия нужно снизить по нижнему уровню, а влажность следует повысить по верхнему уровню.

Преимущество выявленных рациональных режимов при обработках УЗ и СВЧ-излучении, позволяет применить в опытах на цыплятах-бройлерах.

2.4 Результаты экспериментальных исследований на цыплятах-бройлерах

2.4.1 Результаты I эксперимента на птице

2.4.1.1 Условия содержания и кормления цыплят-бройлеров

В ходе проведения исследований подбор рецептуры комбикормов осуществлялся по ВНИТИПу (Фисинин В.И. и др., 2009). Пшеница-ячменная основа стала матрицей для производства стартового комбикорма (таблица 11).

Таблица 11 – Состав и питательность комбикорма в первой неделе учетного периода, г/кг

Показатель	Масса вещества	Показатель	Масса вещества
Состав комбикорма:		хром	0,65
пшеница полновесная	320	медь	11,79
ячмень нешелушенный	10	железо	167,0
жмых подсолнечный 35%	184	йод	0,25
шрот соевый 40%	200	литий	0,11
рыбная мука 58%	40	марганец	27,11
масло растительное	60	никель	2,88
кукуруза	163	селен	0,35
отруби пшеничные	10	кремний	154,0
известняк	10	ванадий	0,31
соль	3	цинк	60,52
В комбикорме содержится:		макроэлементы:	
обменная энергия, МДж/кг СВ	14,29	кальций	9,09
сухое вещество	913	калий	10,8

сырой протеин	252	магний	3,53
сырой жир	82,2	натрий	1,24
сырая клетчатка	45,0	фосфор	9,14
аминокислоты:		токсические элементы	
		мг:	
лизин	11,6	алюминий	79,7
метионин	4,10		
цистин	3,72	кадмий	0,12
триптофан	2,13	ртуть	0,013
аргинин	11,75	свинец	0,12
гистидин	4,11	олово	0,001
лейцин	14,98	стронций	18,03
изолейцин	8,18	витамины:	
фенилаланин	7,14	каротин, мг	1,88
тирозин	6,67	А, тыс. МЕ	10,07
треонин	8,83	D3, тыс. МЕ	1,52
валин	8,12	Е, мг	9,65
глицин	8,56	B1, мг	1,97
микроэлементы, мг:		B2, мг	2,88
		B3, мг	10,54
мышьяк	0,39	B4, мг	563
бор	12,16	B5, мг	38,31
кобальт	0,18	B6, мг	2,65
молибден	1,04	B12, мг	0,026

Ростовой рацион был разработан на базе пшенично-ячменной кормосмеси с энергетической ценностью 14,76 МДж/кг (таблица 12).

Таблица 12 – Состав и питательность комбикорма второй и третьей неделе учетного периода, г/кг

Показатель	Масса вещества	Показатель	Масса вещества
Состав комбикорма:		хром	0,77
пшеница полновесная	182	медь	9,51
ячмень нешелушенный	50	железо	100,00
жмых подсолнечный 35%	180	йод	0,25
шрот соевый 40%	75	литий	0,16
рыбная мука 58%	45	марганец	19,26
масло растительное	45	никель	2,64
кукуруза	400	селен	0,39
отруби пшеничные	10	кремний	84,00
известняк	10	ванадий	0,29
соль	3	цинк	44,90

В комбикорме содержится:		макроэлементы:	
обменная энергия, МДж/кг СВ	14,76	кальций	8,89
сухое вещество	907	калий	7,84
сырой протеин	212,1	магний	2,40
сырой жир	77,97	натрий	1,84
сырая клетчатка	55,68	фосфор	7,65
аминокислоты:		токсические элементы мг:	
лизин	8,75		
метионин	3,59	алюминий	37,83
цистин	3,03	кадмий	0,14
триптофан	2,44	ртуть	0,009
аргинин	12,31	свинец	0,17
гистидин	5,14	олово	0,001
лейцин	15,07	стронций	19,52
изолейцин	8,09	витамины:	
фенилаланин	9,07	каротин, мг	3,34
тирозин	6,38	А, тыс. МЕ	7,21
треонин	7,25	D3, тыс. МЕ	1,03
валин	10,11	Е, мг	5,16
глицин	10,48	B1, мг	1,53
		B2, мг	2,98
микроэлементы, мг:		B3, мг	10,03
мышьяк	0,77	B4, мг	579,61
бор	8,24	B5, мг	29,78
кобальт	0,13	B6, мг	2,55
молибден	1,05	B12, мг	0,024

Балансировка питательности рационов по витаминному и минеральному составу проводилась путём введения комплексного витаминно-минерального премикса. Оптимальность условий содержания и кормления подтверждается 100% сохранностью поголовья цыплят.

Исследования показали, что модификация рациона с включением отрубного комплекса и микродисперсных частиц железа с последующей СВЧ-обработкой достоверно влияет на показатели поедаемости корма (таблица 13).

Таблица 13 – Динамика потребления комбикорма цыплятами-бройлерами в различные периоды выращивания, г/гол

Показатель	Группа			
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная
Стартовый комбикорм	887	930	925	893
Ростовой комбикорм	1664	1687	1671	1676
За весь период	2551	2616	2596	2569

2.4.1.2 Переваримость корма подопытной птицей

Проведенная оценка переваримости корма «in vitro» показала значительное улучшение показателей при комбинированном применении СВЧ-воздействия и микрочастиц железа. В данном случае переваримость сухого вещества достигла 84,62%, что на 6,44% превышает контрольные значения. При этом ультразвуковая обработка образцов с микрочастицами железа не оказала существенного влияния на переваримость «in vitro» (рисунок 18).

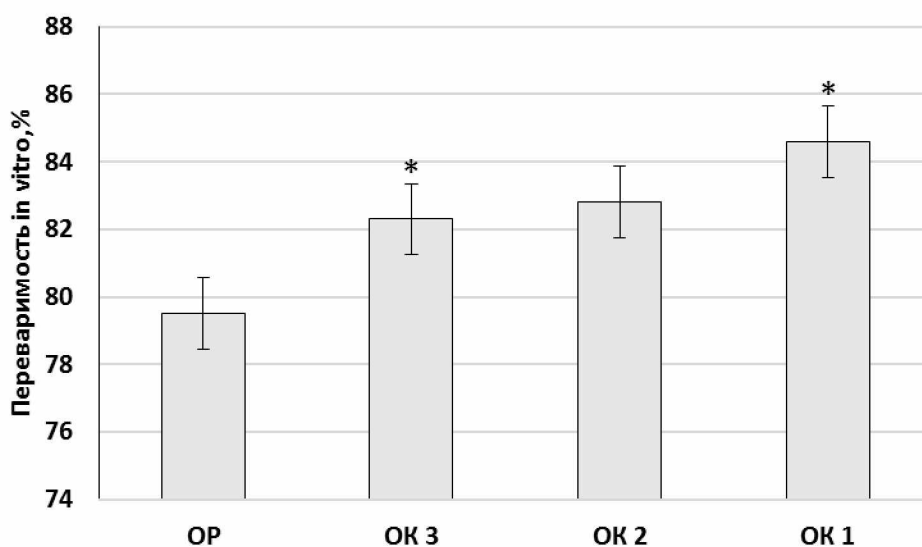


Рисунок 18 – Переваримость «in vitro» сухого вещества испытываемых кормовых средств, %

Примечание: * – при $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп

Включение в рацион первой опытной группы комплекса ОК₁ повысило потребление корма на 2,57% по сравнению с контрольной группой. На протяжении всего экспериментального периода наблюдалась устойчивая

тенденция к увеличению показателей поедаемости в группе ОК₁ относительно других опытных групп.

Во второй и третьей опытных группах также зафиксировано увеличение потребления корма на 1,77% и 0,73% соответственно по сравнению с контрольной группой. Наибольшая положительная динамика потребления корма отмечалась при использовании рационов с комплексами ОК₁ и ОК₂.

Оценка параметров переваримости рациона подопытной птицей позволила получить следующие данные (таблица 14).

Таблица 14 – Коэффициенты переваримости питательных веществ корма, %

Группа	Органическое вещество	Сырой жир	Сырой протеин	Углеводы
контрольная	87,39±0,40	92,94±0,22	85,90±0,45	86,92±0,41
I опытная	90,39±0,44 ^a	94,93±0,23 ^a	88,27±0,54	90,16±0,45 ^a
II опытная	88,89±0,87	93,26±0,52	85,98±1,09	88,92±0,86
III опытная	88,88±0,79	92,61±0,52 ^b	86,80±0,93	88,96±0,78

Примечание: а – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп; b – $p \leq 0,05$ при сравнении I и III опытных групп;

Результаты исследования демонстрируют значительное улучшение переваримости органического вещества в I опытной группе, где показатель достиг максимальных значений, превысив контроль на 3,4% ($p \leq 0,05$) и показатели III группы на 1,7%.

Результаты исследования показали изменения в переваримости питательных веществ и биодоступности железа. Так, в первой опытной группе переваримость сырого жира достигла 94,93%, что на 2,1% превысило показатели контрольной группы ($p \leq 0,05$). В третьей опытной группе данный показатель был на 2,4% ниже, чем в первой группе ($p \leq 0,05$).

Анализ переваримости углеводов выявил увеличение показателя в первой опытной группе на 3,7%. Во второй и третьей опытных группах наблюдалась аналогичная тенденция к росту с увеличением на 2,3%.

Исследование биодоступности железа из микродисперсных частиц железа показало при СВЧ-обработке: увеличение на 5,8% ($p \leq 0,05$). При ультразвуковой обработке: увеличение на 7,0% ($p \leq 0,05$).

Все изменения показателей являются статистически значимыми ($p \leq 0,05$), что подтверждает эффективность применяемых методов обработки (рисунок 19).

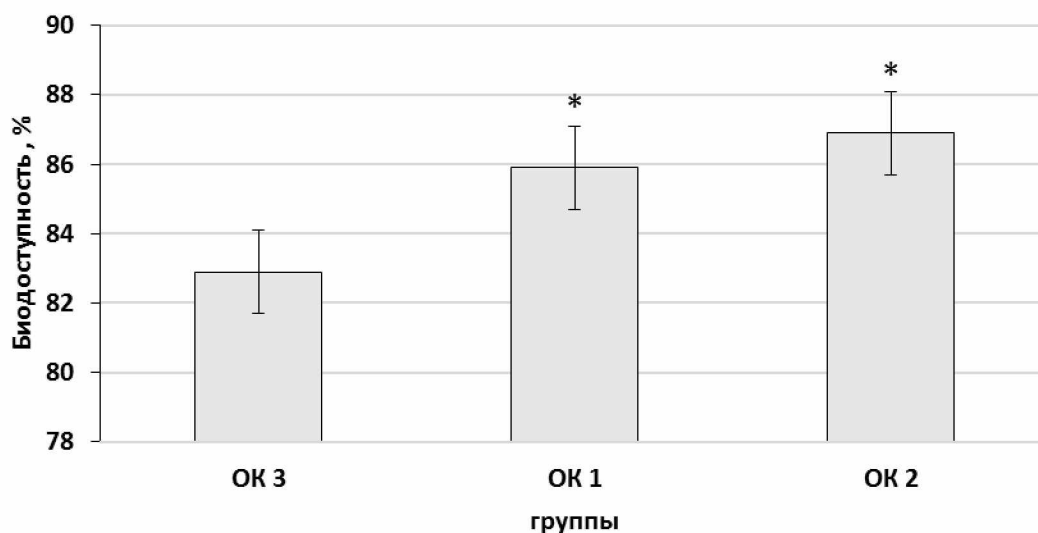


Рисунок 19 – Биодоступность железа корма в организме подопытной птицы при скормливания опытных комплексов, %

Примечание: * – при $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп

2.4.1.3 Рост и развитие подопытной птицы

Результаты исследования подтвердили, что прирост живой массы служит ключевым зоотехническим показателем сбалансированности рациона птицы.

В ходе эксперимента было установлено, что интенсивность роста живой массы варьировало между группами в начале и конце опыта в зависимости от питательной ценности рациона. Введение в корм микродисперсных частиц железа с последующей обработкой различными методами (СВЧ, УЗ) оказало положительное влияние на динамику живой массы, обеспечив статистически значимое улучшение показателей во всех опытных группах (таблица 15).

Таблица 15 – Динамика живой массы подопытной птицы, г/гол.

Неделя учетного периода	Группа			
	контрольная	I опытная	II опытная	III опытная
0	221,0±7,9	220,7±4,4	219,3±3,2	222,3±6,0
1	369,7±8,4	377,5±14,8	370,3±11,9	375,7±9,0
2	625,7±4,7	648,7±30,8	623,8±19,2	631,3±6,6
3	947,5±25,5	1 003±6,0	950,5±29,9	965±17,3
4	1 377±25,2	1 459±19,5*	1 385±26,5	1 401±45,2

Примечание: * – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп;

Согласно полученным результатам, в течение всего экспериментального периода наблюдалась устойчивая тенденция к увеличению живой массы в I опытной группе.

На второй неделе исследования I группа сохраняла преимущество, превышая показатели контрольной группы на 3,6%, показатели III опытной группы на 7,8% . К окончанию учетного периода прирост живой массы в I опытной группе достиг 13,97% относительно контроля ($p \leq 0,05$). В III опытной группе введение микрочастиц железа также оказало положительное влияние на динамику роста, показав преимущество как относительно контрольной группы, так и группы с ультразвуковой обработкой.

Применение опытных кормовых комплексов в I и II группах сопровождалось достоверным увеличением живой массы цыплят, что подтверждает эффективность разработанных рационов (таблица 16).

Таблица 16 – Динамика приростов живой массы подопытной птицы, г/гол.

Неделя эксперимента	Группа			
	контрольная	I опытная	II опытная	III опытная
1	148,7±8,4	156,8±14,8	151,0±11,9	153,3±9,0
2	256,0±4,7	271,2±30,8	253,5±19,2	255,7±6,6
3	321,8±25,5	354,1±6,0	326,7±29,9	334,4±17,3
4	429,8±25,2	457,0±19,5	434,3±26,5	435,5±45,2
За весь эксперимент	1156	1239	1165	1179

Для комплексной оценки роста бройлеров, получавших комбикорма с различными опытными комплексами, нами был проведен расчет еженедельных приростов живой массы.

Наибольшая эффективность была выявлена при использовании комбинации микрочастиц железа с СВЧ-обработкой I опытная группа. Данная группа демонстрировала статистически значимое превосходство по приростам живой массы на всех этапах исследования. В двухнедельном возрасте было отмечено превышение над контрольной группой на 5,9%, над III опытной группой - на 6,9%.

В течение всего экспериментального периода преимущество над контролем составило 7,1%, над II группой - 6,3%, над III группой - 5,1%.

К окончанию опыта превосходство над контрольной группой достигло 6,0% ($p \leq 0,05$).

Полученные результаты свидетельствуют, что СВЧ-обработка комбинированной смеси отрубей с микрочастицами металлов-микроэлементов является эффективным способом повышения продуктивности бройлеров, обеспечивающим достоверное увеличение приростов живой массы.

Динамика различий в показателях прироста живой массы между исследуемыми группами показана на рисунке 20.

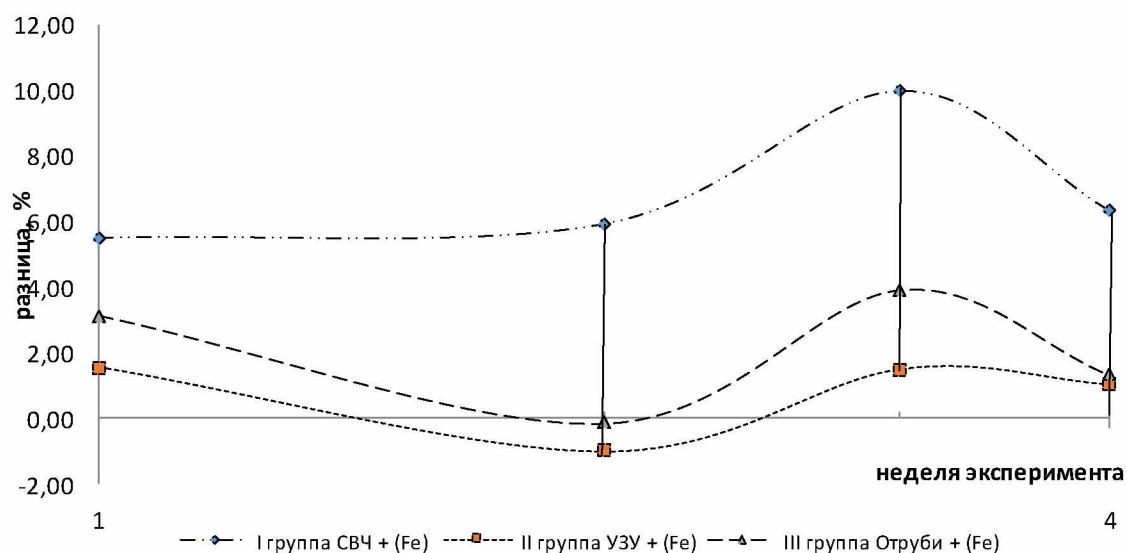


Рисунок 20 – Разница по приросту живой массы между контрольной и опытными группами, %

В ходе исследований было констатировано достоверное увеличение продуктивности подопытной птицы в I опытной группе. Полученные данные свидетельствуют, что улучшение переваримости питательных веществ обусловлено как физико-структурными изменениями под воздействием электромагнитного поля СВЧ, так и биологической активностью микрочастиц железа, участвующих в энтеральных метаболических процессах.

Проведенный эксперимент подтвердил первоначальную гипотезу о необходимости комбинированного использования микрочастиц железа с СВЧ-воздействием для достижения максимального эффекта.

2.4.1.4 Мясная продуктивность подопытной птицы

Очевидно, что основной задачей комплекса мероприятий по выращиванию цыплят-бройлеров от получения финальных кроссов до начала выращивания и собственно убоя птицы является получение максимального количества мяса. И именно производство мяса желательного качества в абсолютных величинах является мерилем эффективности той или иной

технологии. В этой связи мы при экспертизе сравниваемых кормовых средств использовали параметры мясной продуктивности подопытной птицы в качестве одного из ключевых параметров.

Как следует из полученных результатов использование различных кормовых средств сопровождалось различными параметрами в мясной продуктивности птицы.

Показатели предубойной массы демонстрируют значимое лидерство I опытной группы (1408 г/гол) с превышением над контролем - 4,8% ($p \leq 0,05$), II группой - 4,2%, III группой - 2,4% (таблица 17).

Таблица 17 – Результаты убоя подопытной птицы в конце эксперимента

Показатель	Группа			
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная
Предубойная живая масса	1 344 $\pm 21,8$	1 408 $\pm 23,1^*$	1 351 $\pm 20,1$	1 375 $\pm 28,8$
Потрошенная тушка	905,9 $\pm 17,8$	961,7 $\pm 20,2^*$	914,6 $\pm 19,3$	933,6 $\pm 22,3$
Убойный выход, %	67,4	68,3	67,7	67,9

Примечание: * - $p \leq 0,05$ ** - $P \leq 0,01$ *** - ($P \leq 0,001$) при сравнении контрольной и опытных групп

При этом величина массы потрошённой тушки так же оказалась наибольшей в I опытной группе 961,7 г/гол, что на 6,2% ($p \leq 0,05$) превышала уровень контроля. Убойный выход в I опытной группе оказался наибольшим – 68,3%. Эта величина на 0,4-0,9% превосходила показатели в других сравниваемых группах.

Таким образом, анализ материалов полученных при проведении контрольного убоя подопытной птицы подтвердил правильность решения о целесообразности сочетания использования в кормлении цыплят-бройлеров кормовых средств включающих микрочастицы железа после воздействия СВЧ.

2.4.1.5 Конверсия энергии и протеина корма в продукцию подопытной птицы

Известно, что любой вид продукции сельскохозяйственных животных, будь то мясо, шерсть или рабочая сила, все это не что иное как видоизмененный корм. Это умозаключение принципиально меняет понимание сути вещей при оценке того или иного кормового средства или рациона. В нашем случае исследования по оценке продуктивного действия оцениваемых кормовых средств не возможны без изучения специфических особенностей конверсии последнего в продукцию – мясо птицы.

В ходе наших исследований последовательно, методом контрольных убоев, была изучена конверсия протеина и энергии в организме подопытной птицы. Для чего в начале и в конце эксперимента проведены контрольные убои цыплят, с последующей детальной анатомической разделкой тушек и оценкой химического состава тканей и органов. Как следует из полученных результатов в начале эксперимента в организме цыплят содержалось в среднем около $44,0 \pm 1,07$ г/голову сырого протеина и $18,3 \pm 1,09$ г/голову жира, что в совокупности содержало около $1,78 \pm 0,11$ МДж/голову энергии.

При завершении исследований в организме птицы содержание протеина выросло, в контрольной группе на 202,7 г/голову. Этот показатель оказался ниже, чем в I опытной группе на 15,2% и во II на 4.9%. Анализируемый показатель в контрольной и III опытной группе оказался примерно одинаковым 202,7 - 202,7 г/гол (таблица 18).

С учетом различной переваримости протеина фактическое поступление в межуточный обмен протеина в контрольной группе составило 495 г/гол, что на 5,5 % оказалось ниже чем в I опытной группе, 2,2% во II и на 1,8 % меньше чем в III группе. Различия по поступлению в организм цыплят обменной энергии оказались схожими.

Таблица 18 - Трансформация энергии и протеина корма в продукцию подопытных бройлеров за учетный период

Показатель	Группа			
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная
поступило с кормом				
Сырого протеина, г	576,3	592,0	588,6	580,3
Переваримого протеина, г	495,0	522,5	506,1	503,7
Энергии, МДж	42,1	43,5	42,9	42,5
Отложилось				
Протеин, г	202,7± 4,77	233,5± 5,11*	212,8± 5,77	201,7± 7,31
Энергия, МДж	12,44± 0,29	13,85± 0,37*	13,2± 0,44	12,9± 0,41
Коэффициент конверсии, %				
Сырого протеина	35,2	39,4	36,2	34,8
Переваримого протеина	40,9	44,7	42,0	40,0
Обменной энергии	29,5	31,8	30,8	30,4

Примечание: * – достоверные изменения при сравнении контрольной и опытных групп ($p \leq 0,05$).

* * – достоверные изменения при сравнении контрольной и опытных групп ($p \leq 0,05$).

Сопоставление материалов исследований содержания протеина и энергии в потребленном корме с данными об их уровне в приросте массы тела птицы позволило нам констатировать, что введение микрочастиц железа в корм без предварительного физического воздействия принципиально не оказало влияния на конверсию питательных веществ в организме птицы. Так как и в контроле, в III опытной группе конверсия сырого протеина составляла 34-35%, переваримого протеина 40-41%, обменной энергии 29-30%.

В то же время предварительная обработка кормосмеси СВЧ или ультразвуком сопровождалось не которым повышением конверсии протеина и

энергии корма. Причем наиболее значительно при обработке СВЧ излучением. В этом случае эффективность трансформации сырого протеина выросла на 4,2%, обменной энергии на 2,3%. Продуктивный эффект оцениваемый по росту эффективности трансформации корма в продукцию от обработки кормосмеси ультразвуком оказался менее значимым + 1,0 % по конверсии сырого протеина и 1,3% по конверсии обменной энергии.

Таким образом наиболее полно цыплята использовали рацион с содержанием кормосмеси обработанной СВЧ излучением, что в последующем было подтверждено нами в дополнительной серии исследований.

2.4.1.6 Резюме по итогам I эксперимента на птице

Подводя итоги первого эксперимента на цыплятах бройлерах следует отметить, что наша рабочая гипотеза в целом на модели птицы была подтверждена – предварительная обработка смеси отрубей и микрочастиц железа СВЧ излучением изменяет структуру растительного субстрата формируя новые свойства корма. В частности, продуктивное действие рациона, содержащего кормосмесь обработанную СВЧ оказалось достоверно выше в сравнении с контролем на 7,1% и что особенно важно, больше в сравнении с действием нативной кормосмеси отрубей и микрочастиц железа на - 5,1%. Влияние ультразвука на продуктивное действие кормосмеси так же оказалось незначительным. В это случае мы получили корм, который в составе рациона уступал по продуктивному действию кормосмеси обработанной СВЧ. Дальнейшие исследования в целом подтвердили это превосходство, как по переваримости корма, так и по уровню мясной продуктивности.

При этом наиболее показательным эффектом от применения СВЧ стал рост конверсии сырого протеина и энергии, который значительно превосходил все остальные варианты.

На основании детального анализа полученных данных мы приняли решение о проведении второго эксперимента на цыплятах-бройлерах.

2.4.2 Результаты II эксперимента на птице

2.4.2.1 Условия содержания и кормления цыплят-бройлеров

Состав и питательность использованных рационов представлены в таблицах 19 и 20.

Таблица 19 – Состав и питательность комбикорма в первую неделю учетного периода, г/кг

Показатель	Масса вещества	Показатель	Масса вещества
Состав комбикорма:		хром	0,65
пшеница полновесная	320	медь	11,8
ячмень нешелушенный	10	железо	167,0
жмых подсолнечный 35%	184	йод	0,25
шрот соевый 40%	200	литий	0,11
рыбная мука 58%	40	марганец	27,1
масло растительное	60	никель	2,88
кукуруза	163	селен	0,35
отруби пшеничные	10	кремний	154,0
известняк	10	ванадий	0,31
соль	3	цинк	60,52
В комбикорме содержится:		макроэлементы:	
обменная энергия, МДж/кг СВ	14,29	кальций	9,09
сухое вещество	913	калий	10,8
сырой протеин	261,9	магний	3,53
сырой жир	82,2	натрий	1,24
сырая клетчатка	45,0	фосфор	9,14
аминокислоты:		токсические элементы	
лизин	11,6	мг:	
метионин	4,10	алюминий	79,71
цистин	3,72	кадмий	0,12
триптофан	2,13	ртуть	0,013
аргинин	11,8	свинец	0,12
гистидин	4,11	олово	0,001
лейцин	14,98	стронций	18,0
изолейцин	8,18	витамины:	
фенилаланин	7,14	каротин, мг	1,88
тирозин	6,67	А, тыс. МЕ	10,1
треонин	8,83	D3, тыс. МЕ	1,52
валин	8,12	Е, мг	9,65
глицин	8,56	B1, мг	1,97

микроэлементы, мг:		B2, мг	2,88
		B3, мг	10,54
мышьяк	0,39	B4, мг	563
бор	12,16	B5, мг	38,3
кобальт	0,18	B6, мг	2,65
молибден	1,04	B12, мг	0,026

Таблица 20 – Состав и питательность комбикорма во вторую и третью неделю учетного периода, г/кг

Показатель	Масса вещества	Показатель	Масса вещества
Состав комбикорма:		хром	0,77
пшеница полновесная	182	медь	9,51
ячмень нешелушенный	50	железо	100
жмых подсолнечный 35%	180	йод	0,25
шрот соевый 40%	75	литий	0,16
рыбная мука 58%	45	марганец	19,3
масло растительное	45	никель	2,64
кукуруза	400	селен	0,39
отруби пшеничные	10	кремний	84,0
известняк	10	ванадий	0,29
соль	3	цинк	44,9
В комбикорме содержится:		макроэлементы:	
обменная энергия, МДж/кг СВ	14,76	кальций	8,89
сухое вещество	907	калий	7,84
сырой протеин	212,1	магний	2,40
сырой жир	77,97	натрий	1,84
сырая клетчатка	55,7	фосфор	7,65
аминокислоты:		токсические	
лизин	8,75	элементы мг:	
метионин	3,59	алюминий	37,8
цистин	3,03	кадмий	0,14
триптофан	2,44	ртуть	0,009
аргинин	12,31	свинец	0,17
гистидин	5,14	олово	0,001
лейцин	15,07	стронций	19,52
изолейцин	8,09	витамины:	
фенилаланин	9,07	каротин, мг	3,34
тирозин	6,38	A, тыс. ME	7,21
треонин	7,25	D3, тыс. ME	1,03

валин	10,11	Е, мг	5,16
глицин	10,48	В1, мг	1,53
микроэлементы, мг:		В2, мг	2,98
		В3, мг	10,0
мышьяк	0,77	В4, мг	580
бор	8,24	В5, мг	29,8
кобальт	0,13	В6, мг	2,55
молибден	1,05	В12, мг	0,024

Сохранность поголовья во всех группах достигла 100%.

Исследование потребления корма подопытной птицей выявило существенное влияние изменения компонентного состава рациона и введения микрочастиц различной дисперсности на показатели поедаемости в группе с СВЧ-обработкой (таблица 21).

Таблица 21 – Динамика потребления комбикорма цыплятами-бройлерами на различных этапах выращивания

Значения потребления, г/гол	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
Стартовый комбикорм	1123	1173	1144	1147	1117
Ростовой комбикорм	1830	1870	1804	1844	1805
За весь период	2954	3044	2949	2991	2922

Проведенные исследования потребления корма не выявили выраженного токсического воздействия микродисперсных форм микроэлементов на организм цыплят-бройлеров.

2.4.2.2 Переваримость корма подопытной птицей

Исследование влияния комбинированного применения СВЧ- и УЗ-обработки с микрочастицами железа и меди продемонстрировало значительные различия в эффективности усвоения питательных веществ.

Наблюдалось последовательное увеличение коэффициентов переваримости по всем изучаемым показателям.

Согласно полученным данным, включение в рацион микрочастиц железа с предварительной СВЧ-обработкой отрубей в I опытной группе привело к повышению переваримости протеина на 8,13% относительно контроля ($p \leq 0,05$) и на 3,35% по сравнению с третьей опытной группой ($p \leq 0,01$). При этом в третьей опытной группе переваримость протеина с микрочастицами железа превысила контрольные показатели на 4,78% ($p \leq 0,05$). Ультразвуковая обработка также показала положительный эффект, увеличив переваримость протеина на 4,48% относительно контроля ($p \leq 0,05$), тогда как в первой опытной группе данный показатель оказался на 3,65% выше, чем во второй группе ($p \leq 0,01$) (таблица 22).

Таблица 22 – Коэффициенты переваримости питательных веществ корма, %

Группа	Органическое вещество	Сырой жир	Сырой протеин	Углеводы в среднем
контрольная	82,60±0,88	94,10±0,30	82,57±0,88	80,99±0,96
I опытная	87,29±0,31**	97,27±0,07***	90,70±0,23	82,23±0,53
II опытная	85,14±0,67*	92,95±1,72	87,05±0,57	83,21±0,46
III опытная	85,08±0,45	95,88±0,12**	87,35±0,38	83,25±0,41
IV опытная	78,00±1,55*	86,63±0,94	82,79±1,22	75,28±1,75

Примечание: * - $p \leq 0,05$ ** - $P \leq 0,01$ *** - ($P \leq 0,001$) при сравнении контрольной и опытных групп;

В ходе исследований установлен факт значительного улучшения переваримости питательных веществ при использовании комбинированной технологии СВЧ-обработки с микрочастицами железа. В I опытной группе переваримость жира достигла 97,27% ($p \leq 0,01$), а в III группе показатель составил 95,88% ($p \leq 0,05$), что свидетельствует о статистически достоверном превышении относительно контрольной группы.

Переваримость органического вещества была наиболее высокой в I группе и составила 87,29%, что на 4,69% выше контрольных значений ($p \leq 0,05$). Во II и III группах показатели переваримости органического

вещества были схожими — 85,14% и 85,08% соответственно, что превышало контроль на 2,54% и 2,48% при отсутствии достоверных различий между этими группами. Наилучшие результаты по всем показателям переваримости были достигнуты при использовании отрубного комплекса с СВЧ-обработкой и микрочастицами железа, что подтверждает перспективность данной технологии в птицеводстве.

Все изменения показателей являются статистически достоверными и демонстрируют эффективность применения комбинированной обработки для улучшения питательности кормов.

2.4.2.3 Рост и развитие подопытной птицы

Анализ результатов проведенного эксперимента позволил выявить изменения в интенсивности роста живой массы птицы в опытный период. Так, введение в рацион микрочастиц железа с последующим воздействием различных видов обработки корма оказало положительный эффект на рост живой массы (таблица 23).

Таблица 23 – Динамика живой массы подопытной птицы, г/гол.

Неделя учетного периода	Группа				
	контрольная	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
0	244,7 ±18,9	252,7 ±12,3	259,3 ±8,7	251,0 ±13,1	245,3 ±17,8
1	426,7 ±30,7	483,7 ±23,6	460,0 ±24,2	476,7 ±15,9	460,0 ±24,0
2	745,7 ±35,4	866,0 ±48,3*	789,3 ±31,5	843,5 ±35,5	783,0 ±29,9
3	1222,0 ±33,8	1310,5 ±53,5	1181,8 ±56,6	1249,5 ±41,0	1154,0 ±51,7
4	1562,8 ±41,5	1832,5 ±63,4*	1561,5 ±53,5**	1612,5 ±41,1	1546,0 ±70,9

Примечание: * – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп;

** – $p \leq 0,05$ при сравнении I и II опытных групп;

*** – $p \leq 0,05$ при сравнении I и III опытных групп;
 **** – $p \leq 0,05$ при сравнении I и IV опытных групп.

После второй недели основного учетного периода птица I опытной группы превосходила контроль на 16,1% ($p \leq 0,05$). Различия по живой массе в этот период между опытными группами оказались статически не достоверными. Тенденция более высокой интенсивности роста цыплят I опытной группы сохранилась до конца эксперимента, в результате на момент завершения последнего превосходство птицы I опытной группы над контролем составило 17,26% ($p \leq 0,05$).

Статистический анализ выявил достоверные различия между группами: показатели II группы оказались ниже на 17,3% ($p \leq 0,05$), III группы – на 10,9% ($p \leq 0,05$), а IV группы – на 18,53% ($p \leq 0,05$) относительно I опытной группы.

Детальное рассмотрение динамики еженедельных приростов живой массы подопытной птицы, позволило описать следующим образом (таблица 24).

Таблица 24 – Динамика приростов живой массы подопытной птицы, г/гол.

Неделя эксперимента	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
1	182,0 ±30,7	231,0 ±23,6	200,7 ±24,2	225,7 ±15,9	214,7 ±24,0
2	319,0 ±55,4	382,3 ±48,3*	329,3 ±31,5**	366,8 ±35,5***	323,0 ±29,9****
3	476,3 ±33,8	444,5 ±73,5	392,4 ±56,6	406,0 ±41,0	371,0 ±51,7
4	340,8 ±41,5	522,0 ±93,4	379,8 ±53,5	363,0 ±21,1	392,0 ±70,9
За весь эксперимент	1318	1580	1302	1362	1301

Примечание: * – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп;
 ** – $p \leq 0,05$ при сравнении I и II опытных групп;
 *** – $p \leq 0,05$ при сравнении I и III опытных групп;
 **** – $p \leq 0,05$ при сравнении I и IV опытных групп.

Результаты проведенного исследования демонстрируют значительное повышение интенсивности роста цыплят-бройлеров в опытных группах. Уже в двухнедельном возрасте птицы I опытной группы показали существенное преимущество по сравнению с контрольной группой, превысив ее показатели на 19,9 %. Одновременно было зафиксировано превосходство над III опытной группой на 14,9 %, что является статистически достоверным при уровне значимости ($p \leq 0,05$).

Сравнительный анализ интенсивности роста в опытных группах выявил дополнительные закономерности. Цыплята I опытной группы превосходили показатели II группы по абсолютному приросту на 16,1 %, III на 18,4 %. Наиболее выраженные различия были отмечены в четырехнедельном возрасте, который соответствовал концу учетного периода эксперимента.

Наибольшая эффективность воздействия была достигнута в I опытной группе, где использованная методика показала наилучшие результаты по всем анализируемым показателям роста и развития бройлеров.

Подводя итог можно сделать вывод, что сравнительно высокой интенсивности роста цыплят-бройлеров можно добиться, дополнительно включая в рацион птицы смесь отрубей и микрочастиц железа, подвергнутой сверхвысокочастотной обработке. В то же время нативная смесь отрубей и микрочастиц железа отличается меньшим продуктивным действием. Ультразвуковое воздействие на смесь отрубей и микрочастиц железа незначительно влияло на продуктивное действие набора кормов.

2.4.2.4 Биохимические показатели крови подопытных цыплят-бройлеров

Результаты биохимического анализа крови, проведенного для оценки интенсивности метаболических процессов у цыплят-бройлеров, показали соответствие всех изученных параметров физиологическим нормам.

Установлено, что показатели как в контрольной, так и в опытных группах находились в пределах стандартных значений, что свидетельствует об

отсутствии патологических изменений в обмене веществ. Данное наблюдение подтверждает безопасность применяемых экспериментальных методик и соответствие физиологическому статусу птицы (таблица 25).

Таблица – 25 Биохимические показатели сыворотки крови подопытных цыплят бройлеров в возрасте 30 сут.

Показатель	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
Общий белок, г/л	36,5 ±1,50	31,0 ±3,00	30,0 ±0,00*	34,5 ±0,50**	34,5 ±4,50
Альбумины, г/л	12,5 ±0,50	10,5 ±1,50	12,0 ±0,00	14,0 ±0,00	12,50 ±0,50
Биллирубин, ммоль/л	2,3 ±0,14	1,3 ±0,01*	1,5 ±0,30	1,7 ±0,34	0,23 ±0,03
АлАТ, ммоль/л	6,0 ±2,00	5,0 ±1,00	6,0 ±3,00	4,5 ±0,50	2,50 ±1,50
АсАТ, ммоль/л	290,5 ±93,50	248,5 ±21,50	249,0 ±50,00	213,5 ±1,50	226,50 ±25,50
Мочевина, ммоль/л	1,6 ±0,09	1,6 ±0,47	1,4 ±0,48	1,8 ±0,09	1,71 ±0,38
Креатинин, ммоль/л	18,0 ±6,00	18,0 ±6,00	18,0 ±6,00	23,5 ±11,50	21,0 ±6,00
Глюкоза, ммоль/л	11,9 ±0,69	9,3 ±1,31	10,1 ±0,50	11,9 ±0,28	10,6 ±1,01

Примечание: * – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп; ** – $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ при сравнении II и III опытных групп.

Результаты биохимического анализа сыворотки крови выявили следующие изменения. Во всех опытных группах зафиксировано снижение уровня общего белка относительно контрольной группы: в I группе на 15,1%, во II группе на 17,8% ($p \leq 0,05$) и в III группе на 5,4%. При этом между II и III группами отмечено достоверное различие в 15% ($p \leq 0,01$). Содержание альбуминов в сыворотке крови птицы III опытной группы превышало показатели контроля на 12,0%, I опытной группы на 33,3%, II на 16,6%.

Уровень билирубина имел тенденцию к снижению во всех опытных группах на 44,9% ($p \leq 0,01$), 32,2% и 25,9% соответственно по сравнению с контрольной группой. Активность аланинаминотрансферазы сохранялась на

одинаковом уровне в контрольной и II группах, тогда как в I и III группах наблюдалось снижение на 16,6% и 25,0% соответственно. Активность аспартатаминотрансферазы снизилась во всех опытных группах на 14,5%, 14,3% и 26,5% соответственно. Поскольку эти ферменты присутствуют в печени, почках, сердечной и скелетной мускулатуре, снижение их уровня в крови указывает на отсутствие патологических изменений в этих органах.

Уровень мочевины снизился на 11,8% во II группе, в то время как в III группе наблюдалось его повышение относительно контроля. Содержание креатинина было повышено в I и II группах, тогда как в III группе зафиксировано значительное увеличение показателя на 30,5%.

С возрастом цыплят-бройлеров все биохимические показатели претерпели определенные изменения, отражающие динамику метаболическим процессам в организме (таблица 26).

Таблица – 26 Биохимические показатели сыворотки крови подопытных цыплят бройлеров в возрасте 42 сут.

Показатель	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
Общий белок, г/л	31,0 ± 0,58	29,3 ± 3,38	29,0 ± 2,08	36,0 ± 5,13	29,0 ± 3,06
Холестерин, ммоль/л	3,9 ± 0,47	4,1 ± 0,27	4,3 ± 0,23	3,8 ± 0,24	3,7 ± 0,65
Билирубин, ммоль/л	2,9 ± 0,31	3,0 ± 0,12	2,4 ± 0,45	2,1 ± 0,80	3,0 ± 0,15
АлАТ, ммоль/л	13,3 ± 1,33	11,7 ± 1,67	13,0 ± 1,53	13,3 ± 1,33	11,0 ± 1,00
АсАТ, ммоль/л	252,3 ± 20,85	234,7 ± 22,73	190,7 ± 20,19	217,0 ± 7,57	185,3 ± 9,67
Мочевина, ммоль/л	1,7 ± 0,20	1,8 ± 0,33	1,7 ± 0,02	2,1 ± 0,44	1,3 ± 0,01
Креатинин, ммоль/л	31, 7 ± 7,67	39,0 ± 4,00	39,0 ± 4,00	39,0 ± 4,00	31,3 ± 3,67
Глюкоза, ммоль/л	13,1 ± 0,44	12,7 ± 0,77	13,7 ± 0,35	10,5 ± 1,56	11,9 ± 1,27
Fe, ммоль/л	15,0 ± 0,31	19,9 ± 2,76	15,8 ± 3,04	16,2 ± 1,46	12,9 ± 0,81

Биохимический анализ сыворотки крови цыплят-бройлеров выявил следующие изменения показателей. В III опытной группе содержание белка превышало контрольные значения на 16,1%, тогда как в I и II группах этот показатель был ниже контроля на 5,4% и 6,5% соответственно, причем данные различия не достигли статистической достоверности.

Таким образом, использование микрочастиц железа в питании птицы сопровождается изменениями в интерьере цыплят - бройлеров. При этом наиболее рациональным представляется использование предварительно обработанные комплексы кормосмеси железа и отрубей при СВЧ – воздействии.

2.4.2.5 Мясная продуктивность подопытных цыплят-бройлеров

По окончании экспериментальных исследований был осуществлен контрольный убой птицы опытных групп, в ходе которого получены результаты подтверждающие факт более предпочтительного использования в кормлении цыплят-бройлеров отрубей и микрочастиц железа, подвергнутой сверхвысокочастотной обработке в отличие от простой смеси этих компонентов рациона (таблица 27).

Таблица 27 – Результаты убоя подопытной птицы в конце эксперимента

Показатель	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
Предубойная живая масса	1523,8 ±22,8	1788,5 ±33,4*	1502,5 ±21,1**	1598,1 ±34,1***	1487,1 ±30,9****
Потрошенная тушка	1043,8 ±19,9	1255,5 ±22,3	1038,2 ±19,5	1117,1 ±32,3	1015,7 ±25,4
Убойный выход, %	68,5	70,2	69,1	69,9	68,3

Примечание: * - $p \leq 0,05$ ** - $P \leq 0,01$ *** - $P \leq 0,001$ при сравнении контрольной и опытных групп

По окончании исследований статистический анализ выявил, что I опытная группа достигла наивысших показателей предубойной массы — 1788,5 г/гол, что на 17,4% ($p \leq 0,05$) выше контрольных значений.

На фоне различия между контролем и группой подопытной птицы, получавшей нативную смесь отрубей и микрочастиц железа составила только 4,9% и была статистически не достоверной. Превосходство I опытной группой над другими опытными группами по данному показателю по отношению ко II опытной группе составили 19,0%- ($P \leq 0,001$), по отношению к IV опытной 20,3 % ($P \leq 0,001$).

На этом фоне особенности в кормлении подопытной птицы оказали еще более впечатляющее действие на показатель массы потрошённой тушки. Таким образом, что различия между контрольной и I опытной группой достигли 20,3% ($P \leq 0,001$).

Использование в кормлении цыплят-бройлеров отрубей и микрочастиц железа подвергнутых СВЧ обработке оказало более выраженной влияние на мясную продуктивность подопытной птицы в отличии от других использованных методов физического воздействия на нативную смесь. Так превосходство I опытной группой по величине показателя массы потрошённой тушки к окончанию эксперимента составила по отношению ко II опытной группе - 20,9% ($P \leq 0,001$), по отношению к IV опытной - 23,6 % ($P \leq 0,001$). Различия между I и III опытными группами по данному показателю составили 12,4%.

Сравниваемые группы значительно отличались по величине убойного выхода. Как и следовало ожидать наибольшая величина этого показателя оказалась в I опытной группе – 70,2%. Это значительно превосходило уровень контроля с 68,5%. Различия с другими опытными группа было мене значимым, но все же существенным.

Таким образом подводя итог можно сделать вывод, что повышения мясной продуктивности цыплят-бройлеров можно добиться, дополнительно

включая в рацион птицы смесь отрубей и микрочастиц железа, подвергнутой сверхвысокочастотной обработке.

2.4.2.6 Химический состав и содержание веществ в тканях тела подопытных цыплят-бройлеров

Оценка химического состава тканей и органов подопытной птицы позволила определить средневзвешенный химический состав всего организма цыплят-бройлеров (таблица 28).

Таблица 28 – Химический состав тела подопытных цыплят-бройлеров, %

Группа	Показатель			
	сухое вещество	протеин	жир	зола
контрольная	37,0±0,19	17,3±0,04	16,8±0,08	2,9±0,08
I опытная	38,4±0,11 ^a	17,1±0,03	18,4±0,14 ^a	2,8±0,03 ^b
II опытная	38,3±0,16 ^a	18,5±0,01 ^{ab}	16,5±0,12 ^b	3,3±0,06 ^a
III опытная	40,4±0,49 ^{abc}	16,9±0,11 ^{ac}	20,4±0,61 ^{ac}	2,9±0,02 ^c
IV опытная	37,2±0,23 ^{bcd}	17,8±0,06 ^{abcd}	16,0±0,29 ^{bd}	3,3±0,01 ^{ad}

Примечание: ^a – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп; ^b – $p \leq 0,05$ при сравнении I и опытных групп; ^c – $p \leq 0,05$ при сравнении II и опытных групп; ^d – $p \leq 0,01$ при сравнении III и IV опытных групп.

Результаты исследования демонстрируют значительное влияние комбинированного применения микрочастиц железа и различных методов обработки корма на химический состав тела птицы. В I опытной группе было зафиксировано увеличение содержания сухого вещества на 1,4% ($p \leq 0,01$) и жира на 1,6% ($p \leq 0,01$) относительно контрольной группы, при этом наблюдалось снижение минеральных веществ на 0,5% ($p \leq 0,001$) по сравнению с IV опытной группой.

Во II опытной группе отмечено существенное превосходство по содержанию протеина, которое превышало контрольную группу на 1,2% ($p \leq 0,001$), I группу на 1,4% ($p \leq 0,001$), III группу на 1,6% ($p \leq 0,001$) и IV группу на 0,7% ($p \leq 0,01$). Параллельно в этой группе зарегистрировано увеличение сухого вещества на 1,3% ($p \leq 0,05$) относительно контроля и на 1,1% ($p \leq 0,05$) относительно IV группы, но снижение на 2,1% ($p \leq 0,05$) по сравнению с III группой. Содержание жира уменьшилось на 1,9% и 3,9% ($p \leq 0,01$) относительно I и III групп.

В III опытной группе наблюдалось увеличение сухого вещества на 3,4% и 3,2% ($p \leq 0,01$) относительно контрольной и IV групп, а также на 2,0% и 2,1% ($p \leq 0,05$) относительно I и II групп. Содержание жира возросло на 3,6% ($p \leq 0,05$), 3,9% и 4,4% ($p \leq 0,01$) по сравнению с контрольной, II и IV группами. При этом произошло снижение протеина на 0,4% ($p \leq 0,05$), 1,6% ($p \leq 0,001$) и 0,9% ($p \leq 0,01$) относительно контрольной, II и IV групп, а также уменьшение золы на 0,4% ($p \leq 0,01$) и 0,4% ($p \leq 0,001$) относительно II и IV групп.

В IV опытной группе зафиксировано увеличение содержания золы на 0,4% ($p \leq 0,05$) и 0,4% ($p \leq 0,001$) относительно контрольной и III групп. Содержание протеина превышало показатели контрольной, I и III групп на 0,5%, 0,7% и 0,9% ($p \leq 0,01$), но было ниже II группы на 0,7% ($p \leq 0,01$). Отмечалось снижение сухого вещества на 1,2%, 1,1% ($p \leq 0,05$) и 3,2% ($p \leq 0,01$) относительно I, II и III групп, а также уменьшение содержания жира на 2,4% и 4,4% ($p \leq 0,01$) по сравнению с I и III группами.

Сравнительный анализ предварительной СВЧ-обработки отрубей и микрочастиц железа в I группе с III группой, где использовались только микрочастицы железа, показал существенное преимущество первой группы. Содержание сухих веществ, протеина и жира в первой группе превышало показатели третьей группы на 18,5% ($p \leq 0,05$), 13,4% ($p \leq 0,05$) и 25,1% ($p \leq 0,01$). При этом в III группе содержание сухих веществ и жира превышало контрольные значения на 12,6% ($p \leq 0,05$) и 25,0% ($p \leq 0,01$). Абсолютные

значения химических компонентов в теле цыплят-бройлеров представлены в таблице (таблица 29).

Таблица 29 – Содержание химических веществ в теле подопытных цыплят-бройлеров, г/гол

Группа	Показатель			
	сухое вещество	протеин	жир	зола
контрольная	472,3±10,93	220,5±5,50	214,4±5,21	37,4±0,53
I опытная	559,7±12,30 ^a	250,0±6,32 ^a	268,2±4,77 ^a	41,4±1,31
II опытная	468,7±20,13 ^b	226,0±10,17	201,7±8,01 ^b	41,0±2,08
III опытная	531,8±5,79 ^a	222,8±6,36	268,0±2,13 ^{ac}	37,8±0,92
IV опытная	473,2±21,61 ^b	226,9±8,15	203,6±11,63 ^{bk}	42,6±1,84

Примечание: ^a – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп; ^b – $p \leq 0,05$ при сравнении I и опытных групп; ^c – $p \leq 0,05$ при сравнении II и III опытных групп; ^d – $p \leq 0,05$ при сравнении III и IV опытных групп.

Наименьшие показатели содержания сухих веществ и жира были зарегистрированы во II опытной группе. По сравнению с I группой разница составила 16,3% ($p \leq 0,05$) для сухих веществ и 24,8% ($p \leq 0,01$) для жира. При сравнении с III группой содержание жира было ниже на 24,7% ($p \leq 0,01$).

Аналогичная тенденция наблюдалась в IV опытной группе, где количество сухих веществ и жира было ниже показателей I группы на 15,5% ($p \leq 0,05$) и 24,1% ($p \leq 0,05$) соответственно. По сравнению с III группой содержание жира в IV группе было меньше на 24,0% ($p \leq 0,01$).

Детальный анализ показал, что наблюдаемые изменения в первую очередь связаны с вариацией в содержании сухих веществ и жира. Результаты свидетельствуют, что комбинированное применение микрочастиц железа с СВЧ-обработкой корма способствовало повышенному депонированию жира в организме птицы. В противоположность этому, ультразвуковая обработка корма приводила к снижению доли жира как в теле, так и в отдельных органах (таблица 30).

Таблица 30 – Содержание химических веществ в отдельных тканях и органах подопытной птицы, г/гол

Группа	Показатель			
	сухое вещество	протеин	жир	зола
Мякоть тушки				
контрольная	141,7±6,94	102,2±5,01	34,0±1,66	5,5±0,27
I опытная	178,9±4,83 ^a	125,0±3,39 ^a	47,5±1,29 ^a	6,3±0,17
II опытная	151,6±8,97	110,8±6,55	35,7±2,11 ^b	5,1±0,30 ^b
III опытная	182,8±12,00	107,0±7,02	67,6±4,43 ^{bc}	5,1±0,33 ^b
IV опытная	161,3±4,00	116,1±2,88	39,9±0,99 ^{bd}	5,3±0,13 ^b
Кожа				
контрольная	92,2±3,29	9,7±0,35	82,0±2,93	0,5±0,02
I опытная	90,4±2,32	19,1±0,49 ^a	70,4±1,81 ^a	0,9±0,02 ^a
II опытная	79,8±5,30	15,1±1,00 ^b	64,0±4,24	0,8±0,05
III опытная	81,9±5,25	14,2±0,91 ^{ab}	66,9±4,29	0,7±0,05 ^a
IV опытная	88,8±9,24	15,1±1,57 ^a	73,1±7,60	0,7±0,07
Внутренние органы				
контрольная	96,5±2,05	34,5±0,73	60,5±1,28	1,5±0,03
I опытная	143,9±4,35 ^a	39,9±1,21 ^a	102,4±3,10 ^a	1,6±0,05
II опытная	98,5±1,50 ^b	35,2±0,54 ^b	61,9±0,94 ^b	1,4±0,02
III опытная	125,8±4,51 ^{ac}	35,4±1,27	89,0±3,19 ^{ac}	1,5±0,05
IV опытная	94,0±2,93 ^{abd}	35,7±1,11 ^a	56,7±1,77 ^{abd}	1,7±0,05 ^{ac}
Смесь тканей костной и ц.н.с систем				
контрольная	142,0±2,75	74,2±1,44	38,0±0,74	29,8±0,58
I опытная	146,5±5,04	66,0±2,27	47,9±1,65 ^a	32,6±1,12
II опытная	138,7±7,46	64,9±3,49	40,2±2,16	33,7±1,81
III опытная	141,2±3,22	66,2±1,51 ^a	44,5±1,01 ^a	30,5±0,70
IV опытная	129,0±5,86	60,0±2,73 ^a	34,0±1,54 ^{bc}	35,0±1,59

Примечание: ^a – $p \leq 0,05$ при сравнении контрольной и опытных групп; ^b – $p \leq 0,05$ при сравнении I и опытных групп; ^c $p \leq 0,05$ при сравнении II и опытных групп; ^d – $p \leq 0,05$ при сравнении III и IV опытных групп.

Так, если в мышечной ткани тушки I опытной группы содержание сухих веществ, протеина и жира было больше на 26,3 % ($p \leq 0,05$), 22,3 % ($p \leq 0,05$) и 39,7 % ($p \leq 0,01$) по отношению к контролю, то во II и IV опытных группах показатели жира и золы ниже на 24,8 % ($p \leq 0,05$), 19,0 % ($p \leq 0,05$) и на 16,0 % ($p \leq 0,05$), 15,9 % ($p \leq 0,05$) в сравнение с I опытной группой, в III опытной группе показатель жира превышал на 42,3 % ($p \leq 0,05$). В коже содержание протеина и золы I опытной группы, превышало контрольную группу на 96,9 % ($p \leq 0,001$) и 80,0 % ($p \leq 0,01$) соответственно, показатель жира был ниже на 14,1 % ($p \leq 0,05$). Показатели протеина в III опытной группе преобладали на 46,4 % ($p \leq 0,05$), золы на 40,0 % ($p \leq 0,05$), в IV опытной группе протеина на 55,7 % ($p \leq 0,05$), относительно контроля. Достоверные различия по содержанию протеина были отмечены во II и III опытных группах 20,9 % ($p \leq 0,05$) и 25,7 % ($p \leq 0,05$) в сравнении с I опытной группой.

Содержание сухих веществ, протеина и жира во внутренних органах птицы I опытной группы достоверно превышало показатели контрольной группы на 49,1% ($p \leq 0,01$), 15,6% ($p \leq 0,05$) и 69,3% ($p \leq 0,01$) соответственно. По сравнению со II опытной группой преимущество составило 46,1% ($p \leq 0,01$) по сухим веществам, 13,3% ($p \leq 0,05$) по протеину и 65,4% ($p \leq 0,01$) по жиру.

В III опытной группе содержание сухих веществ и жира было выше по отношению к контрольной группе на 30,4 % ($p \leq 0,01$) и 47,1 % ($p \leq 0,01$), по отношению ко II опытной группе на 27,7 % ($p \leq 0,05$) и 43,8 % ($p \leq 0,01$), золы на 7,1 % ($p \leq 0,05$), по отношению к IV опытной группе 33,8 % ($p \leq 0,01$) и 57,0 % ($p \leq 0,01$). В сравнении с I опытной группой IV опытная группа снизила показатели сухих веществ и жира на 34,7 % ($p \leq 0,01$) и 44,6 % ($p \leq 0,01$), по отношению к контрольной опытной группе на 2,6 % ($p \leq 0,001$) и 6,3 % ($p \leq 0,001$), протеина и золы превысила на 3,5 % ($p \leq 0,01$) и 13,3 % ($p \leq 0,001$).

В смеси тканей костной и центральной нервной системы в III и IV опытных группах показатели протеина имели тенденцию снижения на 10,8 % ($p \leq 0,05$) и 19,1 % ($p \leq 0,05$), показатели жира в I и III опытных группах были выше на 26,1 % ($p \leq 0,05$) и 17,1 % ($p \leq 0,05$) по отношению к контролю, в IV опытной группе этот показатель снизился по отношению к I и III опытным группам на 29,0 % ($p \leq 0,05$) и 23,6 % ($p \leq 0,05$).

Обобщая полученные данные, следует отметить, что анализ химического состава тканей и органов подопытной птицы выявил наивысшие показатели содержания сухих веществ и жира в I и III опытных группах. Наибольшая эффективность была достигнута при использовании комбинированной методики, включающей введение микрочастиц железа с последующей СВЧ-обработкой кормосмеси, что подтвердило ее превосходство относительно других экспериментальных групп.

Показатели концентрации энергии в тканях тела подопытных бройлеров представлены в таблице 31.

Таблица 31 – Концентрация энергии в теле подопытных цыплят-бройлеров, МДж/кг СВ

Период опыта	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
Начало	26,1±0,377				
Окончание	26, 6 ±0,135	26, 9 ±0,296	26,7 ±0,101	26, 8 ±0,039	26, 8 ±0,245

В заключительном этапе эксперимента было установлено, что энергетическая концентрация в организме цыплят I опытной группы превышала контрольные значения на 1,12%. Сравнительный анализ с другими группами показал следующие результаты: превышение над II группой составило 0,27%, над III группой - 0,89%, а над IV группой - 0,61% относительно контрольных показателей.

Таким образом, использования в кормлении кормосмеси отрубей и металлов-микроэлементов сопровождается изменениями в химическом составе и содержании питательных веществ в организме цыплят-бройлеров.

2.4.2.7 Конверсия энергии и протеина корма в продукцию подопытной птицы

Успешность любой схемы кормления сельскохозяйственной птицы, выращиваемой на мясо во многом определяется эффективностью метаболизма, соотношения синтеза и ресинтеза в тканях тела. Мы в своих исследованиях последнюю позицию отрабатывали через оценку совокупности питательных веществ откладываемых в организме птицы. Как следует из полученных результатов наиболее рационально протеин и энергию корма использовали цыплята бройлеры I опытной группы. В частности на момент завершения эксперимента в тканях тела птицы этой группы содержалось в среднем 230,62 г протеина и около 15,89 МДж энергии. Аналогичный показатель в контрольной группе оказался ниже на 14,7 и 21,9%, соответственно (таблица 32).

Таблица 32 - Трансформация энергии и протеина корма в продукцию подопытных бройлеров за учетный период

Показатель	Группа				
	контроль	I опытная	II опытная	III опытная	IV опытная
Отложилось					
Протеин, г	201,13± 5,50	230,62± 6,32	206,58± 10,17	203,46± 6,36	207,51± 8,15
Энергия, МДж	13,04± 0,34	15,89± 0,34*	12,67± 0,56	13,23± 0,09	12,77± 0,66
Коэффициент конверсии, %					
Протеин	31,82± 0,87	35,73± 1,12*	30,18± 1,49	28,11± 0,88*	30,41± 1,19
Обменной Энергии	35,14± 0,91	38,30± 1,03**	31,40± 1,39	35,65± 0,23	34,17± 2,07

Примечание: * – достоверные изменения при сравнении контрольной и опытных групп ($p \leq 0,05$).

* * – достоверные изменения при сравнении контрольной и опытных групп ($p \leq 0,05$).

Применение СВЧ обработки для обработки растительно-металлической смеси оказалось оправданным, что дополнительно подтверждено нами и при оценки состава тела птицы. Так как превосходство I опытной группы над III опытной по содержанию протеина в теле составило 13,3%, по уровню энергии 4,3%. Аналогичные показатели в двух других опытных группах так же оказались ниже.

Соответственно, большее содержание протеина и энергии в теле определили и более эффективное трансформирование компонентов корма в продукцию. В частности коэффициент конверсии протеина корма в ткань тела птицы составил в I опытной группе 35,73%, обменной энергии 38,30%.

Полученные показатели демонстрируют существенное превосходство над контрольной группой: эффективность использования протеина была выше на 3,91%, а эффективность преобразования энергии — на 3,16%. Аналогичная тенденция наблюдалась при сравнении I опытной группы с другими экспериментальными группами.

Результаты наших исследований успешно прошли производственную апробацию, подтвердив свою практическую значимость и эффективность в реальных условиях.

2.5 Результаты производственной проверки

Производственная проверка эффективности использования опытной кормовой добавки проведена в условиях ЗАО «Птицефабрика Оренбургская» на 400 цыплятах-бройлерах кросса кросса «Смена - 7» (n=400) в течение 35 дней. По итогам исследований была определена экономическая эффективность производства мяса птицы. Контрольная группа при этом получала рацион, согласно рекомендациям и нормам ВНИТИП (2009) (таблица 33).

Таблица 33 - Техничко-экономические показатели производства мяса бройлеров на основе использования опытной кормосмеси

Показатель	Варианты	
	контрольный	опытный
Поголовье цыплят: на начало	400	400
на конец	392	396
Производственные затраты, руб.	74398,7	79014,5
Убойная масса одной головы, кг/гол	2,125	2,247
Убойная масса общая, кг	833	890
Выручка от продажи, руб.	93471,5	101770,7
Прибыль от реализации, руб.	19072,8	22756,2
Уровень рентабельности, %	25,6	28,8

На основании полученных результатов можно заключить, что, скармливание опытной кормовой добавки позволяет дополнительно получить около 142,5 кг продукции или 20,7 тысяч рублей на каждую 1 тысячу цыплят-бройлеров. При этом уровень рентабельности мяса птицы может вырасти на 3,2%.

3 ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Бурное развитие биологических наук, как фундамента зоотехнии, в последние годы, определило появление на рынке целого ряда новых технологий и решений в области кормления сельскохозяйственных животных. При этом одним из перспективных направлений современной науки о кормовых добавках, является создание нового класса кормовых средств – специфических стимуляторов процессов пищеварения у животных. В этой связи особый интерес вызывают работы по использованию веществ способных стимулировать полостное пищеварения. Это позволило бы увеличить интенсивность и соответственно эффективность пищеварения и в конечном итоге обеспечить повышение продуктивности животных и увеличить эффективность использования кормов.

Принципиально, проблема повышения полостного пищеварения могла бы быть решена через создание в полости пищеварительной трубки новых центров прикрепления гидролаз и места адгезии нормофлоры. Это возможно через использования частиц металлов, с возникновением на поверхности кормовых частиц заряда.

Следует отметить, что в новом решении нет ничего противоестественного, в норме частицы различного размера в значительном количестве поступают в организм человека и животных. Так по некоторым оценкам их количество, ежедневно, превышает порядок в 10^{12} (Powell J.J., Thoree V., Pele L.C. 2007). При этом наука пока не располагает знаниями о роле экзогенных частиц в работе желудочно-кишечного тракта и метаболизме (Powell J.J., et al 2010). Очевидно, что биологические свойства микро- и ультрадисперсных частиц в организме будут зависеть от состава, формы, размера, дозировки и путей воздействия (Powell J.J., et al 1999; Gornati R., et al et al 2016). Исходя из существующих данных, превращение частиц некоторых металлов (железо, алюминий и др.) в пищеварительной трубке связано с «агрессивностью» кишечных соков, действие которых приводит к деградации

частиц (Di Gioacchino M., et al 2009), что принципиально минимизирует клеточные повреждения под действием частиц на ткани ЖКТ (Mania S.M., et al 2014). Важным аспектом обмена частиц в ходе разворачивания энтерального гомеостаза является способность последних напрямую, минуя клеточные барьеры, проникать в энтероциты и в более глубокие ткани (Oberdörster G., et al 2005; Jain T.K., et al 2008), что имеет место в сочетании с проникновением деградированных частиц в форме ионов в межклеточный обмен (Li C.H., et al 2012; Baek M., et al 2012; Seok S.H., et al 2013; Soo-Jin Choi and Jin-Ho Choy, 2014). Так в эксперименте показано, что частицы железа в кишечнике способны всасываться путём эндоцитоза (Mohamad Aslam F., et al 2014).

В свете выше сказанного вполне очевидными и перспективными представляются технологии позволяющие размещать частицы металлов-микроэлементов на поверхности частиц корма. Этого можно достичь через физическое воздействие на смеси кормов и частиц металлов (Юсупова Г.Г., Цугленок Г.И., 2004). Эти решения позволяют сформировать заряд на поверхности частиц корма (Simkó M., 2007). В числе перспективных физических методов для создания нового класса специфических стимуляторов пищеварения можно рассматривать воздействие как СВЧ (Kaufmann B., Christen P., 2002), так и обработку образцов ультразвуком (Рождественский В.В., 1977; Мирошников С.А., и др., 2012).

Наукой показана эффективность применения методов СВЧ и УЗ для повышения питательной ценности различных кормов (In-Chul Lee, et al 2016). При этом по мере накопления знаний становятся очевидными перспективы использования сочетания этих методов с целью улучшения свойств комплексов растительных субстратов и минеральных веществ (Егоров И.А., и др., 1985; Курилкина М.Я., и др., 2010. Сизова Е.А., и др., 2011).

Следует отметить, что первые упоминания об использовании ультра- и микро дисперсных частиц металлов-микроэлементов датируются 80 годами

прошлого века. В одной из первых работ И. А. Егорова, В. П. Куреневой, Н. Н. Глущенко, Л. Д. Фаткуллиной и Ю. И. Федорова, 1985).

Опираясь на эти, и более поздние, результаты исследований, мы при поставке задач стремились обосновать новый технологический подход к созданию высокоэффективных кормовых комплексов на основе синергии растительных субстратов и микрочастиц железа после СВЧ-обработки. В общей сложности нами было выполнено четыре серии экспериментальных исследований.

На начальном этапе наше исследование было направлено на изучение физико-химических свойств микрочастиц железа. Мы определили размер и пикнометрическую плотность металлических микрочастиц, поскольку эти показатели имеют решающее значение для взаимодействия с биологическими системами. Соответственно, чем меньше пикнометрическая плотность металлических микрочастиц, тем больше площадь их поверхности.

Пикнометрическую плотность определяли в соответствии с ранее описанным методом, и в дальнейших исследованиях использовались порошки с минимальной плотностью. Однако, экспериментальные исследования показали неоднозначное влияние пикнометрической плотности металлических микрочастиц на свойства кормовых средств. Следует отметить, что ранее сходные результаты были получены в работах (Сизова Е. А., Яушева Е. В., Мирошников С. А., Лебедев С. В. и Дускаев Г. К. 2015).

Характеристика микрочастиц пяти металлов (Fe, Cu, Al, Cr, Ni) выявила критическую зависимость их функциональных свойств от физических параметров. Железо продемонстрировало уникальную комбинацию свойств: размер частиц 12,5-50,0 мкм при минимальной пикнометрической плотности 0,63 см³/г, что соответствует максимальной удельной поверхности среди исследуемых металлов. Микрофотографии визуализируют принципиальное различие в структуре: железа и хрома, которые имели развитую губчатую морфологию. В отличие от препаратов алюминия и никеля, характеризующих компактной округлой формой. Эта разница напрямую коррелирует с

реакционной способностью частиц в биологических системах - губчатая структура обеспечивает увеличение площади контакта с пищеварительными ферментами в 3.8 раза по сравнению с округлыми аналогами. Полученные данные подтверждают гипотезу С.А. Мирошникова и др., (2018) о зависимости между пикнометрической плотностью и биологической активностью, что и объясняет выбор железа в качестве оптимального компонента перспективной кормовой добавки.

Изученное гидробаротермического воздействия на исходную смесь отрубей и высокодисперсных металлических частиц показало увеличение удельной поверхности образцов с влажностью 65-70% и температурой обработки 120°C (Курилкина М. А., и др., 2010).

Содержание влаги в исходных образцах также является наиболее важным фактором для эффективного воздействия СВЧ. Дополнительное увлажнение опытных образцов влияет на температуру продукта на выходе, в то время как оптимальное содержание влаги составляет 45%. Наши эксперименты показали, что температура образцов на фоне СВЧ излучения может достигать 65°C (ОК4), что близко к температуре денатурации белка отрубей и оптимально для превращения крахмала в легкоусвояемые декстрины и полисахариды. Температура воздействия 65°C, рабочая частота 2450 МГц и выходная мощность 800 Вт инициируют диффузионные процессы и, таким образом, обеспечивают формирование исходного химически и структурно гетерогенного комплекса. Применяемая мощность СВЧ-электромагнитного воздействия значительно превышает предельную температуру спекания по времени воздействия в течение 90 секунд и определяет течение процессов деформации металлических частиц.

Исследование температурных режимов обработки опытных комплексов выявило синергетический эффект при комбинации микрочастиц Fe с увлажнением до 45%. Образец ОК4 (отруби + Fe + 45% H₂O) после СВЧ обработки достигает температурного пика 65°C против 54°C в контрольном образце. Этот феномен объясняется специфическим нагревом

ферромагнитных частиц за счет дипольных потерь в переменном электромагнитном поле.

Увлажнение до 45% создает условия для паровых микровзрывов, интенсифицирующих структурные преобразования. Микрочастицы Fe выступают центрами нуклеации этих процессов, что подтверждается увеличением пористости ОК4 до 74,14% против 50,73% в ОК1.

Слипание частиц и дальнейшее спекание поверхностей приводит к образованию агломерированных металлических частиц в ОК. Электромагнитное воздействие на субстраты эффективно для создания высокопористой микроструктуры, что превосходит результаты, полученные при обычной термообработке (Курилкина М. Я., Гарипова Н.В., 2014). Двойная модификация отрубей и микрочастиц железа, подвергнутых электромагнитному воздействию сверхвысокочастотного диапазона, показала синергетический эффект на отруби структура обусловлена повышенной пористостью и появлением магнитных свойств в ОК.

Визуализация методом световой микроскопии выявила качественные изменения в структуре комплексов. Так, в ОК1 (нативные отруби влажность 12,5%) наблюдаются интактные частицы отрубей с сохраненной слоистой структурой. ОК3 (нативные отруби влажность 12,5% + Fe 7 мг/кг) демонстрирует частичную деструкцию клеточных стенок. ОК4 (нативные отруби + H₂O 45% + Fe 7 мг/кг + ЭМП СВЧ) характеризуется формированием развитой пористой матрицы с равномерно распределенными Fe-агломератами.

Принципиально важным открытием стало обнаружение органических пленок, обволакивающих микрочастицы Fe. Эти пленки, образованные термоденатурированными белками и полисахаридами отрубей, выполняют двойную функцию, они защищают железо от преждевременной ионизации в кислой среде желудка, что в свою очередь обеспечивают направленный транспорт через энтеральный барьер.

Проведенный регрессионный анализ продемонстрировал статистически значимые взаимозависимости между ключевыми параметрами. Установлена

положительная корреляция между пористостью кормовых комплексов и показателями их питательной ценности: коэффициент корреляции с переваримостью сухого вещества составил $r=0.98$ ($p<0.01$), а с биодоступностью железа $r=0.94$ ($p<0.01$). Температурный режим обработки также достоверно влиял на биодоступность микроэлемента $r=0.89$ ($p<0.05$), что подтверждает критическую роль термодинамических параметров в формировании функциональных свойств комплексов.

Результаты оценки переваримости *in vitro* демонстрируют строгую зависимость между структурными изменениями и функциональными характеристиками. Так, СВЧ обработка в сочетании с введением в субстрат микрочастиц железа обеспечила достоверное увеличение переваримости сухого вещества на 10,86% ($p\leq 0,05$) по сравнению с контролем, что дает преимущество в сравнении с экструзионной обработкой и воздействии ТВЧ.

СВЧ-воздействие оказывает более значимое воздействие на амилалитическую активность *in vitro* ($p<0.01$) при экспозиции Fe-модифицированных отрубей в сравнении с ТВЧ и УЗ. Можно предположить, что этот эффект обусловлен резонансным поглощением энергии ферромагнетиками и дипольным изменением воды. Технологическое преимущество СВЧ подтверждается максимальным приростом ферментативной активности на 22,8% относительно контроля, при минимальных энергозатратах (1.8 кВт·ч/кг).

Для многокомпонентных микрометаллических комплексов (Fe-Al-Cu-Cr-Ni) все методы показали ограниченную эффективность в отношении амилалитической активности *in vitro* от -9,8 до 0,02%, что подтверждает целесообразность разработки однокомпонентных препаратов.

Таким образом, по результатам лабораторных исследований установлено, что наибольшая эффективность достигнута при использовании комбинации условий - увлажнение отрубей до 45% в сочетании с добавкой железа (7 мг/кг) и обработкой электромагнитным полем СВЧ.

На основании пилотных исследований нами были произведены опыты на модели цыплят-бройлеров. В ходе первой серии исследований нами были изучены биологические свойства кормовых добавок, созданных на основе отрубей с включением микрочастиц железа, предварительно обработанных электромагнитным СВЧ-воздействием или ультразвуком. Оценка включала изучение питательности (определение переваримости «in vitro» и «in vivo») и интенсивности роста цыплят-бройлеров. На подготовительном этапе все цыплята содержались и кормились в идентичных условиях. В основной учетный период 10% пшеничных отрубей в контрольном рационе заменялись опытными кормосмесями, в I опытной группе на СВЧ-обработанную кормосмесь; во II опытной – на кормосмесь, обработанную ультразвуком; в III опытной – на необработанную кормосмесь.

Таким образом, высокая продуктивность определялась как биологическим действием микрочастиц железа, так и их синергическим эффектом после СВЧ-обработки.

Выявленные изменения в переваримости питательных веществ свидетельствуют о стимулирующем влиянии СВЧ-обработки на метаболические процессы. В I опытной группе переваримость сухого вещества увеличилось на 6,44% ($p \leq 0,05$), по отношению к контролю, органического вещества на 3,4% ($p \leq 0,05$), сырого жира на 2,1%, ($p \leq 0,05$).

Следствием улучшения переваримости корма стало повышение продуктивности, что подтвердилось достоверным увеличением прироста живой массы цыплят в I опытной группе по сравнению с контролем. Таким образом, эксперимент демонстрирует, что рост усвоения питательных веществ корма обусловлен не только физическими преобразованиями под действием СВЧ-поля, но и биологической активностью микрочастиц железа которые, по-видимому, активно вовлекаются в энтеральный метаболизм.

Результаты оценки биодоступности железа из кормов для птицы показали, что обработка опытных кормовых комплексов как ультразвуком, так и электромагнитным СВЧ-излучением статистически значимо повышает

усвояемость железа из микрочастиц на 5,8–7,0% ($p \leq 0,05$). Одним из объяснений этого эффекта при СВЧ-воздействии может быть локальный нагрев в зонах нахождения металлических частиц, с последующим их спеканием и образованием органических пленок на поверхности. Предположительно, такая органическая оболочка облегчает прохождение микрочастиц железа через энтеральный барьер. Дополнительным фактором повышения биодоступности железа может выступать стимуляция микрофлоры ЖКТ (Мирошников С.А., Кван О.В., Нуржанов Б.С., 2010) и частичная деградация сырой клетчатки вблизи частиц железа.

Таким образом, на основании результатов экспериментальных исследований максимальной эффективностью для цыплят-бройлеров обладала комбинация увлажнённых пшеничных отрубей (45%), микрочастиц Fe (7 мг/кг) и СВЧ-обработки.

В ходе второй серии исследований изучено влияние кормовых добавок на основе микрочастиц железа и меди в сочетании с различными методами обработки (СВЧ и УЗ) на продуктивные и физиолого-биохимические показатели цыплят-бройлеров.

Введение микрочастиц железа в сочетании с СВЧ-обработкой в I опытной группе сопровождалось изменениями в продуктивности и обмене веществ в организме птицы. Увеличение переваримости органического вещества на 4.6% ($p \leq 0.01$), сырого жира на 3.17% ($p \leq 0.001$) и сырого протеина на 8.1% ($p \leq 0.001$) указывает на улучшение усвоения питательных веществ. Это согласуется с ростом живой массы на 17.26% ($p \leq 0.05$) к 4-й неделе, что может объясняться оптимизацией ферментативной активности и усилением метаболических процессов под влиянием термической обработки. СВЧ-воздействие, вероятно, повышает биодоступность железа, стимулируя синтез гемоглобина и кислородтранспортную функцию, что подтверждается ростом содержания железа в сыворотке крови на 32.33% ($p \leq 0.01$).

В ходе исследований крови было снижение билирубина на 44.9% ($p \leq 0.01$) в I опытной группе, что на фоне отсутствия патологических

изменений в активности ферментов АлАТ/АсАТ исключает токсическое действие микрочастиц.

Преимущество группы подопытных цыплят, получавшей СВЧ-обработанный корм проявлялось уже ко 2-й неделе увеличением живой массы на 19.9%, по отношению к контролю ($p \leq 0.05$). К концу периода разница в приростах еще более увеличилась, что коррелирует с изменением химического состава тела: увеличение доли жира на 1.6% ($p \leq 0.01$) и сухого вещества на 1.4% ($p \leq 0.01$). Накопление липидов было особенно выражено в мышечной ткани и внутренних органах. Фактор накопления жира в мышечной массе, в данном контексте отражает эффективное использование энергии корма, подтвержденное ростом её концентрации в тканях на 1.12%.

Ультразвуковая обработка кормов с последующим их скармливанием во II опытной группе не сопровождалось столь же значительными изменениями в продуктивности птицы. Повышение переваримости сырого протеина составило 4.4% ($p \leq 0.01$), интенсивность роста птицы увеличилась на 17.3% ($p \leq 0.05$). Скармливание птице кормового средства включавшего нативные микрочастицы железа в III опытной группе привело к увеличению живой массы цыплят на 10.9%.

Полученные данные подчеркивают важность предварительной обработки кормовых добавок. СВЧ-воздействием, эта технология, в отличие от ультразвука, обеспечивает глубокую модификацию компонентов корма, усиливая взаимодействие микрочастиц железа с матрицей отрубей. Это способствует формированию биологически активных комплексов.

На основании анализа полученных результатов мы смогли перейти к следующим выводам.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Корм получаемый путем обработки сверхвысокими частотами (СВЧ) смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа по биологическим характеристикам и продуктивному действию отличается от нативной смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа. При этом биодоступность сухого вещества кормосмеси возрастает *in vitro* на 10,0-11,0%; переваримость органического вещества рациона *in vivo* на 3,0-4,7%. Обработка кормосмеси СВЧ сопровождается увеличением амилалитической активности *in vitro* на 22-23%; пористости кормовой добавки на 12,4-23,4%; биодоступности железа на 3,0-4,7%. В ходе СВЧ обработки происходит обволакивания частиц железа органическими пленками. Замена СВЧ обработки, вышеназванной кормосмеси, на обработку высокочастотным нагревом или ультразвуком не столь эффективна.

2. Сравнительная оценка эффективности методов предварительной обработки кормовой смеси, в составе отрубей и микрочастиц железа, показала, что наиболее рациональным является обработка кормов СВЧ воздействием. В этом случае биодоступность сухого вещества образцов «*in vitro*» повышается на 10-11%, против 6-7% при обработке токами высокой частоты и на 0,5-1,0% при ультразвуковом воздействии. Следует отметить, что между амилалитической активностью среды инкубации и биодоступностью вещества корма отмечается высокая зависимость, причем наиболее выраженная после предварительной СВЧ обработки, в этом случае амилалитическая активность среды инкубации корма повышается на 22,8%.

3. Замена в составе полнорационного комбикорма на пшенично-ячменной основе для цыплят-бройлеров отрубей (10% по массе) на кормовое средство, полученное путем обработки СВЧ смеси увлажненных отрубей и микрочастиц железа сопровождается повышением переваримости углеводов на 3,7%, органического вещества рациона на 3,0-4,7%. При этом интенсивность роста цыплят бройлеров возрастает на 8-19%, окупаемость

корма продукцией на 4-16%. Нативная кормосмесь, равно как и обработанная ультразвуком при включении в рацион не стимулирует повышение интенсивности роста цыплят-бройлеров.

4. Использование в кормлении цыплят-бройлеров кормовых средств, полученных путем обработки сверхвысокими частотами и ультразвуком смеси увлажненных отрубей и микрочастиц железа позволяет повысить биодоступность *in vivo* железа на 5,8-7,0%. При этом конверсия сырого протеина корма в продукцию повышается на 3,9-4,2%, обменной энергии на 2,3-3,2%. В то же время использование нативной смеси отрубей и микрочастиц железа, или обработанной ультразвуком кормосмеси сопровождалось снижением конверсии протеина корма в продукцию на 3,7 и 1,6%, соответственно.

5. Использование в кормлении цыплят-бройлеров оцениваемых кормовых средств не сопровождается существенными изменениями в составе сыворотки крови птицы. При этом скормливание в составе полнорационного комбикорма кормового средства, полученного путем обработки СВЧ смеси увлажненных отрубей и микрочастиц железа может сопровождаться снижением уровня билирубина в сыворотке крови.

6. СВЧ обработка и последующее скормливание цыплятам-бройлерам смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа в течение четырех недель позволяет улучшить мясную продуктивность птицы по величине убойного выхода на 0,9-1,7%, по величине выхода тушки на 12,4%. При этом содержание протеина и энергии в теле птицы возрастает на 13,3 и 4,3%, соответственно, в сравнении с эффективностью нативной смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа.

7. Скормливание цыплятам-бройлерам кормового средства, полученного путем СВЧ обработка смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа позволяет повысить рентабельность производства мяса птицы на 3-4% в сравнении с эффективностью нативной смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа.

5 ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ

Оптимизация рациона цыплят-бройлеров за счёт введения кормового средства на основе СВЧ-обработанной смеси пшеничных отрубей и микрочастиц железа позволяет повысить продуктивность и качество конечной продукции. Данная методика обеспечивает увеличение интенсивности роста птицы на 8% и более, а также повышение рентабельности производства на 3-4%.

6 ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Тема диссертационной работы перспективна к дальнейшим исследованиям, направленным на:

- разработку новых подходов к созданию кормовых средств, способных повышать эффективность полостного пищеварения у моногастричных;
- создание новых кормовых средств, обеспечивающих формирование желательного элементного статуса сельскохозяйственной птицы в различных производственных условиях.

7 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринжанов А.Е., Мирошникова Е.П., Килякова Ю.В. Использование биодобавок и наночастиц железа в кормлении карпа // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 6(181). С. 44-48.
2. Адлер, Ю.П., Маркова Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, – 1986. С. – 279.
3. Барышев М. Г., Касьянов Г.М. Влияние электромагнитных полей на биохимические процессы в семенах растений Пищевая технология. – 2002. – 1 17-9.
4. Быков А.В., Мирошников С.А., Межуева Л.В. К пониманию действия кавитационной обработки на свойства отходов производств // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 12(106). С. 77-80.
5. ГОСТ 13496.15-97 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения содержания жира. – М.: Стандартиформ, – 2011. – 12 с.
6. ГОСТ 23042-86. Мясо и мясные продукты. Метод определения жира. – М.: Стандартиформ, – 2010. – 4 с.
7. ГОСТ 25011-81. Мясо и мясные продукты. Метод определения белка. – М.: Стандартиформ, – 2010. – 8 с.
8. ГОСТ 31640-2012. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. – М.: Стандартиформ, – 2012. – 11 с.
9. ГОСТ 32044.1.2012. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение массовой доли азота и вычисление массовой доли сырого протеина. Часть 1. Метод Къельдаля. – М.: Стандартиформ, – 2014. – 15 с.
10. ГОСТ 51479-99. Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли влаги. – М.: Стандартиформ, – 2010. – 6 с.
11. ГОСТ 55569-2013. Корма, комбикорма и сырье. Определение протеиногенных аминокислот методом капиллярного электрофореза. – М.: Стандартиформ, – 2014. – 18 с.
12. ГОСТ Р 53642-2009. Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли общей золы. – М.: Стандартиформ, – 2010. – 11 с.
13. Гречушкин А.И. Эффективность производства продукции животноводства при использовании вторичных сырьевых ресурсов, подготовленных по различным технологиям. Диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Волгоградский научно-исследовательский технологический институт мясо-молочного скотоводства и переработки продукции животноводства РАСХН. Оренбург, – 2009 – 334 с.
14. Дудкин М.С., Л.Ф. Т.В. Сагайдак, Щелкунов, С.П. Решта, Пищевые волокна побочных продуктов переработки зерна и сахарной свеклы

как сорбенты экологически вредных веществ. Известия вузов. Пищевая технология. – 1999. – №4 87-88.

15. Егоров И. Современные тенденции в кормлении птицы / И. Егоров, Т. Папазян // Птицеводство. – 2007. – № 8. – С. 9-11.

16. Егоров И.А. Высокодисперсные порошки металлов – источники микроэлементов для сельскохозяйственной птицы / И.А. Егоров, В.П. Куренева, Н.Н. Глущенко, Л.Д. Фаткуллина, Ю.И. Фёдоров // Физиолого-биохимические основы повышения продуктивности сельскохозяйственной птицы: сб. науч. тр. Боровск, – 1985. – Т. 31. С. 80-88.

17. Егоров И.А. Итоги и перспективы исследований по кормлению птицы высокопродуктивных кроссов / И.А. Егоров // Сборник научных трудов ВНИТИП: сб. науч. трудов / Под ред. В.И. Фисинина. Сергиев Посад: ВНИТИП. – 2005. – С. 98-103.

18. Егоров И.А. Методические рекомендации по проведению научных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы / Разраб И.А. Егоров Т.М. Околелова В.И. Ермакова А.В. Езерская П.Н. Паньков Т.Н. Ленкова // под общей редакцией д-ра с.-х. наук, академика В.И. Фисинина и канд. биол. наук И.А. Егорова // ВНИТИП – Сергиев Посад: МНТЦ «Племптица». – 2019. – 24 с.

19. Егоров И.А. Новые тенденции в кормлении птицы / И. Егоров, Н. Селина // Комбикорма. – 2004. – № 6. – 5 с.

20. Егоров И.А. Современные подходы к кормлению птицы / И.А. Егоров // Птицеводство. – 2014. – №4. – С. 11-16.

21. Калашников А.П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А.П. Калашников, Н.И. Клейменов, В.Н. Баканов и др. // Справочное пособие. М. – 2003. – 396 с.

22. Каюмов А.Ф., Самоходов О.В., Тупиневич Г.С., Аллабердин У.Т., Зиякаева К.Р. Физиология системы пищеварения. — Уфа: ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, –2019. — 64 с.

23. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия / Учебное пособие. М.: Металлургия, – 1980. – 496 с.

24. Кондакова К.С., Япрынцева Е.В., Дроздова Е.А., Курилкина М.Я. Зависимость адгезивной активности микроорганизмов рубца и переваримости кормов от внесения минеральных добавок / // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 15. С. 67-70.

25. Кондакова, К.С. Количественная оценка адгезии бактерий рубцовой жидкости к поверхности растительных субстратов на модели рекомбинантного штамма *Escherichiacoli* K12 TG1 с клонированным lux-опероном *Photobacterium leiognathi* 54D10 / К.С. Кондакова, Е.В. Япрынцева, Е.А. Дроздова // Вестник мясного скотоводства. – 2012. – вып. 78, №4. - С. 82-85.

26. Коршунов Б.П. Энергоэффективные электротехнологии в сельском хозяйстве: анализ и перспективы. Всероссийская конференция. Институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). – 2015. – 1 (18) 12-7.

27. Котельникова, Н.Е. Модификация льняных материалов частицами меди / Н.Е. Котельникова, А.М. Михайлиди // Химия растительного сырья. – 2009. – № 3. – С. 43-48.
28. Курилкина М.Я. Влияние различных видов воздействия на физические и биологические свойства кормов с разной степенью минерализации / М.Я. Курилкина, С.А. Мирошников, Т.Н. Холодилина, А.С. Кузнецова // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. – № 6. С. 73-75.
29. Курилкина М.Я., Мирошников С.А., Холодилина Т.Н., Ваншин В.В. К пониманию действия высокодисперсных порошков металлов на биодоступность компонентов экструдатов / // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2010. – № 6. – С. 147-151.
30. Курилкина М.Я., Холодилина Т.Н. Эффективность использования микропорошков в составе экструдата при кормлении цыплят-бройлеров // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2011. – №4. С. 169-171.
31. Лебедев С. В. Биодоступность химических элементов из рационов с разным уровнем ОЭ / С.В. Лебедев, А. Гречушкин, Ш.Г. Рахматуллин, Г.К. Дускаев // Птицеводство. – 2008. – № 10. – С. 50-51.
32. Лебедев С.В. Микробиологические аспекты влияния НЧ Fe на организм крыс Wistar / С.В. Лебедев, О.В. Кван, И.А. Вершинина, А.М. Короткова // Вестник Воронежского государственного Университета инженерных технологий Вестник. – 2019. – Том. 81. – № 3.
33. Лебедев С.В. Минеральный статус организма животных на фоне различной нутриентной обеспеченности / С. В. Лебедев, Ш. Г. Рахматуллин, А. И. Гречушкин, Е.А. Сизова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6. – С.201- 203.
34. Манукян В.А. Применение ферментативного пробиотика в кормлении цыплят-бройлеров / В.А. Манукян, Э.Д. Джавадов, М.Е. Дмитриева, Г.Ю. Лаптев, И.Н. Никонов, Н.И. Новикова, Л.А. Ильина // Птица и птицепродукты. – 2013. – №5. – 022-024.
35. Манукян В.А., Байковская И.Ю. О балансе электролитов в комбикормах для бройлеров // Птицеводство. – 2018. – № 7. – С. 27-29.
36. Мирошников И.С., Холодилина Т.Н., Дускаев Г. К., Васильченко А.С. Физико-химические свойства и переваримость кормовых добавок, подвергнутых кавитационной обработке Вестник мясного скотоводства. – 2016. – 4(96) 131-136
37. Мирошников С.А., Сизова Е.А. Наноматериалы в животноводстве (обзор) // Вестник мясного скотоводства. 2017. № 3(99). С. 7-22.
38. Мирошников С.А. Продуктивное действие и переваримость кормов при использовании в кормлении птицы микрочастиц железа / Мирошников С. А. (и др.) //Животноводство и кормопроизводство. – 2018. – Т. 101. – №. 2. – С. 7-16.

39. Мирошников С.А. Новые подходы к созданию кормовых продуктов на основе поликомпонентных растительно-минеральных смесей, подвергнутых кавитационной обработке / С.А. Мирошников, Д.М. Муслимова, А.В. Быков, Ш.Г. Рахматуллин, Л.А. Быкова // Вестник мясного скотоводства. – 2012. – № 3(77). С. 7-11.
40. 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.
41. Мирошникова Е.П. Влияние комплекса ультрадисперсных металлов-микроэлементов и пробиотического препарата на обмен веществ и интерьерные особенности цыплят-бройлеров / Е.П. Мирошникова, Е.А. Русакова, О.В. Кван, Ш.Г. Рахматуллин // Животноводство и кормопроизводство. – 2020. – 103(1). – С. 33-46.
42. Мирошникова М.С. Расщепление биосубстратов в рубце. Микробные взаимодействия при деградации волокна (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. – 2021. – 104(1). – 109-118.
43. Нестеров Д.В. Влияние цинка на эффективность использования кормовых ферментных препаратов / Д.В. Нестеров, О.Ю. Сипайлова // Вестник ОГУ. – 2010. - № 6. – С. 156-159.
44. Околелова Т., Молоскин С., Грачев Д. Отруби как компонент кормосмеси для кур // Птицеводство. – 2000. – № 5. - С. 21-23.
45. Околелова Т.М., Маркелова Н.Н. О проблемах минерального питания современных высокопродуктивных кроссов кур // Птицеводство. – 2012. – № 4. – С. 26-28.
46. Попов В.В., Рыбина Е.Т. Метод определения переваримости корма «in vitro» // Животноводство. – 1983. – № 8. С. 37-39.
47. Рождественский В.В. Кавитация. Л.: Изд-во «Судостроение», 1977. 247 с.
48. Сизова Е.А. Источники поступления наноматериалов в окружающую среду / Сизова Е.А., Кожевникова Е.А., Леднева С.А. // Образование и наука в современных условиях. – 2016. – № 2-1(7). – С. 14-15.
49. Сизова Е.А. К разработке критериев безопасности наночастиц металлов при введении их в организм животных / Е.А., Сизова, Т.Н. Холодилина, С.А. Мирошников, В.С. Полякова // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 1. – С. 40-42.
50. Сизова Е.А., Мирошников С.А., Холодилина Т.Н. К разработке критериев безопасности наночастиц металлов при введении их в организм животных // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 1. С. 40-42.
51. Сизова Е.А., Яушева Е.В. Сравнительная продуктивность цыплят-бройлеров при инъекционном введении разноразмерных ультрадисперсных частиц железа // Животноводство и кормопроизводство. – 2019. – Т. 102. № 1. С. 6-21. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-6.

52. Стребков Д. С., Коршунов Б. П. и Тихомиров А.В., 2003 г. Перспективы развития энергоэффективных электротехнологий в сельскохозяйственном производстве. Энергоснабжение и энергосбережение в сельском хозяйстве: сб. тр. 3-го междунар. науч.-практ. конф. научно-техническая конференция VIESH 1 291-6 Конференция по инновациям в сельском хозяйстве и развитию сельских районов Конференция ВГД. Серия: Наука о Земле и окружающей среде 341. – 2019. – 012166 DOI издательства ВГД:10.1088/1755-1315/341/1/012166 5.
53. Топурия Л.Ю., Топурия Г.М. Состояние обмена веществ у коров на фоне применения препаратов природного происхождения // Ветеринария сельскохозяйственных животных. – 2014. – 8. – С. 14-18.
54. Фазилова, С.А. Структурные исследования полисахаридов и наноконпозиций на их основе / С.А. Фазилова, С.М. Югай, С.Ш. Рашидова // Химия растительного сырья. – 2010. – № 1. – С. 13-19.
55. Фисинин В. И. и др. Пробиотики комплексного действия в комбикормах для цыплят-бройлеров // Научные основы производства и обеспечения качества биологических препаратов для АПК. – 2014. – С. 299-304.
56. Фисинин В.И. Методические указания по оптимизации рецептов комбикормов для сельскохозяйственной птицы. / В.И. Фисинин, И.А. Егоров, Т.Н. Ленкова, Т.М. Околелова, Г.В. Игнатова, А.Н. Шевяков и др. ВНИТИП – М., 2009 – 80 с.
57. Фисинин, В.И. Кормление сельскохозяйственной птицы / В.И. Фисинин, И.А. Егоров, Т.М. Околелова, Ш.А. Имангулов // ВНИТИП – Сергиев Посад. – 2010. – 375 с.
58. Фисинин, В.И. Программа кормления от ВНИТИП / В.И. Фисинин // Птицеводство. – 2011. – № 6. – С. 21-24.
59. Фисинин, В.И. Современные подходы к кормлению высокопродуктивной птицы / В.И. Фисинин, И.А. Егоров // Птица и птицеводство. – 2015. – № 3. – С. 27-29.
60. Холодилина Т.Н., Васильченко А.С., Кондакова К.С. Исследование влияния физических параметров субстрата на адгезию микроорганизмов методом атомно-силовой микроскопии. Вестник Оренбургского государственного университета. –2013. – № 10 (159). С. 152-155.
61. Швенке М.А., Штумпф С., Хеппенер С. и Шуберт Ю.С. Отдельно стоящая углеродная нановолоконная пленка, изготовленная методом быстрого синтеза с использованием микроволнового излучения Adv Function Mater 24, – 2014. – 1602– 8.
62. Юсупова Г.Г., Цугленок Г.И. Влияние СВЧ-энергии на физико-химические показатели качества зерна // Материалы XLIII научно-технической конференции. Челябинск: ЧГАУ, – 2004. – С. 290-293.
63. Abbasi M. Is dietary iron requirement of broiler breeder hens at the late stage of production cycle influenced by phytase supplementation? / M. Abbasi, M.

Zaghari, M. Ganjkanlo, S. Khalaji // J. Appl. Anim. Res. – 2015. – 43. – pp. 166-176.

64. Abbasi M. Zinc requirements of Japanese quails (*Coturnix coturnix japonica*) by assessing dose-evaluating response of zinc oxide nano-particle supplementation / M. Abbasi, B. Dastar, N. Afzali, M. S. Shargh, S. R. Hashemi // Poultry Science Journal. – 2017. – T. 5. – №. 2. – C. 131-143.

65. Abbaspour N., Hurrell R., Kelishad R. Review on iron and its importance for human health. J. Res. Med. Sci. – 2014. – 19. – pp. 164-174.

66. Abd El-Ghany W. A. Nanotechnology and its considerations in poultry field: an overview / W. A. Abd El-Ghany // Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. – 2019. – T. 70. – №. 3. – C. 1611-1616.

67. Abdelsalam, M. Effect of silver nanoparticle administration on productive performance, blood parameters, antioxidative status, and silver residues in growing rabbits under hot climate / M. Abdelsalam (et al.) // Animals. – 2019. – T. 9. – №. 10. – C. 845.

68. Abdollahi M. Performance, rumen fermentation, blood minerals, leukocyte and antioxidant capacity of young Holstein calves receiving high-surface ZnO instead of common ZnO / M. Abdollahi, J. Rezaei, H. Fazaeli // Archives of animal nutrition. – 2020. – T. 74. – №. 3. – C. 189-205.

69. Abedini M. Effects of zinc oxide nanoparticles on the egg quality, immune response, zinc retention, and blood parameters of laying hens in the late phase of production / M. Abedini, F. Shariatmadari, M. A. Karimi Torshizi, H. Ahmadi // Journal of animal physiology and animal nutrition. – 2018. – T. 102. – №. 3. – C. 736-745.

70. Adewuyi Y.G. Sonochemistry in environmental remediation. 1. Combinative and hybrid sonophotochemical oxidation processes for the treatment of pollutants in water // Environ. Sci. Technol. – 2005. – 39. – 3409–3420.

71. Akhavan-Salamat H., Ghasemi H. A. Effect of different sources and contents of zinc on growth performance, carcass characteristics, humoral immunity and antioxidant status of broiler chickens exposed to high environmental temperatures // Livestock science. – 2019. – T. 223. – C. 76-83.

72. Alagawany M. Use of chemical nano-selenium as an antibacterial and antifungal agent in quail diets and its effect on growth, carcasses, antioxidant, immunity and caecal microbes / M. Alagawany (et al.) // Animals. – 2021. – T. 11. – №. 11. – C. 3027.

73. Alarcon-Rojo D. Ultrasound Application to Improve Meat Quality [Internet] / D. Alarcon-Rojo, E. Peña-González, I. García- Galicia, L. Carrillo-López, M. Huerta-Jiménez, R. Reyes-Villagrana et al // Descriptive Food Science. IntechOpen. – 2018.

74. Al-Hilphy A. Ultrasound applications in poultry meat processing: A systematic review: Ultrasound applications in poultry meat / A. Al-Hilphy, A. Altemimi, H. Mehdi, U. Anand, P. Delgado // Journal of Food Science. – 2020. – 85. 10.1111/1750-3841.15135.

75. Aminullah, N. Performance of Swarnadhara breeder hens supplemented with reduced levels of different copper forms / N. Aminullah, T. M. Prabhu, J. Naik, B. N. Suresh, H. C. Indresh // *Veterinary World*. – 2021. – T. 14. – №. 5. – C. 1371.
76. Anwar M. I. Nutritional and immunological effects of nano-particles in commercial poultry birds / M. I. Anwar, M. M. Awais, M. Akhtar, M. T. Navid, F. Muhammad // *World's Poultry Science Journal*. – 2019. – T. 75. – №. 2. – C. 261-272.
77. Arak H. The efficiency of synthetic polymers to ameliorate the adverse effects of Aflatoxin on plasma biochemistry, immune responses, and hepatic genes expression in ducklings / H. Arak, M.A. Karimi-Torshizi, M. Hedayati, S. Rahimi // *Toxicon*. – 2020. – 187. – 136–143.
78. Ashmead H. D., Graff D. J. Placental transfer of chelated iron. *Proceedings of the International Pig, Veterinary Society Congress, Mexico*. – 1982. – pp. 207. Bai Ding-Ping Theranostics Aspects of Various Nanoparticles in Veterinary Medicine / Ding-Ping Bai, Xin-Yu Lin, Yi-Fan Huang, Xi-Feng Zhang // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2018. – 19. 3299. 10.3390/ijms19113299.
79. Ashokkumar M. Applications of ultrasound in food and bioprocessing. *Ultrasonics sonochemistry*. – 2014. – 25. 10.1016/j.ultsonch.2014.08.012.
80. Ashokkumar M. Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality / M. Ashokkumar, D. Sunartio, S.E. Kentish, R. Mawson, L. Simons, K. Vilku, C. Versteeg // *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* – 2008. – 9. – 155–160.
81. Ashokkumar M., Yusof N.S.M. Ultrasound-induced formation of high and low viscoelastic nanostructures of micelles // *Soft Matter*. – 2013. – 9. – 1997–2002.
82. Baek M. Pharmacokinetics, tissue distribution, and excretion of zinc oxide nanoparticles / M. Baek, H.E. Chung, J. Yu, J.A. Lee, T.H. Kim, J.M. Oh, W.J. Lee, S.M. Paek, J.K. Lee, J. Jeong, J.H. Choy, S.J. Choi // *International Journal of Nanomedicine*. 2012. № 7. P. 3081-3097.
83. Bai S. Effects of high dietary iron on the lipid metabolism in the liver and adipose tissue of male broiler chickens / S. Bai, W. Luo, H. Liu, K. Zhang, J. Wang, X. Ding, Q. Zeng et al. // *Anim. Feed Sci. Tech.* – 2021. – 282. – 115131.
84. Bai S. Organic iron absorption and expression of related transporters in the small intestine of broilers / S. Bai, S. Cao, X. Ma, X. Li, X. Liao, L. Zhang, M. Zhang, R. Zhang, S. Hou, X. Luo // *Poult. Sci.* – 2021. – 100. – 101182.
85. Bąkowski M. Silver and zinc nanoparticles in animal nutrition—a review / M. Bąkowski, B. Kiczorowska, W. Samolińska, R. Klebaniuk, A. Lipiec // *Annals of Animal Science*. – 2018. – T. 18. – №. 4. – C. 879-898.
86. Balachandran S. Ultrasonic enhancement of the supercritical extraction from ginger / S. Balachandran, S.E. Kentish, R. Mawson, M. Ashokkumar // *Ultrason. Sonochem.* – 2006. – 13. – 471–479.

87. Barati M.; Chamani, M.; Mousavi, S.N.; Hosein, S.A.; Ebrahimi, M.T.A. Effects of biological and mineral compounds in aflatoxincontaminated diets on blood parameters and immune response of broiler chickens /M. Barati, M. Chamani, S.N. Mousavi, S.A. Hosein, M.T.A. Ebrahimi // J. Appl. Anim. Res. – 2018. – 46. – 707–713.
88. Bertechini A. Performance and egg quality of laying hens fed with dietary levels of digestible lysine and threonine / A. Bertechini, E. J. Fassani, J. A. Gonçalves de Brito and P. R. Barrios // Revista Brasileira de Zootecnia. – 2012. – 41. – pp. 624–629.
89. Bess F. Dietary iron effects on broiler breeder performance and egg iron contents / F. Bess, S. L. Vieira, A. Favero, R. A. Cruz, P. C. Nascimento // Animal feed science and technology. – 2012. – T. 178. – №. 1-2. – C. 67-73.
90. Briars R., Paniwnyk L. Effect of ultrasound on the extraction of artemisininfrom *Artemisia annua* extraction // Ind. Crops Prod. – 2013. – 42. – 595–600.
91. Bronstein L. M. Influence of Iron Oleate Complex Structure on Iron Oxide Nanoparticle Formation / L.M. Bronstein, X. Huang, J. Retrum, A. Schmucker, M. Pink, B.D. Stein, B. Dragnea // Chem Materials. – 2007. – 19(15). – pp. 3624-3632.
92. Bykov A.V. Prospects of applying sunflower sludge after cavitation processing in poultry breeding / A.V. Bykov, O.V. Kvan, G. Duskaev, V. Popov, G. Sidorenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 341. – 012060.
93. Cai M., Zhao S., Liang H. Mechanisms for the enhancement of ultrafiltrationand membrane cleaning by different ultrasonic frequencies, Desalination. – 2010. – 263. – 133–138.
94. Cao J. Effect of dietary iron concentration, age, and length of iron feeding on feed intake and tissue iron concentration of broiler chicks for use as a bioassay of supplemental iron sources / J. Cao, X.G. Luo, P.R. Henry, C.B. Ammerman, R.C. Littell, R.D. Miles // Poult. Sci. – 1996. – 75. – 495–504.
95. Chen H. Nanotechnology in nutraceuticals and functional foods / H. Chen, J. Weiss, F. Shahidi // Food technology (Chicago). – 2006. – T. 60. – №. 3. – C. 30-36.
96. Chen L., Neethirajan S. A homogenous fluorescence quenching based assay for specific and sensitive detection of influenza virus A hemagglutinin antigen / L. Chen, S. Neethirajan // Sensors. – 2015. – T. 15. – №. 4. – C. 8852-8865.
97. Chen X., Yu C., Kang R., Tang D. Iron metabolism in ferroptosis. Front. Cell Dev. Biol. – 2020. – 8. – 590226.
98. Cho W.S. Differential proinflammatory effects of metal oxide nanoparticles and their soluble ions in vitro and in vivo; zinc and copper nanoparticles, but not their ions, recruit eosinophils into the lungs / W.S. Cho, R. Duffin, C.A. Poland, A. Duschl, G.J. Oostingh, W. MacNee, M. Bradley, I.L.

Megson, K. Donaldson // *Nanotoxicology*. 2012. № 6(1). P. 22-35. doi: 10.3109 / 17435390.2011.552810.

99. Choct M., Kocher A., Waters D.L.E., Pettersson D., Ross G. A comparison of three xylanases on the nutritive value of two wheats for broiler chickens. *Bri. J. Nutr.* – 2004. – 92: 53-61.

100. Chowdhury S. D. Responses of broiler chickens to organic copper fed in the form of copper-methionine chelate / S.D. Chowdhury, I. K. Paik, H. Namkung, H. S. Lim // *Anim Feed Sci Technol.* – 2004. – 115. – pp. 281–293.

101. Cobb-Vantress Breeder Management Supplement, Cobb Vantress Inc., Siloam Springs, AR. – 2013.

102. Conrad M.E. Separate pathways for cellular uptake of ferric and ferrous iron / M.E. Conrad, J.N. Umbreit, E.G. Moore, L.N. Hainsworth, M. Porubcin, M.J. Simovich, M.T. Nakada, K. Dolan, M.D. Garik // *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol.* – 2000. – 279. – pp. 767-774.

103. Costa H.D.A. Performance and meat quality of broiler chickens reared on two different litter materials and at two stocking densities / H.D.A. Costa, H.D.A., R.G.M.V. Vaz, M.C.D. Silva, K.F. Rodrigues, L.F. Sousa, L.D.S. Bezerra, M.D.C. Ribeiro, A.F.C. Barbosa, J.S.D. Almeida, M.F.D. Oliveira // *Br. Poult. Sci.* – 2021. – 62. – 396–403.

104. Dawood M. A. Selenium nanoparticles as a natural antioxidant and metabolic regulator in aquaculture: A review / Dawood M. A. (et al.) // *Antioxidants*. – 2021. – T. 10. – №. 9. – C. 1364.

105. Dmoch M., Polonis A. Effect of vitamin C with rutin and herbal mixture supplements on chosen hematological and biochemical blood parameters and production results of slaughter turkeys // *Ann. UMCS Zootech.* – 2011. – 29. – 32–43.

106. Drakopoulou S. Ultrasound-induced inactivation of gram-negative and gram-positive bacteria in secondary treated municipal wastewater / S. Drakopoulou, S. Terzakis, M.S. Fountoulakis, D. Mantzavinos, T. Manios // *Ultrason. Sonochem.* – 2009. – 16. – 629–634.

107. Dupic F. Duodenal mRNA expression of iron related genes in response to iron loading and iron deficiency in four strains of mice / F. Dupic, S. Fruchon, M. Bensaid, O. Loreal, P. Brissot, N. Borot, M.P. Poth, H. Coppin // *Gut*. – 2002. – 51. – 648–653.

108. EFSA Panel. Guidance on the assessment of the safety of feed additives for the target species. *EFSA J.* – 2017. –15, e05021.

109. EFSA Panel. Safety and efficacy of iron chelates of lysine and glutamic acid as feed additive for all animal species. *EFSA J.* – 2019. – 17. – 5792.

110. Egorov I.A., Lenkova T.N., Manukyan V.A. Instructions on the use of non-traditional feed in poultry diets. *Sergiev Posad*. – 2016. – 59p.

111. El-Maddawy Z. K. Use of zinc oxide nanoparticles as anticoccidial agents in broiler chickens along with its impact on growth performance, antioxidant status, and hematobiochemical profile / Z. K. El-Maddawy (et al.) // *Life*. – 2022. – T. 12. – №. 1. – C. 74.

112. Eskandani M. Effects of copper nanoparticles on growth performance, carcass characteristics, immunity, and meat quality of broiler chickens / M. Eskandani, H. Janmohammadi, S. A. Mirghelenj, M. Ebrahimi, S. Kalanaky // *Iranian Journal of Applied Animal Science*. – 2021. – T. 11. – №. 1. – C. 135-146.
113. European Food Safety Authority (EFSA) Safety and efficacy of iron compounds (E1) as feed additives for all species: ferric oxide based on a dossier submitted by Poortershaven Industriële Mineralen B.V EFSA Journal, 14 (2016), p. 264508, doi:10.2903/j.efsa.2016.4508.
114. Feng H., Weiss J., Barbosa-Cánovas G. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, Springer, New York. – 2011. – pp. 345–368.
115. Fisinin V.I., Egorova I.A., Lenkova T.N. The use of unconventional feed in the diet of poultry // *Poultry and poultry products*. – 2016. – 4. – pp 14-17.
116. Fu X.S. Effect of new complex amino acid chelated iron on broiler performance, blood index and tissue iron content / X.S. Fu, M.M. Han, Y.Y. Dong, Z.Q. Miao, J.Z. Zhang, Y. Yang, H.F. Li, Y. Feng, Q.Y. Wei, B.K. Zhang et al. // *J. China Agric. Univ.* – 2021. – 26. – 126–138.
117. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal Necesidades nutricionales para avicultura: Pollos de carne y aves de puesta, FEDNA, Madrid, Spain. – 2008.
118. Galaris D., Barbouti A., Pantopoulos K. Iron homeostasis and oxidative stress: An intimate relationship. *Biochim. Biophys. Acta Mol. Cell Res.* – 2019. – 1866. – 118535.
119. Gangadoo S. Nanoparticles of selenium as high bioavailable and non-toxic supplement alternatives for broiler chickens / S. Gangadoo, I. Dinev, N. L. Willso, R. J. Moore, J. Chapman, D. Stanley // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – T. 27. – №. 14. – C. 16159-16166.
120. Gasgnie M., Beaury L., Derouet J. Ultrasound effects on metallic (Fe and Cr); iron sesquioxides (α -, γ -Fe₂O₃); calcite; copper, lead and manganese oxides as powders. *Ultrasonics sonochemistry*. – 2000, 7, 25-33. 10.1016/S1350-4177(99)00024-3.
121. Gholampour F., Saki N. Hepatic and renal protective effects of quercetin in ferrous sulfate-induced toxicity // *Gen. Physiol. Biophys.* – 2019. – 38. – 27–38.
122. Gioacchino M. *Health risk Evaluation of nanoparticles of metals* / M. Di Gioacchino, N. Verna, R. Gornati, E. Sabbioni, G. Bernardini // *Nanotoxicology: from in Vivo and in Vitro models to health risks*. John Wiley & Sons, Ltd; Chichester, United Kingdom. 2009. P. 519-542.
123. Gómez M. Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality / M. Gómez, S. Jiménez, E. Ruiz, B. Oliete // *LWT Food Sci. Technol.* – 2011. – 44. – 2231–2237.
124. Gornati R. Tolerance to the nanoparticles zerovalent Fe, Co and Ni, evaluated on the cell lines SKOV-3 and U87 / R. Gornati, E. Pedretti, F. Rossi, F. Cappellini, M. Zanella, I. Oliveto, E. Sabbioni, G. Bernardini // *Journal of Applied Toxicology*. 2016. V 36. Issue 3. P. 385-393. doi: 10.1002 / jat.3220.

125. Gou Z. Y. Effects of oxidative stress induced by high dosage of dietary iron ingested on intestinal damage and caecal microbiota in Chinese Yellow broilers / Gou Z. Y. (et al.) // *Journal of animal physiology and animal nutrition*. – 2018. – T. 102. – №. 4. – C. 924-932.
126. Gou Z.Y. Effects of oxidative stress induced by high dosage of dietary iron ingested on intestinal damage and caecal microbiota in Chinese Yellow broilers / Z.Y. Gou, L. Li, Q.L. Fan, X.J. Lin, Z.Y. Jiang et al.// *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* – 2018. – 102. – 924–932.
127. Grotto H.Z.W. Metabolismo do ferro: Uma revisão sobre os principais mecanismos envolvidos em sua homeostase // *Rev. Bras. Hematol. Hemoter.* – 2008. – 30. – pp. 390-397.
128. Guo W. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating / W. Guo, S. Wang, G. Tiwari, J.A. Johnson, J. Tang // *LWT Food Sci Technol.* – 2010. – 43(2):193–201.
129. Ha K.H. Clinical characteristics and progression of liver abscess caused by toxocara / K.H. Ha, J.E. Song, B.S. Kim, C.H. Lee // *World J. Hepatol.* – 2016. – 8. – 757–761.
130. Hallberg L. Bioavailability of dietary iron in man / L. Hallberg // *Annual review of nutrition*. – 1981. – T. 1. – №. 1. – C. 123-147.
131. Han M. High Dietary Organic Iron Supplementation Decreases Growth Performance and Induces Oxidative Stress in Broilers / M. Han, X. Fu, X. Xin, Ya. Dong, Zh. Miao, J. Li // *Animals*. – 2022. – 12. 1604. 10.3390/ani12131604.
132. Hansen S.L. High dietary iron reduces transporters involved in iron and manganese metabolism and increases intestinal permeability in calves / S.L. Hansen, M.S. Ashwell, A.J. Moeser, R.S. Fry, M.D. Knutson, J.W. Spears // *J. Dairy Sci.* – 2010. – 93. – 656–665.
133. Hansen S.L. Iron transporters are differentially regulated by dietary iron, and modifications are associated with changes in manganese metabolism in young pigs / S.L. Hansen, N. Trakooljul, H.C. Liu, A.J. Moeser, J.W. Spears // *J. Nutr.* – 2009. – 139. – 1474–1479.
134. Henry P., Miller E. Iron bioavailability. C.B. Ammerman, D.H. Baker, A.J. Lewis (Eds.), *Bioavailability of nutrients for animals: Amino acids, minerals and vitamins*, Academic Press, New York, USA. – 1995. – pp. 169-199.
135. Hertrampf E., Olivares M. Iron amino acid chelates // *Int. J. Vitam. Nutr. Res.* – 2004. – 74, 435–443.
136. Hidayat C. Supplementation of dietary nano Zn-phytogenic on performance, antioxidant activity, and population of intestinal pathogenic bacteria in broiler chickens / C. Hidayat, S. Sumiati, A. Jayanegara, E. Wina // *Tropical Animal Science Journal*. – 2021. – T. 44. – №. 1. – C. 90-99.
137. Hokamp J.A., Nabity M.B. Renal biomarkers in domestic species // *Vet. Clin. Pathol.* – 2016. – 45. – 28–56.
138. Huixia W, Simin Q, Sanchun Ch, Xiaoming L, Junbin Ju and Gongfu Y 2018 Synthesis of macroporous magnetic Fe₃O₄ microparticles using a new

method of assembling hollow spheres with open pores using organic matter Materials (Basel) September 11(9) 1508.

139. Ige A.O. Pathophysiology of iron overload-induced renal injury and dysfunction: Roles of renal oxidative stress and systemic inflammatory mediators / A.O. Ige, F.A. Ongele, B.O. Adele, I.E. Emediong, A.O. Odetola, E.O. Adewoye // *Pathophysiology*. – 2019. – 26, 175–180.

140. Jain T.K. Biodistribution, clearance, and biocompatibility of iron oxide magnetic nanoparticles in rats / T.K. Jain, M.K. Reddy, M.A. Morales, D.L. Leslie-Pelecky, V. Labhasetwar // *Molecular Pharmaceutics*. 2008. № 5(2). P. 316-327.

141. Jarosz Ł. Effects of dietary supplementation of iron as sulphates or glycine chelates on the productive performance and concentrations of acute-phase proteins and iron in the serum and liver tissues of broiler chickens / Ł. Jarosz, A. Marek, Z. Grządziński, M. Kwiecień // *Ann. Anim. Sci.* 2021, 21, 267–290.

142. Jiao S. Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments / S. Jiao, J. Johnson, J. Tang, G. Tiwari, S. Wang // *Biosyst. Eng.* – 2011. – 108(3):280–91.

143. Joshua P. P. Effect of in ovo supplementation of nano forms of zinc, copper, and selenium on post-hatch performance of broiler chicken / P. P. Joshua, C. Valli, V. Balakrishnan // *Veterinary world*. – 2016. – T. 9. – №. 3. – C. 287.

144. Jóźwik A. The effect of different levels of Cu, Zn and Mn nanoparticles in hen turkey diet on the activity of aminopeptidases / A. Jóźwik (et al.) // *Molecules*. – 2018. – T. 23. – №. 5. – C. 1150.

145. Kaufmann B., Christen P. Recent extraction techniques for natural products: extraction with microwaves and extraction solvent under pressure // *Phytochemical Analysis*. 2002. № 13. P. 105-113. doi: 10.1002/pca.631.

146. Kaviani S. A combined molecular dynamics and quantum mechanics study on the interaction of Fe³⁺ and human serum albumin relevant to iron overload disease / S. Kaviani, M. Izadyar, M. Khavani, M.R. Housaindokht // *J. Mol. Liq.* – 2020. – 317. – 113933.

147. Kentish S.E. The use of ultrasonics for nano-emulsion preparation / S.E. Kentish, T. Wooster, M. Ashokkumar, S. Balachandran, R. Mawson, L. Simons // *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* – 2008. – 9. – 170–175.

148. Khanpit V.V., Tajane S.P., Mandavgane S.A. Extrusion for soluble dietary fiber concentrate: Critical overview on effect of process parameters on physicochemical, nutritional, and biological properties. *Food Res. Int.* – 2022. – 1–22.

149. Khattak F. TYPLEX® Chelate, a novel feed additive, inhibits *Campylobacter jejuni* biofilm formation and cecal colonization in broiler chickens / F. Khattak, V. Paschalis, M. Green, J. G. M. Houdijk, P. Sultanas, J. Mahdavi // *Poultry Science*. – 2018. – T. 97. – №. 4. – C. 1391-1399.

150. Kociova S. Zinc phosphate-based nanoparticles as alternatives to zinc oxide in diet of weaned piglets / Kociova S. et al. // *Journal of animal science and biotechnology*. – 2020. – T. 11. – №. 1. – C. 1-16.

151. Kohgo Y. Body iron metabolism and pathophysiology of iron overload / Y. Kohgo, K. Ikuta, T. Ohtake, Y. Torimoto, J. Kato // *Int. J. Hematol.* – 2008. – 88, 7–15.
152. Kojouri G. The effects of selenium nanoparticles (SeNPs) on oxidant and antioxidant activities and neonatal lamb weight gain pattern / G. Kojouri, F. Arbabi, A. Mohebbi // *Comparative Clinical Pathology*. 2020. – T. 29. – №. 2. – C. 369-374.
153. Konashi S., Takahashi K., Akiba Y. Effects of dietary essential amino acid deficiencies on immunological variables in broiler chickens // *Br. J. Nutr.* – 2000. – 83. – 449–456.
154. Kovalenko L. V., Folmanis G. E. *Biologicheski aktivnye nanoporoshki zheleza (Biologically Active Iron Nanopowders)*, Moscow: Nauka. – 2006.
155. Kriseldi R. Influence of exogenous phytase supplementation on phytate degradation, plasma inositol, alkaline phosphatase, and glucose concentrations of broilers at 28 days of age / R. Kriseldi, J.A. Johnson, C.L. Walk, M.R. Bedford, W.A. Dozier // *Poult. Sci.* – 2021. – 100. – 224–234.
156. Kumar I. Bhattacharya J. Assessment of the role of silver nanoparticles in reducing poultry mortality, risk and economic benefits // *Applied Nanoscience*. – 2019. – T. 9. – №. 6. – C. 1293-1307.
157. Kumar P. Dietary glutamic acid, obesity, and depressive symptoms in patients with schizophrenia / P. Kumar, A.Z. Kraal, A.M. Prawdzik, A.E. Ringold, V. Ellingrod // *Front. Psychiatry*. – 2021. – 11. – 620097.
158. Larbier M., Leclercq B. *Nutrition et alimentation des volailles*. INRA Editions Versailles, Paris, France. – 1992. – 355 pp.
159. Lee In-Chul Comparative evaluation of the toxicity and biodistribution in rats after subchronic oral exposure of copper nanoparticles and microparticles / In-Chul Lee, Je-Won Ko, Sung-Hyun Park, Na-Rae Shin, In-Sik Shin, Changjong Moon, Je-Hyun Kim, Young-Chan Kim, Jong-Chong Kim // *Part of the toxic products*. 2016. № 13. P. 56-73. doi: 10.1186 / s12989-016-0169-x.
160. Lenkova T.N., Egorova T.A., Sysoeva I.G. The productivity of broilers that received zeolites in compound feeds // *Poultry farming*. – 2019. – 5. – 26-31.
161. Leong T.S.H. Minimising oil droplets size using ultrasonic emulsification / T.S.H. Leong, J. Wooster, S.E. Kentish, M. Ashokkumar // *Ultrason. Sonochem.* – 2009. – 16. – pp. 721–727.
162. Leong W. Iron supplementation during infancy-effects on expression of iron transporters, iron absorption, and iron utilization in rat pups / W. Leong, C.L. Bowlus, J. Tallkvist, B. Lönnerdal // *Am. J. Clin. Nutr.* – 2003. – 78. – pp. 1202-1211.
163. Li C.H. Organ biodistribution, clearance, and genotoxicity of orally administered zinc oxide nanoparticles in mice / C.H. Li, C.C. Shen, Y.W. Cheng, S.H. Huang, C.C. Wu, C.C. Kao, J.W. Liao, J.J. Kang // *Nanotoxicology*. 2012. № 6(7). P. 746-756.
164. Li R. Extrusion Modification of Wheat Bran and Its Effects on Structural and Rheological Properties of Wheat Flour Dough / R. Li, Ch. Wang, Y.

Wang, X. Xie, W. Sui, R. Liu et al. // Foods. – 2023. – 12. 1813. 10.3390/foods12091813.

165. Liao X. Determination of dietary iron requirements by full expression of iron-containing cytochrome c oxidase in the heart of broilers from 22 to 42 d of age / X. Liao, C. Ma, L. Lu, L. Zhang, X. Luo // Br. J. Nutr. – 2017. – 118. – 493–499.

166. Lieu P. T. The roles of iron in health and disease / P. T. Lieu, M. Heiskala, P. A. Peterson, Y. Yang // Molecular aspects of medicine. – 2001. – T. 22. – №. 1-2. – C. 1-87.

167. Lin X. Effects of dietary iron level on growth performance, immune organ indices and meat quality in Chinese Yellow broilers / X. Lin, Z. Gou, Y. Wang, L. Li, Q. Fan, F. Ding, C. Zheng, S. Jiang // Animals. – 2020. – 10. – 670.

168. Liu Z. Effects of decabrominated diphenyl ether exposure on growth, meat characteristics and blood profiles in broilers / Z. Liu, H. Lei, R. Tang, J. Yang, X. Guo, R. Huang, Q. Rao, L. Cheng, Z. Zhao // Animals. – 2021. – 11. – 565.

169. Logié N. How does temperature govern mechanisms of starch changes during extrusion / N. Logié, G. Della Valle, A. Rolland-Sabaté, N. Descamps, J. Soulestin // Carbohydr. Polym. – 2018. – 184. – 57–65.

170. Lu L. Organic iron absorption by in situ ligated jejunal and ileal loops of broilers / L. Lu, L.Y. Zhang, X.F. Li, X.D. Liao, L.Y. Zhang, X.G. Luo // J. Anim. Sci. – 2018. – 96. – 5198–5208.

171. Lu X., Wang C., Liu B. The role of Cu/Zn-SOD and Mn-SOD in the immune response to oxidative stress and pathogen challenge in the clam *Meretrix*. Fish Shellfish Immunol. – 2015. – 42. – 58–65.

172. Lu Y., Riyanto N., Weavers L. Sonolysis of synthetic sediment particles: Particle characteristics affecting particle dissolution and size reduction. Ultrasonics sonochemistry. – 2002. – 9. – 181-8.

173. Luo Q. Iron overload resulting from the chronic oral administration of ferric citrate impairs intestinal immune and barrier in mice / Q. Luo, C. Lao, C. Huang, Y. Xia, W. Ma, W. Liu, Z. Chen // Biol. Trace Elem. Res. – 2021. – 199. – 1027–1036.

174. Ma X. Determination of dietary iron requirements by full expression of iron-containing enzymes in various tissues of broilers / X. Ma, X. Liao, L. Lu, S. Li, L. Zhang, X. Luo // J. Nutr. – 2016. – 146. – 2267–2273.

175. Maatjens C.M. Temperature during the last week of incubation. I. Effects on hatching pattern and broiler chicken embryonic organ development / C.M. Maatjens, I.A.M. van Roovert-Reijrink, B. Engel, C.W. van der Pol, B. Kemp, H. van den Brand // Poult. Sci. – 2016. – 95. – 956–965.

176. Mackenzie B., Garrick M.D. Iron imports. II. Iron uptake at the apical membrane in the intestine // Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol. – 2005. – 289. – pp. 981-986.

177. Mahmoud U. T. Zinc oxide nanoparticles prevent multidrug resistant *Staphylococcus*-induced footpad dermatitis in broilers / Mahmoud U. T. (et al.) // *Avian Pathology*. – 2021. – T. 50. – №. 3. – C. 214-226.
178. Mania C.M. Ultrastructural features of multipotent mesenchymal stromal cells obtained from adipose tissue of a person / C.M. Mania, M.C. Rusy, K. Lee, V.M. Manoiu, L. Moldovan, A.M. Jianu // *Romanian Journal of Morphology and Embryology*. 2014. № 55. P. 1363-1369.
179. Manocha S. Nanotechnology: An approach to overcome bioavailability challenges of nutraceuticals / S. Manocha, S. Dhiman, A. S. Grewal, K. Guarve // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – 2022. – C. 103418.
180. Marques V.B. Chronic iron overload intensifies atherosclerosis in apolipoprotein E deficient mice: Role of oxidative stress and endothelial dysfunction / V.B. Marques, M.A.S. Leal, J.G.A. Mageski, H.G. Fidelis, B.V. Nogueira et al. // *Life Sci*. – 2019. – 233. – 116702.
181. Mason T.J., Peters D. *Practical Sonochemistry, Power Ultrasound Uses and Applications*, second ed. // Ellis Horwood Publishers, Chichester. – 2002.
182. Matuszewski A. Calcium and phosphorus and their nanoparticle forms in poultry nutrition / A. Matuszewski, M. Łukasiewicz, J. Niemiec // *World's Poultry Science Journal*. – 2020. – T. 76. – №. 2. – C. 328-345.
183. Mechem D.K., Olcott H.S. Phosvitin, the principal phosphoprotein of egg yolk // *J. Am. Chem. Soc.* – 1949. – 71. – pp. 3670-3679.
184. Menis-Henrique M.E.C., Scarton M., Piran M.V.F., Clerici M.T.P.S. Cereal fiber: Extrusion modifications for food industry. *Curr.Opin. Food Sci.* – 2020. – 33. – 141-148.
185. Min X. Ultrahigh reactivity provokes nanotoxicity: explanation of oral toxicity of nanoparticles of copper / X. Min, H. Chen, G.M. Xing, X. Yuan, Jia. Chen, F. Zhao, C.C. Zhang, Y. L. Zhao // *Toni collette*. 2007. № 175(1-3). P. 102-110. doi: 10.1016 / j. toxlet. 2007.09.015.
186. Miroshnikov S. A. Comparative assessment of effect of copper nano- and microparticles in chicken / S. A. Miroshnikov, E. V. Yausheva, E. A. Sizova, E. P. Miroshnikova, V. I. Levahin // *Oriental Journal of Chemistry*. – 2015. – T. 31. – №. 4. – C. 2327.
187. Mohamad Aslam F. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice / F. Mohamad Aslam, David M. Frazer, Nuno Faria, Sylvaine F. A. Bruggraber, Sarah J. Wilkins, Cornel Mirciov, Jonathan J. Powell, Greg J. Anderson and Dora I. A. Pereira. // *The FASEB Journal*. 2014. № 28(8). P. 3671-3678.
188. Mohan P. Mala R. Comparative antibacterial activity of magnetic iron oxide nanoparticles synthesized by biological and chemical methods against poultry feed pathogens // *Materials Research Express*. – 2019. – T. 6. – №. 11. – C. 115077.
189. Mohapatra P. Effects of dietary nano-selenium on tissue selenium deposition, antioxidant status and immune functions in layer chicks / Mohapatra P.

(et al.) // International Journal of Pharmacology. – 2014. – T. 10. – №. 3. – C. 160-167.

190. Moorthy M., Ravi S., Ravikuma M., Viswanathan K., Edwin S. Ginger, Pepper and Curry Leaf Powder as Feed Additives in Broiler Diet. *Int. J. Poult. Sci.* 2009; 8:779–782. doi: 10.3923/ijps.2009.779.782

191. Moorthy M., Ravi S., Ravikuma M., Viswanathan K., Edwin S. Ginger, Pepper and Curry Leaf Powder as Feed Additives in Broiler Diet. *Int. J. Poult. Sci.* 2009;8:779–782. doi: 10.3923/ijps.2009.779.782

192. Morck T.A., Austic R.E. Iron requirements of white leghorn hens // *Poult. Sci.* – 1981. – 60. – pp. 1497-1503.

193. Morsy E. A. Cytotoxicity and genotoxicity of copper oxide nanoparticles in chickens // *Biological Trace Element Research.* – 2021. – T. 199. – №. 12. – C. 4731-4745.

194. Mroczek-Sosnowska N. Effect of copper nanoparticles administered in ovo on the activity of proliferating cells and on the resistance of femoral bones in broiler chickens / N. Mroczek-Sosnowska (et al.) // *Archives of animal nutrition.* – 2017. – T. 71. – №. 4. – C. 327-332.

195. Mroczek-Sosnowska N. In ovo administration of copper nanoparticles and copper sulfate positively influences chicken performance / Mroczek-Sosnowska N. (et al.) // *Journal of the Science of Food and Agriculture.* – 2016. – T. 96. – №. 9. – C. 3058-3062.

196. National Research Council Nutrient requirements of poultry (9th rev. ed.), Natl. Acad. Press, Washington, DC (1994).

197. National Research Council Nutrient Requirements of Swine (10th ed.), National Academics Press, Washington, DC (1998).

198. Niki E. Assessment of antioxidant capacity in vitro and in vivo. *Free Radic. Biol. Med.* – 2010. – 49. – 503–515.

199. Novotry J.A., Turnlund J. Molybdenum disposition in humans during molybdenum depletion and repletion. *The Journal of Nutrition.* – 2006. – 136(4):953-957. NRC. *Nutrition Requirements of Poultry*, 9th ed.; National Academy Press: Cambridge, MA, USA, 1994.

200. NRC: *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press, Washington, DC. USA. p. 27. (1994).

201. Oberdörster G. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy / G. Oberdörster, A. Maynard, K. Donaldson, V. Castranova, J. Fitzpatrick, K. Ausman, J. Carter, B. Karn, W. Kreyling, D. Lai, S. Olin, N. Monteiro-Riviere, D. Warheit, H. Yang // *Particle and Fibre Toxicology*. 2005. № 2(8). P. 1-35.

202. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // *Crit. Rev. FoodSci. Nutr.* – 2019. – 59. – 2979–2998.

203. Okitsu K. Sonochemical degradation of azo dyes in aqueous solution: a new heterogeneous kinetics model taking into account the local concentration of

OH radicals and azo dyes / K. Okitsu, Iwasaki, Y. Yobiko, H. Bandow, R. Nishimura, Y. Maeda // *Ultrason. Sonochem.* – 2005. – 12. – 255–262.

204. Okitsu K. Sonochemical synthesis of metal nanoparticles, in: Pankaj, M. Ashokkumar (Eds.), *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, Springer. – 2011. – pp. 131–150.

205. Ouyang Z. Hydrothermal synthesis of a new porous zinc oxide and its antimicrobial evaluation in weanling piglets // *Livestock Science.* – 2021. – T. 248. – C. 104499.

206. Ozer J. The current state of serum biomarkers of hepatotoxicity / J. Ozer, M. Ratner, M. Shaw, W. Bailey, S. Schomaker // *Toxicology.* – 2008. – 245. – 194–205.

207. Panea B. Effect of nanocomposite packaging containing different proportions of ZnO and Ag on chicken breast meat quality / B. Panea, G. Ripoll, J. González, Á. Fernández-Cuello, P. Albertí // *Journal of Food Engineering.* – 2014. – T. 123. – C. 104–112.

208. Paniwnyk L. The enhancement and scale up of the extraction of antioxidants from *Rosmarinus officinalis* using ultrasound / L. Paniwnyk, H. Cai, S. Albu, T.J. Mason, R. Cole // *Ultrason. Sonochem.* – 2009. – 16. – 287–292.

209. Paniwnyk L. The extraction of rutin from flower buds of *Sophora japonica* / L. Paniwnyk, E. Beaufoy, J.P. Lorimer, T.J. Mason // *Ultrason. Sonochem.* – 2001. – 8. – 299–301.

210. Pankaj F., Ashokkumar M. (Eds.) *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, Springer. – 2011.

211. Pantopoulos K. Mechanisms of mammalian iron homeostasis / K. Pantopoulos, S. K. Porwal, A. Tartakoff, L. Devireddy // *Biochemistry.* – 2012. – T. 51. – №. 29. – C. 5705–5724.

212. Pardo, M. R. Bioavailability of magnesium food supplements: A systematic review / M. R. Pardo, E. G. Vilar, I. S. Martín, M. A. Martín // *Nutrition.* – 2021. – T. 89. – C. 111294.

213. Patra A., Lalhriatpuii M. progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding – A review / A. Patra, M. Lalhriatpuii // *Biological Trace Element Research.* – 2020. – T. 197. – №. 1. – C. 233–253.

214. Powell J.J. Dietary minerals in the gastrointestinal tract: hydroxy polymerization of aluminum is regulated by luminal Mucins / J.J. Powell, M.W. Whitehead, C.C. Ainley, M.D. Kendall, J.K. Nicholson, R.P. Thompson // *Journal of Inorganic Biochemistry.* 1999. № 75. P. 167–180.

215. Powell J.J. Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract / J.J. Powell, N. Faria, E. Thomas-McKay, L.C. Pele // *Journal of Autoimmunity.* 2010. V. 34. Issue 3. P. 226–233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2009.11.006>. Epub 2010. Jan 21.

216. Powell J.J., Thoree V., Pele L.C. Dietary microparticles and their impact on tolerance and immune responsiveness of the gastrointestinal tract // *British Journal of Nutrition.* 2007. № 98(1). P. 59–63.

217. Prasad M. Nanotherapeutics: An insight into healthcare and multi-dimensional applications in medical sector of the modern world / M. Prasad (et al.) // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. – 2018. – T. 97. – C. 1521-1537.
218. Price G.J. (Ed.) *Current Trends in Sonochemistry*. Royal Society of Chemistry. – 1992.
219. Rahman M. Nanoparticle and the white crown / M. Rahman, S. Laurent, N. Tawil, L.H. Yahia, M. Mahmoudi // *Proteins-nanoparticles*. Berlin. Springer. 2013. P. 21-44. 38.
220. Ramiah S. K. Effects of zinc oxide nanoparticles on growth performance and concentrations of malondialdehyde, zinc in tissues, and corticosterone in broiler chickens under heat stress conditions / S. K. Ramiah, E. A. Awad, S. Mookiah, Z. Idrus // *Poultry science*. – 2019. – T. 98. – №. 9. – C. 3828-3838.
221. Rastogi N. K. Opportunities and challenges of the use of ultrasound in the food industry // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2011. – № 51. – P. 705-722. doi: 10.1080/10408391003770583.
222. Rodehutscord M., Pack M. Estimates of essential amino acid requirements from dose-response studies with rainbow trout and broiler chicken: effect of mathematical model // *Arch. Anim. Nutr.* – 1999. – 52. – pp. 223-244.
223. Romanoff A. J. *The Avian Embryo*. Macmillan, New York, NY. 1960.
224. Rostagno H.S. *Euclides Tabelas brasileiras para aves e suínos: Composição de alimentos e exigências nutricionais* (3rd ed.) / H.S. Rostagno, L.F.T. Albino, J.L. Donzele, P.C. Gomes, R.F. Oliveira, D.C. Lopes, A.S. Ferreira, S.L.T. Barreto // UFV - Departamento de. – 2011.
225. Roye C. Extrusion-cooking modifies physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran / C. Roye, M. Henrion, H. Chanvrier, K. De Roeck, Y. De Bondt, I. Liberloo, R. King, C.M. Courtin // *Foods*. – 2020. – 9. – 738.
226. Saeed M. In ovo delivery of various biological supplements, vaccines and drugs in poultry: current knowledge / M. Saeed (et al.) // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2019. – T. 99. – №. 8. – C. 3727-3739.
227. Sahoo A. Effect of inorganic, organic and nano zinc supplemented diets on bioavailability and immunity status of broilers / A. Sahoo, R. K. Swain, S. K. Mishra // *Int. J. Adv. Res.* – 2014. – T. 2. – №. 11. – C. 828-837.
228. Saki A. A. Iron nanoparticles and methionine hydroxy analogue chelate in ovo feeding of broiler chickens / A. A. Saki, M. Abbasinezhad, A. A. Rafati // *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2014. – T. 10. – №. 3. – C. 187-196.
229. Salaheen S., Kim S.W., Haley B.J., Van Kessel J., Biswas D. Alternative growth promoters modulate broiler gut microbiome and enhance body weight gain. *Front. Microbiol.* 2017; 8:2088. doi: 10.3389/fmicb.2017.02088
230. Salaheen S., Kim S.W., Haley B.J., Van Kessel J., Biswas D. Alternative growth promoters modulate broiler gut microbiome and enhance body weight gain. *Front. Microbiol.* 2017;8:2088. doi: 10.3389/fmicb.2017.02088

231. Sarlak S. Effects of replacing inorganic with organic iron on performance, egg quality, serum and egg yolk lipids, antioxidant status, and iron accumulation in eggs of laying hens / S. Sarlak, S.A. Tabeidian, M. Toghyani, A.D.F. Shahraki, M. Goli, M. Habibian // *Biol. Trace Elem. Res.* – 2021. – 199. – 1986–1999.

232. Scott A. Effect of copper nanoparticles and copper sulphate on metabolic rate and development of broiler embryos / A. Scott, K. P. Vadalasetty, E. Sawosz, M. Łukasiewicz, R. K. Vadalasetty, S. Jaworski, A. Chwalibog // *Animal Feed Science and Technology.* – 2016. – T. 220. – C. 151-158.

233. Scott M.L., Nesheim M.C., Young R.J. Nutrition of Chicken. ML Scott and Associates Publishers, Ithaca, 1982.

234. Scott N. R., Chen H. National planning. Workshop, www.nseafs.cornell.edu. – 2002.

235. Seo S. H. The effect of dietary supplementation of feather meal on the performance and muscular taurine contents in growing-finishing pigs / S.H. Seo, H.K. Lee, W. S. Lee, K. S. Shin, I. K. Paik // *Asian-Austr J Anim Sci.* – 2008. – 21 (10). – pp. 1501-1505.

236. Seok S.H. Rat pancreatitis produced by 13-week administration of zinc oxide nanoparticles: biopersistence of nanoparticles and possible solutions / S.H. Seok, W.S. Cho, J.S. Park, Y. Na, A. Jang, H. Kim, Y. Cho, T. Kim, J.R. You, S. Ko, B.C. Kang, J.K. Lee, J. Jeong, J.H. Che // *Journal of Applied Toxicology.* 2013. № 33(10). P. 1089-1096.

237. Shayeghi M. Identification of an intestinal heme transporter / M. Shayeghi, G.O. Latunde-Dada, J.S. Oakhill, A.H. Laftah, K. Takeuchi, N. Halliday, Y. Khan, A. Warley, F.E. McCann, R.C. Hider, D.M. Frazer, G.J. Anderson, D.D. Vulpe, R.J. Simpson, A.T. McKie // *Cell.* – 2005. – 122. – pp. 789-801.

238. Sheiha A. M. Effects of dietary biological or chemical-synthesized nano-selenium supplementation on growing rabbits exposed to thermal stress / A. M. Sheiha (et al.) // *Animals.* – 2020. – T. 10. – №. 3. – C. 430.

239. Sheppard C., Dierenfeld E. Iron storage disease in birds: Speculation on etiology and implications for captive husbandry // *J. Avian. Med. Surg.* – 2002. – 16. – pp. 192-197.

240. Shi R. Effect of replacing dietary FeSO₄ with equal Fe-levelled iron glycine chelate on broiler chickens / R. Shi, D. Liu, J. Sun, Y. Jia, P. Zhang // *Czech J. Anim. Sci.* – 2015. – T. 60. – №. 2015. – C. 5.

241. Shinde P. L. Efficiency of inorganic and organic iron source under iron deficient conditions in broilers / P.L. Shinde, S. L. Ingale, J. Y. Choi, J. S. Kim, S. I. Pak, B. J. Chae // *Br Poult Sci.* – 2011. – 52. – pp. 578-583.

242. Shiwen H. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China / H. Shiwen, W. Ling, L. Lianmeng, H. Yuxuan, L. Lu // *A review, Agron. Sustain. Dev.* – 2015. – T. 35. – C. 369-400.

243. Simkó M. The special status of the oxidative cell type is responsible for the different effects of the electromagnetic field // *Current chemical chemistry*. 2007. № 14(10). P. 1141-1152.
244. Singla R., Grieser F., Ashokkumar M. Sonochemical degradation of martiusyellow dye in aqueous solution // *Ultrason. Sonochem.* – 2009. – 16. – 28–34.
245. Sirelkhatim A. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism / A. Sirelkhatim, S. Mahmud, A. Seenii // *Nano-micro letters*. – 2015. – T. 7. – №. 3. – C. 219-242.
246. Sivakumar M., Ashokkumar M. (Eds.), *Ultrasonics and Sonochemistry: Some Issues and Future Perspectives*, Chapter 13, Cavitation: A Novel Energy Efficient Technique for the Generation of Nanomaterials. Pan Stanford Publishing. – 2014. – pp. 411–418.
247. Sizova E. A. Morphological and biochemical blood parameters in broilers at correction of diet with copper salts and nanoparticles / E. A. Sizova, V. L. Korolev, S. A. Makaev, E. P. Miroshnikova, V. A. Shakhov // *Agricultural biology*. – 2016. – № 6. – C. 903-911.
248. Soo-Jin Choi and Jin-Ho Choy. Biokinetics of zinc oxide nanoparticles: toxicokinetics, biological fates, and protein interaction // *International Journal of Nanomedicine*. 2014. № 9(2). P. 261-269.
249. Srivastava P., Chauhan M. Sonochemical Study on Multivalent Cations (Fe, Cr, and Mn). *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, by Ashokkumar, Muthupandian // Springer Science+Business Media B.V. – 2011. – p. 273.
250. Steafanidou M., Maravelias C., Dona A. Zinc: a multipurpose trace elements. *Arch Toxicol.* – 2006. – 80:1-9.
251. Surai P.F. Antioxidant defense systems and oxidative stress in poultry biology: An update / P.F. Surai, I.I. Kochish, V.I. Fisinin, M.T. Kidd // *Antioxidants* 2019. – 8. – 235.
252. Suttle N. F. *Mineral Nutrition of Livestock*, 4th Edition. Oxford, UK: CAB International. – 2010. – pp. 334-362.
253. Swain P. S. Nano zinc, an alternative to conventional zinc as animal feed supplement: A review / P. S. Swain, S. B. Rao, D. Rajendran, G. Dominic, S. Selvaraju // *Animal Nutrition*. – 2016. – T. 2. – №. 3. – C. 134-141.
254. Szuba-Trznadel A. Effect of zinc source and level on growth performance and zinc status of weaned piglets / A. Szuba-Trznadel, A. Rzaşa, T. Hikawczuk, B. Fuchs // *Animals*. – 2021. – T. 11. – №. 7. – C. 2030.
255. Taheri S., Brodie G.I., Gupta D. Microwave Heating for Grain Treatment. In: Horikoshi, S., Brodie, G., Takaki, K., Serpone, N. (eds) *Agritech: Innovative Agriculture Using Microwaves and Plasmas*. Springer, Singapore. – 2022.
256. Tako E., Rutzke M.A., Glahn R.P. Using the domestic chicken (*Gallus gallus*) as an in vivo model for iron bioavailability. *Poult. Sci.* – 2010. – 89. – 514–521.

257. Tang D. Ferroptosis: Molecular mechanisms and health implications / D. Tang, X. Chen, R. Kang, G. Kroemer // *Cell Res.* – 2020. – 31. – 107–125.
258. Taschetto D. Iron requirements of broiler breeder hens / D. Taschetto, S. L. Vieira, C. R. Angel, C. Stefanello, L. Kindlein, M. A. Ebbing, C. T. Simões // *Poultry Science.* – 2017. – T. 96. – №. 11. – C. 3920-3927.
259. Tesseraud S. Relative responses of protein turnover in three different skeletal muscles to dietary lysine deficiency in chicks / S. Tesseraud, N. Maaa, R. Peresson, A.M. Chagneau // *Br. Poult. Sci.* – 1996. – 37. – 641–650.
260. Tona K. Comparison of embryo physiological parameters during incubation, chick quality, and growth performance of three lines of broiler breeders differing in genetic composition and growth rate / K. Tona, O. M. Onagbesan, Y. Jego, B. Kamers, E. Decuypere, V. Bruggeman // *Poult Sci.* – 2004. – 83. – pp. 507–513.
261. Tsiouris V. Investigation of a novel multicomponent mycotoxin detoxifying agent in amelioration of mycotoxicosis induced by Aflatoxin-B1 and Ochratoxin A in broiler chicks / V. Tsiouris, P. Tassis, J. Raj, T. Mantzios, K. Kiskinis, M. Vasiljevi, N. Deli'c, E. Petridou, G.D. Brellou, Z. Polizopoulou et al. // *Toxins.* – 2021. – 13. – 367.
262. Vijayakumar M., Balakrishnan V. Nanoparticles supplementation on growth performance of broiler chicken // *Indian J Sci Technol.* – 2014. – T. 7. – C. 1149-1154.
263. Vinodgopal K. Sonolytic design of graphene-Au nanocomposites. Simultaneous and sequential reduction of graphene oxide and Au(III) / K. Vinodgopal, B. Neppolian, I.V. Lightcap, F. Grieser, M. Ashokkumar, P.V. Kamat // *J. Phys. Chem. Lett.* – 2010. – 1. – 1987–1993.
264. Vu H. Ultrasonic extraction and antioxidant activity of polysaccharides from pumpkin (*Cucurbitamoschata*) / H. Vu, J. Zhu, W. Diao, C. Wang // *Carbohydrate Polymers.* – 2014. – № 113. – P. 314-324. – doi: 10.1016 / j.carbpol. 2014.07.025.
265. Wan Q. Ambient fine particulate matter aggravates atherosclerosis in apolipoprotein E knockout mice by iron overload via the hepcidin-ferroportin axis / Q. Wan, M. Yang, Z. Liu, J. Wu // *Life Sci.* – 2021. – 264. – 118715.
266. Wang Q.Y. Effect of dietary iron level on manganese absorption and deposition of broiler / Q.Y. Wang, Y.X. Zou, J.M. Tang, L. Lv, L.Y. Zhang, X.G. Luo, S.F. Li // *Chin. J. Anim. Sci.* – 2017. – 53. – 68–72.
267. Xie C. Effect of iron glycine chelate supplementation on egg quality and egg iron enrichment in laying hens / C. Xie, H. A. M. Elwan, S. S. Elnesr, X. Y. Dong, X. T. Zou // *Poultry Science.* – 2019. – T. 98. – №. 12. – C. 7101-7109.
268. Xie C. Effects of iron glycine chelate on laying performance, antioxidant activities, serum biochemical indices, iron concentrations and transferrin mRNA expression in laying hens / C. Xie, H.A.M. Elwan, S.S. Elnesr, X.Y. Dong, J. Feng, X.T. Zou // *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* – 2019. – 103. – 547–554.

269. Yakunin A. Photoemission of Plasmonic Gold Nanostars in Laser-Controlled Electron Current Devices for Technical and Biomedical Applications / A. Yakunin, Yu. Avetisyan, G. Akchurin, S. Zarkov, N. Aban'shin, V. Khanadeev, V. Tuchin // *Sensors*. – 2022. – 22. – 4127.

270. Yamasaki K., Hagiwara H. Excess iron inhibits osteoblast metabolism. *Toxicol. Lett.* – 2009. – 191. – 211–215.

271. Yausheva, E. V. Increasing efficiency in the poultry meat production when using iron and copper nanoparticles in nutrition / E. V. Yausheva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing. – 2021. – T. 624. – №. 1. – P. 012046. – doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012046.

272. Youssef F. S. Application of some nanoparticles in the field of veterinary medicine / F. S. Youssef, H. A. El-Banna, H. Y. Elzorba, A. M. Galal // *International journal of veterinary science and medicine*. – 2019. – T. 7. – №. 1. – C. 78-93.

273. Zhang J. Sonochemical formation of single-crystalline gold nanobelts / J. Zhang, J. Du, B. Han, Z. Liu, T. Jiang, Z. Zhang // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2006. – 45. – 1116–1119.

274. Zhang K. Sonochemical preparation of polymer nanocomposites / K. Zhang, B.J. Park, F.F. Fang, H.J. Choi // *Molecules*. – 2009. – 14. – 2095–2110.

275. Zhang L.Y. Effect of iron source on iron absorption and gene expression of iron transporters in the ligated duodenal loops of broilers / L.Y. Zhang, X.F. Li, X.D. Liao, L.Y. Zhang, L. Lu, X.G. Luo // *J. Anim. Sci.* – 2017. – 95. – 1587–1597.

276. Zhang S. Effect of extrusion and semi-solid enzymatic hydrolysis modifications on the quality of wheat bran and steamed bread containing bran / S. Zhang, X. Jia, L. Xu, Y. Xue, Q. Pan, W. Shen, Z. Wang // *J. Cereal Sci.* – 2022. – 108. – 103577.

277. Zhang Y. Potential mechanisms underlying the hepatic-protective effects of Danshensu on iron overload mice / Y. Zhang, G. Zhang, Y. Liang, H. Wang, Q. Wang, Y. Zhang, X. Zhang, J. Zhang, L. Chu // *Biol. Pharm. Bull.* – 2020. – 43. – 968–975.

278. Zou Y.X. Effects of high dietary iron on iron transporter gene expressions in duodenal mucosa and tissue microelement contents of broilers / Y.X. Zou, Q.Y. Wang, Y.B. Niu, Y. He, J.M. Tang, L. Lyu, L.Y. Zhang, X.G. Luo, S.F. Li // *Chin. J. Anim. Nutr.* – 2017. – 29. – 1976–1987.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 531 321** (13) **C2**

(51) МПК

A23K 1/14 (2006.01)

A23K 1/16 (2006.01)

A23K 1/175 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012141638/13, 28.09.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.09.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.09.2012

(43) Дата публикации заявки: 10.04.2014 Бюл. № 10

(45) Опубликовано: 20.10.2014 Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2157644 C1, 20.10.2000. SU 1346114
A1, 23.10.1987. SU 1692507 A1, 23.11.1991. RU
2100939 C1, 10.01.1998

Адрес для переписки:

460000, г.Оренбург, ул. 9 Января, 29, ГНУ
ВНИИМС Россельхозакадемии

(72) Автор(ы):

Мирошников Сергей Александрович (RU),
Холодилина Татьяна Николаевна (RU),
Гарипова Наталия Викторовна (RU),
Курилкина Марина Яковлевна (RU),
Рогачев Борис Георгиевич (RU),
Кизасв Михаил Анатольевич (RU),
Ваншин Владимир Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский
институт мясного скотоводства Российской
академии сельскохозяйственных наук (RU)

(54) СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ЖИВОТНЫХ НА ОСНОВЕ ПШЕНИЧНЫХ ОТРУБЕЙ И МИКРОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА

(57) Реферат:

Изобретение относится к сельскому хозяйству,
в частности к животноводству, и может быть
использовано при получении корма для птицы.
Способ получения кормовой добавки для
сельскохозяйственной птицы включает обработку
пшеничных отрубей электромагнитным
сверхвысокочастотным излучением. Пшеничные
отруби предварительно смешивают с
микрочастицами железа, где на их долю
приходится 0,7 мг в расчете на 1 кг пшеничных

отрубей по сухому веществу. Затем смесь
увлажняют до влажности 45% и порционно
подвергают СВЧ-излучению в течение 1,5 мин
при удельной мощности 3,2 Вт/г. Осуществление
изобретения обеспечивает улучшение
минерального обмена в организме птицы с
одновременным повышением усвояемости и
биодоступности корма за счет воздействия на
смесь СВЧ-излучения. 1 з.п. ф-лы, 1 табл.