

Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, No 1. С. 192-202.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2023. Vol. 106, no 1. P. 192-202.

Научная статья
УДК 636.085:577.17
doi:10.33284/2658-3135-106-1-192

Сравнительный анализ влияния различных форм железа на течение метаболических процессов в рубце методом «in vitro»

Святослав Валерьевич Лебедев¹, Елена Владимировна Шейда², Оксана Вячеславовна Шошина³, Вера Ивановна Корнейченко⁴

¹²³⁴Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹lsv74@list.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0001-9485-7010>

²elena-snejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

³oksana.shoshina.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4104-3333>

⁴icvniims.or@mail.ru

Аннотация. В исследовании изучено воздействие различных форм железа в составе пшеничных отрубей на течение метаболических процессов в рубце методом «in vitro». В ходе исследования использовали: I – пшеничные отруби (контрольный образец), II – пшеничные отруби с хелатом железа (2,0 мг/кг сухого вещества); III – пшеничные отруби с наночастицами железа (1,4 мг/кг сухого вещества). Хелатная форма железа способствовала повышению переваримости сухого вещества на 2,4 %, а наночастицы – на 3,3 % по сравнению с контролем. Добавление в образцы хелата железа сдвигало метаболический профиль рубца в сторону ацетата, с увеличением концентрации уксусной кислоты на 22,6 % ($P \leq 0,01$), при незначительном влиянии железа в наноформе на аналогичные показатели. Включение хелатного комплекса железа повышало уровень общего азота на 12,4 % ($P \leq 0,05$), белкового – на 14,2 % ($P \leq 0,05$), небелкового азота – на 6,1 % ($P \leq 0,05$), при добавлении железа в наноформе данные показатели увеличивались на 13,3 % ($P \leq 0,05$), 14,2 % ($P \leq 0,05$) и 8,4 % ($P \leq 0,05$) соответственно. Наночастицы железа стимулировали активность амилазы на 25,6 % ($P \leq 0,05$) и протеазы на 19,6 % ($P \leq 0,05$), при введении хелатной формы железа – на 12,9 % и 10,3 % соответственно. Во всех опытных образцах pH находился в пределах нормы и составил 6,4–6,8. Таким образом, использование препарата железа в органической форме способствовало стимуляции метаболических процессов в рубце на фоне активности пищеварительных ферментов, что позволит рассматривать данную форму как кофактор стимуляции биохимических реакций в рубце и прогностический фактор повышения продуктивности.

Ключевые слова: бычки, казахская белоголовая порода, кормление, железо, переваримость, азот, летучие жирные кислоты, амилаза, протеаза

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2021-2023 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ 0761-2019-0005).

Для цитирования: Сравнительный анализ влияния различных форм железа на течение метаболических процессов в рубце методом «in vitro» / С.В. Лебедев, Е.В. Шейда, О.В. Шошина, В.И. Корнейченко // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 1. С. 192-202. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-192>

Original article

Comparative analysis of the effect of various forms of iron on the course of metabolic processes in rumen using "in vitro" method

Svyatoslav V Lebedev¹, Elena V Sheyda², Oksana V Shoshina³, Vera I Korneychenko⁴

¹²³⁴Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹lsv74@list.ru, <https://orcid.org/orcid.org/0000-0001-9485-7010>

²elena-snejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

³oksana.shoshina.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4104-3333>

⁴icvniims.or@mail.ru

Abstract. The effect of various forms of iron in wheat bran on the course of metabolic processes in the rumen was studied by "in vitro" method. During the study, we used: I – wheat bran (control sam-

ple), II - wheat bran with iron chelate (2.0 mg/kg of dry matter; III - wheat bran with iron nanoparticles (1.4 mg/kg of dry matter). The chelated form of iron contributed to an increase in the digestibility of dry matter by 2.4%, and nanoparticles by 3.3% compared to the control. The addition of iron chelate to the samples shifted the metabolic profile in rumen towards acetate, with an increase in acetic acid concentration by 22.6 % ($P \leq 0.01$), the effect of iron in nanoform on similar indicators was insignificant. The inclusion of an iron chelate complex increased the total nitrogen level by 12.4% ($P \leq 0.05$), protein nitrogen by 14.2% ($P \leq 0.05$), non-protein nitrogen by 6.1% ($P \leq 0.05$), these indicators increased with the addition of iron in the nanoform by 13.3% ($P \leq 0.05$), 14.2% ($P \leq 0.05$) and 8.4% ($P \leq 0.05$), respectively. Iron nanoparticles stimulated the activity of amylase by 25.6% ($P \leq 0.05$) and protease by 19.6% ($P \leq 0.05$), the introduction of the chelated form of iron – by 12.9% and 10.3%, respectively. The pH-level was within the normal range and amounted to 6.4-6.8 in all experimental samples. Thus, the use of iron preparation in organic form contributed to the stimulation of metabolic processes in rumen against the background of the digestive enzymes activity, which will allow us to consider this form as a cofactor for stimulating biochemical reactions in the rumen and a prognostic factor for increasing productivity.

Keywords: bulls, Kazakh White-Headed breed, feeding, iron, digestibility, nitrogen, volatile fatty acids, amylase, protease

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2021-2023 FSBR FRC BST RAS (No. 0761-2019-0005).

For citation: Lebedev SV, Sheyda EV, Shoshina OV, Korneychenko VI. Comparative analysis of the effect of various forms of iron on the course of metabolic processes in rumen using "in vitro" method. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;106(1):192-202. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-192>

Введение.

Роль биологически активных добавок на основе минеральных компонентов состоит в способности стимулировать биохимические и физиологические процессы в организме, благодаря чему повышаются продуктивные качества животных (Кокоева А.Т. и др., 2017; Singh D et al., 2022).

Железо является одним из важных эссенциальных микроэлементов для жвачных животных, компонентом белков: миоглобина, гемоглобина, гемозритрина и гемоцианина, участвующих в транспорте кислорода, сывороточного белка ферритина, трансферрина, а также к различным частям тела лактоферрина; компонент ферментов: оксидазы, каталазы, редуктазы, нитрогеназы, гидроксилазы, гидрогеназы, супероксиддисмутазы, аргиназы, ферредоксина, пероксидазы, цитохрома, фосфатазы. Неоспоримая роль железа в обменных процессах заключается в росте концентрации летучих жирных кислот, улучшении микробиологических процессов в рубцовой жидкости, повышая переваривание сухого вещества на 8,98 % (Хуан NH et al., 2018; Левахин Ю.И. и др., 2020б). В то же время из-за низкой доступности этого элемента из грубого корма его дефицит может отрицательно влиять на систему воспроизводства жвачных животных и течение метаболических процессов в организме (Щеголев П.О. и др., 2022). Однако влияние железа на усвоение питательных веществ и функцию рубца до конца не изучено (Потемина Т.Е. и др., 2020).

Установлено влияние избыточной нагрузки железом в виде моногидрата сульфата железа в дозировках 457 мг/кг, 816 мг/кг, 1256 мг/кг и 1725 мг/кг корма на показатели роста, усвояемость питательных веществ, биохимию крови, ферментацию рубца и бактериальные сообщества у жвачных (Хуан NH et al., 2018).

Согласно экспериментальным данным, органические соединения микроэлементов имеют более высокую биодоступность, чем неорганические формы (Маннер К. и Хундхаузен Х., 2016) за счёт способности связываться с органическими молекулами аминокислот или пептидов. Данное явление указывает на высокую стабильность этих молекул как одно из основных свойств органических соединений микроэлементов (Lu C-W et al., 2021).

Микроэлементы в форме хелатов способны оказывать препятствие в соединении металла с другими комплексами и затруднять переваривание в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ), не снижая скорость химических реакций, что ставит их в ряд ковалентных (Мёрфи Р., 2019).

Помимо этого, хелаты повышают деятельность микроорганизмов жвачных в преджелудках, в результате чего ферментативная активность повышается, выделение пищеварительных соков увеличивается и активируются протеиназы, которые поддерживают выраженный протеолиз и биосинтез аминокислот для пищеварения в рубце (Чернова Е.Н. и др., 2015).

На основании информации о современном состоянии исследований данной тематики возникает ряд вопросов, касаемых оценки влияния железа на функциональную активность пищеварительных процессов в рубце жвачных, происходящих на микроуровне.

Цель исследования.

Провести сравнительный анализ влияния различных форм железа на течение метаболических процессов в рубце методом «*in vitro*».

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Рубцовая жидкость, полученная от фистулированных бычков казахской белоголовой породы средней массой $266 \pm 1,53$ кг и возрастом 11-12 месяцев.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов (1987 г.; Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08.1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных») и «Guide for the Care and Use of Laboratory Animals» (National Academy Press, Washington, D.C., 1996). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Научные исследования проводились на базе лаборатории биологических испытаний и экспертиз Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (ФНЦ БСТ РАН).

В состав рациона для животных, сформированного по рекомендациям Калашникова А.П. и др. (2003), входило: сено злаковое (1 кг), сено бобовое (2 кг), силос кукурузный (9,5 кг), дроблёная зерносмесь (2 кг), жмых подсолнечный (0,1 кг), патока кормовая (0,6 кг), соль поваренная (37 г), монокальцийфосфат (47,7 г), премикс (20 г).

В качестве базисного субстрата использовали пшеничные отруби: I образец – контрольный (нативная форма отрубей), II образец – пшеничные отруби с хелатом железа (2,0 мг/кг СВ рациона); III образец – пшеничные отруби с наночастицами железа (1,4 мг/кг СВ рациона). Данные дозировки обусловлены проведёнными ранее исследованиями (Дускаев Г.К. и др., 2022).

Характеристика форм железа: наночастицы железа – размер 90 нм, Z- потенциал – $7,7 \pm 0,5$ мВ, содержание железа – 99,8 %, получены методом электрического взрыва проводника в атмосфере аргона (ООО «Передовые порошковые технологии», г. Томск, Россия). Органическая форма (хелат железа) – содержание Fe 14 мг/% (ЗАО «Эвалар», г. Бийск, Россия).

Исследования переваримости сухого вещества (СВ) в рубце производили методом *in vitro* по специализированной методике с использованием установки-инкубатора и буферного раствора. У фистульных животных ($n=3$) через 3 часа после кормления отбирали пробы рубцового содержимого в термосы объёмом 3 литра. Транспортировку осуществляли в течение 30 минут, с поддержанием температуры $+39$ °С. Далее рубцовую жидкость фильтровали через 4 слоя марли и смешивали с подготовленным и подогретым до $+39$ °С буферным раствором солей (имитирующим слюну) в соотношении 1:4 и разливали по ёмкостям инкубатора, куда помещали заранее взвешенные и пронумерованные, изготовленные из полиамидной ткани мешочки, в которые вносили контрольные и опытные образцы массой 500 мг. Инкубирование осуществляли в течение 48 часов при температуре $+39$ °С в установке-инкубаторе «ANKOM Daisy II». По окончании инкубации образцы промывались и высушивались при температуре $+60$ °С до константного веса.

Коэффициент переваримости сухого вещества *in vitro* вычисляли как разницу масс образца корма с мешочком до и после 48-часовой инкубации по следующей формуле:

$$K=(A-B)/C \times 100 \%,$$

где: K – коэффициент переваримости сухого вещества корма (%);

A – исходная масса 1 (образец корма с мешочком) (мг);

B – масса после 48-часовой инкубации (образец корма с мешочком) (мг);

C – исходная масса 2 (образец корма без массы мешочка) (мг).

Определение уровня летучих жирных кислот проводили методом газовой хроматографии. Азот определяли по ГОСТу 26180-84.

Измерение активности панкреатических ферментов: определение амилазы – по гидролизу крахмала (Батоев Ц.Ж. 2001) с использованием КФК-3 (длина волны 670 нм) и выражали в мг расщеплённого крахмала 1 мл химуса в течение одной минуты, протеаз – по расщеплению казеина по Гаммерстену (США) при колориметрическом контроле на КФК-3 (длина волны 450 нм) (Батоев Ц.Ж., 2001).

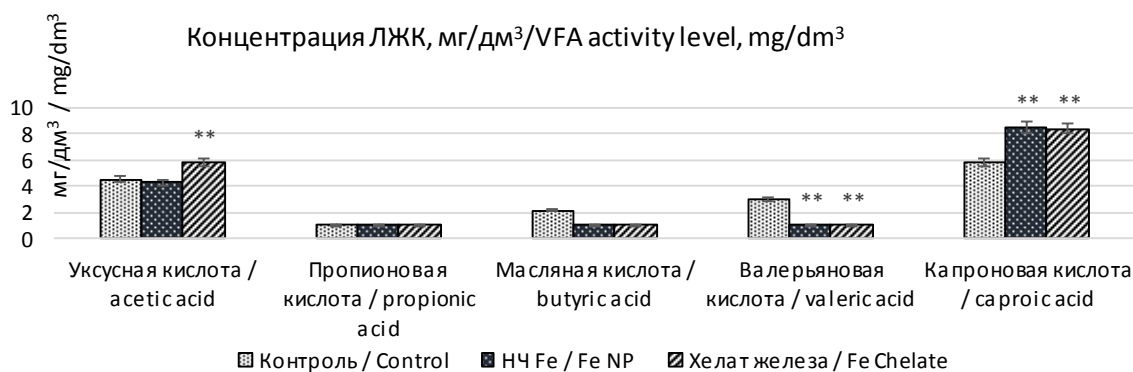
Оборудование и технические средства. Лабораторные исследования выполнены с использованием приборной базы ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф>. Установка-инкубатор «ANKOM Daisy II» (модификации D200 и D200I) (Ankom Technology, США), термостат ТС-1/80 СПУ (ООО «Амедис Инжиниринг», г. Нижний Новгород, Россия), КФК-3 (длина волны 670 нм, (ОАО "Загорский оптико-механический завод" (ЗОМЗ), г.Сергиев Посад, Россия), автоматический биохимический анализатор CS-T240 («DiruiIndustrial Co., Ltd», Китай), коммерческие биохимические наборы для ветеринарии «ДиаВетТест» (ЗАО «ДИАКОН-ДС», Россия).

Статистическая обработка. Расчёты выполняли с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США). Статистическая обработка включала расчёт среднего значения (M) и стандартные ошибки среднего (\pm SEM). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен при $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, сравнивая опытные образцы с контрольным.

Результаты исследований.

На основании результатов исследований включение в опытный образец хелата железа сопровождается увеличением переваримости сухого вещества на 2,4 % ($P \leq 0,05$), а при включении наночастиц железа переваримость сухого вещества составила 76,3 %, что выше, чем в контроле на 3,3 % ($P \leq 0,01$).

В нашем исследовании при добавлении хелата железа уровень уксусной кислоты рубцовой жидкости повышался на 22,6 % ($P \leq 0,01$). Наночастицы железа, напротив, незначительно снижали уровень уксусной кислоты на 4,2 % относительно контроля. Уровень пропионовой кислоты был стабилен, а масляной и валерьяновой кислот снижался на 53,7 % и 66,7 % ($P \leq 0,01$). Концентрация капроновой кислоты в рубцовом содержимом при использовании наночастиц железа и хелата железа повышалась относительно контроля на 31,5 % ($P \leq 0,01$) и 31,1 % ($P \leq 0,01$) соответственно (рис. 1).



Примечание: ** – $P \leq 0,01$ при сравнении с контролем

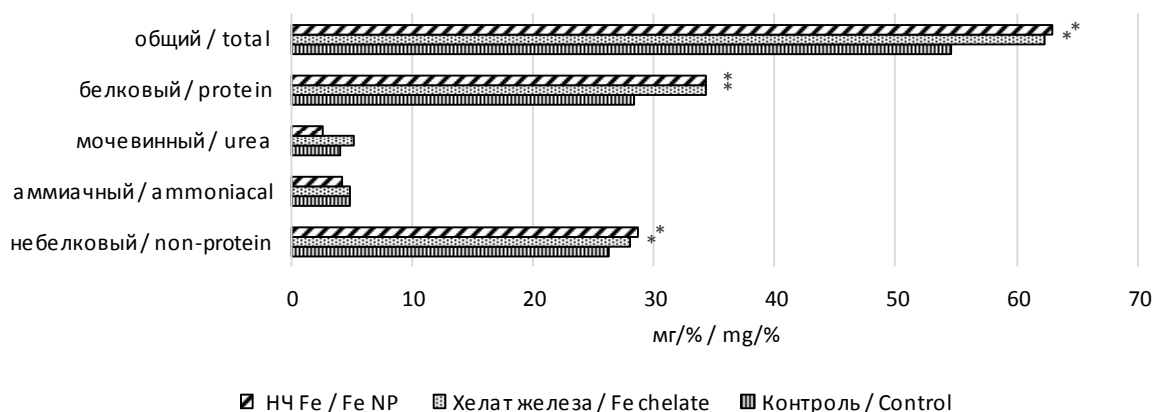
Note: ** – $P \leq 0.01$ when compared with the control

Рис. 1 – Концентрация ЛЖК рубцовой жидкости при использовании различных форм железа, мг/дм³
Figure 1 – The VFA concentration in the rumen fluid when using various forms of iron, mg/dm³

Включение препарата железа в хелатной форме способствовало повышению уровня общего и белкового азота на 12,4 % и 17,2 % ($P \leq 0,05$), и на 13,3 %, 7,2 % ($P \leq 0,05$) – при использовании железа в нанодисперсной форме относительно контроля. Напротив, уровень аммиачного азота при использовании хелата железа не изменялся, а при включении наночастиц снижался на 14,3 %.

Разнополярность проявлялась в увеличении мочевиного азота на 21,3 % в I образце и снижении на 36,3 % – во II образце.

Величина небелкового азота в рубцовой жидкости с добавлением в рацион хелатной формы железа и наночастиц железа была выше контрольных показателей на 6,1 % и 8,4 % ($P \leq 0,05$) соответственно (рис. 2).



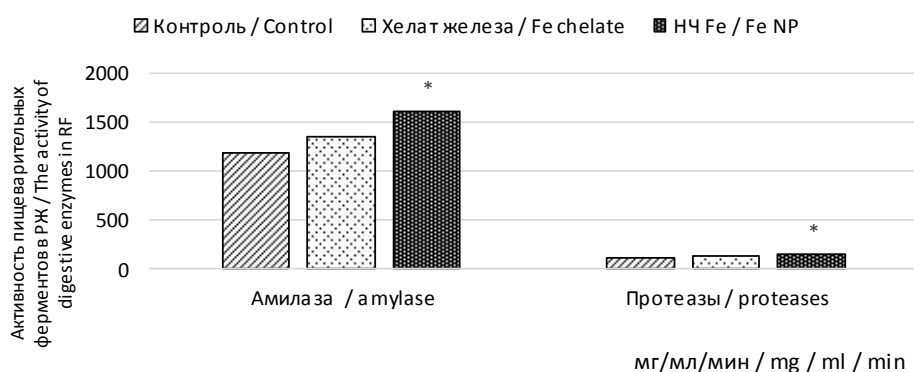
Примечание: ** – $P \leq 0,01$ при сравнении с контролем

Note: ** – $P \leq 0,01$ when compared with the control

Рис. 2 – Уровень азота рубцовой жидкости после инкубирования, мг/%

Figure 2 – Nitrogen level in rumen fluid after incubation, mg/%

Использование наночастиц железа способствовало повышению амилолитической и протеолитической активности ферментов на 25,6 % ($P \leq 0,05$) и 19,6 % ($P \leq 0,05$) соответственно относительно контроля (рис. 3).



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении с контролем

Note: * – $P \leq 0,05$ when compared with the control

Рис. 3 – Динамика ферментативной активности рубцовой жидкости, мг/мл/мин

Figure 3 – Dynamics of enzymatic activity in rumen fluid, mg/ml/min

Динамика ферментативной активности амилазы рубцовой жидкости при использовании комплекса хелата железа повышалась на 12,9 % и составила $1350 \pm 30,8$ мг/мл/мин, а протеаз – на 10,3 % ($130 \pm 10,2$ мг/мл/мин) при сравнении с контролем.

По завершению инкубации в рубцовой жидкости определяли величину водородного показателя (рН), во всех опытных группах он находился в пределах физиологической нормы и составил 6,4-6,8.

Таким образом, установлено позитивное влияние железа на ферментативные процессы в рубце, выражающиеся в увеличении уровня ЛЖК, концентрации общего и белкового азота и повышении активности пищеварительных ферментов амилазы и протеазы.

Обсуждение полученных результатов

В наших исследованиях ферментации *in vitro*, было показано, что использование железа в разных формах не оказало влияния на величину водородного показателя, уровень рН в контрольном и опытных образцах был в пределах 6,4-6,8. В исследованиях Wang Y с коллегами (2020) при перегрузке железом значения рН в рубце варьировались от 6,24 до 6,96, и рН рубца изменялся квадратично по мере увеличения доз железа ($P \leq 0,05$), также отмечено снижение скорости разложения целлюлозы и общей концентрации ЛЖК в моделируемом рубце, при этом не было обнаружено никакого эффекта влияния на уровень азота в рубцовой жидкости ($P \leq 0,05$).

Важным показателем обменных процессов в рубце является уровень конечных метаболитов в рубцовой жидкости – профиль летучих жирных кислот (ЛЖК), азота, рН. Использование железа в хелатной и нанодисперсной формах способствовало увеличению переваримости сухого вещества рациона на 2,4 % ($P \leq 0,05$) – 3,3 % ($P \leq 0,01$). Усвояемость сухого вещества, органического вещества, нейтральной детергентной клетчатки и кислотной детергентной клетчатки демонстрировали квадратичное повышение с увеличением уровня железа при перегрузке ($P \leq 0,05$). Однако реакция на общую концентрацию ЛЖК показала квадратичное снижение, как и концентрации пропионата, бутирата и валериата ($P \leq 0,05$) (Wang Y et al., 2020). В нашем исследовании при добавлении хелата железа уровень уксусной кислоты рубцовой жидкости повышался на 22,6 % ($P \leq 0,01$). Железо в форме хелата в рационе препятствует объединению металла с другими комплексами, которые ухудшают усвоение этого элемента в желудочно-кишечном тракте, именно поэтому уровень уксусной кислоты повышается (Farghali M et al., 2019). Увеличение ацетата в рубцовом содержимом при включении железа в хелатной форме свидетельствует о усилении процессов ферментации и улучшении переваримости питательных компонентов корма за счёт стимуляции ферментативных процессов в рубце и изменения структуры бактериального сообщества у жвачных (Wang Y et al., 2020).

Высокое содержание железа в рационе значительно влияет на потребление корма и прирост живой массы телят (Scherf L et al., 2020; Kaczmarek B et al., 2021). Возможно, это связано с влиянием препарата железа на вкусовые качества и приводит к снижению потребляемости кормов, снижению веса и усвояемость сухого вещества в рубце *in vitro* (Левахин Ю.И. и др., 2020а).

Образование в рубцовой жидкости метаболитов азота и использование их рубцовой микрофлорой для синтеза белков собственного тела показывают эффективность использования общего, белкового и небелкового азота в рубце, что свидетельствует о повышении активности рубцовой микрофлоры и интенсивности течения ферментативных процессов, в частности процесса протеолиза в рубцовой жидкости (Чернова Е.Н. и др., 2015). В нашем исследовании включение препарата железа в хелатной форме способствовало повышению уровня общего и белкового азота на 12,4 % и 17,2 % ($P \leq 0,05$), и на 13,3 %, 7,2 % ($P \leq 0,05$) – при использовании железа в нанодисперсной форме.

Включение железа в биотической дозе изменяло активность пищеварительных ферментов в химусе, способствуя повышению активности липазы и протеаз (Шейда Е.В. и др., 2022). Активность ферментов амилазы и протеазы в рубцовой жидкости имела тенденцию к увеличению относительно контроля на 25,6 % ($P \leq 0,05$) и 19,6 % ($P \leq 0,05$) соответственно. Железо выступает в качестве ферментативного кофактора или структурного белкового компонента и является важным компонентом некоторых клеточных ферментов. Повышение активности пищеварительных ферментов в рубцовом содержимом обусловлено увеличением образования метаболитов азота (Weerts J et al., 2022).

Использование в кормлении крупного рогатого скота препарата железа в ультрадисперсной форме повышало переваримость сырого жира, органического вещества и БЭВ, а также способство-

вало стимуляции обменных процессов в организме и повышению активности пищеварительных ферментов (Шейда Е.В. и др., 2022).

Установлено, что потребление железа оказывает влияние на разнообразие микробиоты рубца жвачных. В микробиоте рубца при использовании железа в кормлении жвачных преобладали бактерии *Bacteroidetes* и *Firmicutes*, составляющие около 90 % последовательностей. В исследованиях *in vitro* показано, что бактерии типа *Bacteroidetes* обладают способностью переваривать неволокнистые вещества (неклеточные полисахариды и белки) и не способны непосредственно разлагать волокна, но могут косвенно способствовать их распаду при совместном культивировании с бактериями (Ron EZ and Rosenberg E, 2014). Чрезмерная нагрузка железом значительно снижала численность *Bacteroidetes*, следовательно, мы пришли к выводу, что небольшое число бактерий данного вида может уменьшить деградацию неволокнистых веществ и увеличить их скорость выведения из рубца, что также может быть причиной низкого уровня ЛЖК в группе, получающей избыточное количество железа.

В своём исследовании мы можем предположить, что включение невысоких доз железа изменяло структуру микробного сообщества рубца в сторону увеличения представителей семейства *Firmicutes*, участвующих в разложении клетчатки и целлюлозы с образованием янтарной кислоты, уксусной кислоты и двуокиси углерода.

Заключение.

Биотическая доза железа в рационе, вне зависимости от формы, способствует повышению перевариваемости сухого вещества от 2,4 % ($P \leq 0,05$) до 3,3 % ($P \leq 0,01$). Добавление в рацион хелата железа повышало концентрацию уксусной кислоты в содержимом рубца на 22,6 % ($P \leq 0,01$) и стимулировало образование общего азота на 12,4 % ($P \leq 0,05$), белкового – на 14,2 % ($P \leq 0,05$), небелкового азота – на 6,1 % ($P \leq 0,05$). При использовании железа в нанодисперсной форме показатели общего, белкового и небелкового азота по сравнению с контролем увеличивались на 13,3 % ($P \leq 0,05$), 14,2 % ($P \leq 0,05$) и 8,4 % ($P \leq 0,05$) соответственно. Использование железа усиливало активность пищеварительных ферментов в рубцовом содержимом – амилазы и протеаз, на 25,6 % ($P \leq 0,05$) и 19,6 % ($P \leq 0,05$) соответственно при включении НЧ железа и на 12,9 % и 10,3 % соответственно – при введении хелата.

Список источников

1. Адаптационные процессы в пищеварительной системе при введении ультрадисперсных частиц железа в жировые рационы крупного рогатого скота / Е.В. Шейда, С.В. Лебедев, С.А. Мирошников, В.В. Гречкина, О.В. Шошина // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 2. С. 328-342. [Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Shoshina OV. Adaptive responses of cattle digestive system as influenced by dietary ultrafine iron particles combined with fat diets. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2022;57(2):328-342. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328rus doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328eng
2. Батоев Ц.Ж. Физиология пищеварения птиц. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2001. 214 с. [Batoev CZh. Fiziologija pishhevarenija ptic. Ulan-Udje: Izd-vo Burjat. gos.un-ta; 2001:214 p. (In Russ.)].
3. Изменения микробиоценоза рубца, крови и переваримость сухого вещества рациона при введении бычкам совместно с жировой добавкой ультрадисперсных частиц железа / Ю.И. Левахин, Б.С. Нуржанов, В.А. Рязанов, Е.Б. Джуламанов // Аграрный вестник Урала. 2020а. № 1(192). С. 53-59. [Levakhin YuI, Nurzhanov BS, Ryazanov VA, Dzhulamanov EB. Changes in the microbiocenosis of the rumen and digestibility of the dry matter of the diet with the introduction of gobies together fatty addition of ultrafine iron particles. Agrarian Bulletin of the Urals. 2020a;192(1):53-59. doi: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-53-59. (In Russ.)].
4. Кокоева А.Т., Кокоева Ал.Т., Ногаева В.В. Технологические основы производства говядины с использованием нанопорошка железа // Перспективы производства продуктов питания

нового поколения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, (г. Омск, 13-14 апр. 2017 г.). Омск: Омский ГАУ им. П.А. Столыпина, 2017. С. 69-72. [Kokoeva AT, Kokoeva AI, Nogaeva VV. Technological bases of beef production with the use of nanopowder iron (Conference proceedings) Perspektivy proizvodstva produktov pitaniya novogo pokoleniya: materialy Vseross. Nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, (g. Omsk, 13-14 apr. 2017 g.). Omsk: Omskii GAU im. P.A. Stolypina; 2017:69-72. (*In Russ.*)].

5. Маннер К., Хундхаузен Х. Биодоступность микроэлементов из хелатов // Животноводство России. 2016. № S2. С. 67-68. [Manner K, Hundhauzen H. Bioavailability of chelate-based micro nutrients. Animal Husbandry of Russia. 2016;S2:67-68. (*In Russ.*)].

6. Мёрфи Р. Микроэлементы, корма и недостаток элементов в рационе: как форма микроэлемента влияет на качество корма и здоровье животных // Животноводство России. 2019. № 4. С. 41-44. [Murphy R. Trace minerals, feeds and lack of minerals in diet: how the form of a trace mineral influences feed quality and animal health. Animal Husbandry of Russia. 2019;4:41-44. (*In Russ.*)].

7. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / под ред. А.П. Калашников, В.И. Фисинин, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. 3-е изд., доп. и перераб. М., 2003. С. 110-123. [Kalashnikov AP, Fisinin VI, Shheglova VV, Klejmenova NI. Normy i raciony kormleniya sel'skoxozjajstvennyh zhivotnyh: spravochnoe posobie. 3-e izd., dop. i pererab. Moscow; 2003:110-123. (*In Russ.*)].

8. Общие вопросы метаболизма железа и патогенеза железодефицитной анемии / Т.Е. Потемина, С.А. Волкова, С.В. Кузнецова, А.В. Перешейн // Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, врач и здоровье. 2020. № 3(45). С. 125-137. [Potemina TE, Volkova SA, Kuznetsova SV, Pereshein AV. General issues of iron metabolism and pathogenesis of iron deficiency anemia. Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ" (Rehabilitation, doctor and health). 2020;3(45):125-137. (*In Russ.*)].

9. Особенности рубцового пищеварения у откармливаемых бычков при использовании жировой добавки, обогащенной ультрадисперсными частицами Fe / Ю.И. Левахин, Б.С. Нуржанов, Е.Б. Джуламанов, В.А. Рязанов // Инновационная деятельность как фактор развития агропромышленного комплекса в современных условиях: материалы II Междунар. научн. конф., (г. Грозный, 28-29 февр. 2020 г.). Грозный: ЧГУ им. А.А. Кадырова, 2020б. С. 242-246. [Levahin YuI, Nurzhanov BS, Dzhulanov EB, Ryazanov VA. Features of cicatricial digestion in fattening gobies when using a fat supplement enriched with ultrafine particles of Fe (Conference proceedings) Innovacionnaja dejatel'nost' kak faktor razvitija agropromyshlennogo kompleksa v sovremennyh uslovijah: materialy II Mezhdunar. nauchn. konf., (g. Groznyj, 28-29 fevr. 2020 g.). Groznyj: ChGU im. A.A. Kadyrova; 2020b:242-246. (*In Russ.*)]. doi: 10.36684/22-2020-1-242-246

10. Полиморфизм гена каппа-казеина в популяциях молочного скота костромской области и его влияние на молочную продуктивность коров / П.О. Щеголев, А.Д. Лемякин, А.А. Чаицкий, К.Д. Сабетова, И.А. Кофиади, С. Г. Белокуров // Аграрная наука. 2022. № 10. С. 77-85. [Schiogolev PO, Lemyakin AD, Chaitskiy AA, Sabetova KD, Kofiadi IA, Belokurov SG. Polymorphism of the kappa-casein gene in dairy cattle populations of the Kostroma region and its effect on dairy productivity of cows. Agrarian Science. 2022;10:77-85. (*In Russ.*)]. doi: 10.32634/0869-8155-2022-363-10-77-85

11. Таксономический состав микробиома рубцовой жидкости телят мясной породы при дополнительном включении в жировой рацион УДЧ железа: пат. 2022620671 Рос. Федерация / Г.К. Дускаев, Е.В. Шейда, В.А. Рязанов, С.А. Мирошников, Ш.Г. Рахматуллин. Заявл. 24.03.2022; опубл. 29.03.2022, Бюл. № 4. [Duskaev GK, Shejda EV, Rjazanov VA, Miroshnikov SA, Rahmatullin ShG. Taksonomicheskij sostav mikrobioma rubcовой zhidkosti teljat mjasnoj porody pri dopolnitel'nom vkljuchenii v zhirovoj racion UDCh zheleza: pat. 2022620671 Ros. Federatsiya. Zayavl. 24.03.2022; opubl. 29.03.2022, Byul. № 4. (*In Russ.*)].

12. Чернова Е.Н., Ястребова О.Н., Чернов И.С. Влияние органических солей биометаллов на рубцовое пищеварение и молочную продуктивность коров // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 221. № 1. С. 246-

249. [Chernova EN, Yastrebova ON, Chernov IS. The influence of organic salts bimetallic on the scar digestion and milk production of cows. Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2015;221(1):246-249. (In Russ.)].

13. Farghali M, Andriamanohiarisoamanana FJ, Ahmed MM, Kotb S, Yamashiro T, Iwasaki M, Umetsu K. Impacts of iron oxide and titanium dioxide nanoparticles on biogas production: Hydrogen sulfide mitigation, process stability, and prospective challenges. J Environ Manage. 2019;240:160-167. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.089

14. Kaczmarek B, Adaszek Ł, Miętkiewska K. Effect of mineral deficiencies on the red blood cell parameters in cattle. Medycyna Weterynaryjna. 2021;77(10):480-483. doi: 10.21521/mw.6570

15. Lu C-W, Lee Y-C, Kuo C-S, Chiang C-H, Chang H-H, Huang K-C. Association of serum levels of zinc, copper, and iron with risk of metabolic syndrome. Nutrients. 2021;13(2):548. doi: 10.3390/nu13020548

16. Ron EZ, Rosenberg E. Enhanced bioremediation of oil spills in the sea. Curr Opin Biotechnol. 2014;27:191-194. doi: 10.1016/j.copbio.2014.02.004

17. Scherf L, Kretschmann J, Fischer M, Mielenz N, Möbius G, Getto S, Kaiser M, Müller H, Bittner L, Baumgartner W, Starke A. Thermographic monitoring of skin surface temperature associated with hot-iron disbudding in calves. Schweiz Arch Tierheilkd. 2020;162(3):174-184. doi: 10.17236/sat00251

18. Singh D, Malik K, Sindhu M, Kumari N, Rani V, Mehta S, Malik K, Ranga P, Sharma K, Dhull N, Malik S, Arya N. Biostimulation of anaerobic digestion using iron oxide nanoparticles (IONPs) for increasing biogas production from cattle manure. Nanomaterials (Basel). 2022;12(3):497. doi: 10.3390/nano12030497

19. Wang Y, Jiang M, Zhang Z, Sun H. Effects of over-load iron on nutrient digestibility, haemato-biochemistry, rumen fermentation and bacterial communities in sheep. J Anim Physiol Anim Nutr (Berl). 2020;104(1):32-43. doi: 10.1111/jpn.13225

20. Weerts J, Barandiaran Aizpurua MA, Brouwers JHM, Mevenkamp J, Schroen BLM, Knackstedt C, M Houben AJH, Schrauwen-Hinderling VB, Van Empel VPM. Effect of iron deficiency on skeletal muscle metabolism in heart failure with preserved ejection fraction. European Heart Journal. 2022;43(2):ehac544.778. doi: 10.1093/eurheartj/ehac544.778

21. Xuan NH, Loc HT, Ngu NT. Blood biochemical profiles of Brahman crossbred cattle supplemented with different protein and energy sources. Vet World. 2018;11(7):1021-1024. doi: 10.14202/vetworld.2018.1021-1024

References

1. Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Shoshina OV. Adaptive responses of cattle digestive system as influenced by dietary ultrafine iron particles combined with fat diets. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]. 2022;57(2):328-342. doi: 10.15389/agrobiol.2022.2.328eng

2. Batoev CZh. Physiology of bird digestion. Ulan-Ude: Publishing House of Buryat State University; 2001:214 p.

3. Levakhin YuI, Nurzhanov BS, Ryazanov VA, Dzhulamanov EB. Changes in the microbiocenosis of the rumen and digestibility of the dry matter of the diet with the introduction of gobies together fatty addition of ultrafine iron particles. Agrarian Bulletin of the Urals. 2020a;192(1):53-59. doi: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-53-59.

4. Kokoeva AT, Kokoeva AIT, Nogaeva VV. Technological bases of beef production with the use of nanopowder iron (Conference proceedings) Prospects for next-generation food production: materials of All-Russian scientific and research conference with international participation, (Omsk, 13-14 Apr. 2017). Omsk: Omsk SAU named after P.A. Stolypin; 2017:69-72.

5. Manner K, Hundhauzen H. Bioavailability of chelate-based micro nutrients. Animal Husbandry of Russia. 2016;S2:67-68.

6. Murphy R. Trace minerals, feeds and lack of minerals in diet: how the form of a trace mineral influences feed quality and animal health. *Animal Husbandry of Russia*. 2019;4:41-44.
7. Kalashnikov AP, Fisinin VI, Shcheglova VV, Kleimenova NI. Norms and rations of feeding of farm animals: reference. manual 3rd ed., add. and reprint. M., 2003;110-123.
8. Potemina TE, Volkova SA, Kuznetsova SV, Pereshein AV. General issues of iron metabolism and pathogenesis of iron deficiency anemia. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ" (Rehabilitation, doctor and health)*. 2020;3(45):125-137.
9. Levahin YuI, Nurzhanov BS, Dzhamulanov EB, Ryazanov VA. Features of cicatricial digestion in fattening gobies when using a fat supplement enriched with ultrafine particles of Fe (Conference proceedings) Innovative activity as a factor in the development of the agro-industrial complex in modern conditions: Materials of All-Russian scientific and research conference, (Grozny, 28-29 February 2020). Grozny: ChSU named after A.A. Kadyrov. 2020b;242-246. doi: 10.36684/22-2020-1-242-246
10. Schiogolev PO, Lemyakin AD, Chaitskiy AA, Sabetova KD, Kofiadi IA, Belokurov SG. Polymorphism of the kappa-casein gene in dairy cattle populations of the Kostroma region and its effect on dairy productivity of cows. *Agrarian Science*. 2022;10:77-85. doi: 10.32634/0869-8155-2022-363-10-77-85
11. Duskaev GK, Shejda EV, Rjazanov VA, Miroshnikov SA, Rahmatullin ShG. Taxonomic composition of the microbiome in ruminal fluid of beef calves with the additional inclusion of iron UFP in the fat diet: pat. 2022620671 Rus. Federation. Filing 24.03.2022; Publ. 29.03.2022, Bull. Number 4.
12. Chernova EN, Yastrebova ON, Chernov IS. The influence of organic salts bimetallic on the scar digestion and milk production of cows. *Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2015;221(1):246-249.
13. Farghali M, Andriamanohiarisoamanana FJ, Ahmed MM, Kotb S, Yamashiro T, Iwasaki M, Umetsu K. Impacts of iron oxide and titanium dioxide nanoparticles on biogas production: Hydrogen sulfide mitigation, process stability, and prospective challenges. *J Environ Manage*. 2019;240:160-167. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.03.089
14. Kaczmarek B, Adaszek Ł, Miętkiewska K. Effect of mineral deficiencies on the red blood cell parameters in cattle. *Medycyna Weterynaryjna*. 2021;77(10):480-483. doi: 10.21521/mw.6570
15. Lu C-W, Lee Y-C, Kuo C-S, Chiang C-H, Chang H-H, Huang K-C. Association of serum levels of zinc, copper, and iron with risk of metabolic syndrome. *Nutrients*. 2021;13(2):548. doi: 10.3390/nu13020548
16. Ron EZ, Rosenberg E. Enhanced bioremediation of oil spills in the sea. *Curr Opin Biotechnol*. 2014;27:191-194. doi: 10.1016/j.copbio.2014.02.004
17. Scherf L, Kretschmann J, Fischer M, Mielenz N, Möbius G, Getto S, Kaiser M, Müller H, Bittner L, Baumgartner W, Starke A. Thermographic monitoring of skin surface temperature associated with hot-iron disbudding in calves. *Schweiz Arch Tierheilkd*. 2020;162(3):174-184. doi: 10.17236/sat00251
18. Singh D, Malik K, Sindhu M, Kumari N, Rani V, Mehta S, Malik K, Ranga P, Sharma K, Dhull N, Malik S, Arya N. Biostimulation of anaerobic digestion using iron oxide nanoparticles (IONPs) for increasing biogas production from cattle manure. *Nanomaterials (Basel)*. 2022;12(3):497. doi: 10.3390/nano12030497
19. Wang Y, Jiang M, Zhang Z, Sun H. Effects of over-load iron on nutrient digestibility, haemato-biochemistry, rumen fermentation and bacterial communities in sheep. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*. 2020;104(1):32-43. doi: 10.1111/jpn.13225
20. Weerts J, Barandiaran Aizpurua MA, Brouwers JHM, Mevenkamp J, Schroen BLM, Knackstedt C, M Houben AJH, Schrauwen-Hinderling VB, Van Empel VPM. Effect of iron deficiency on skeletal muscle metabolism in heart failure with preserved ejection fraction. *European Heart Journal*. 2022;43(2):ehac544.778. doi: 10.1093/eurheartj/ehac544.778
21. Xuan NH, Loc HT, Ngu NT. Blood biochemical profiles of Brahman crossbred cattle supplemented with different protein and energy sources. *Vet World*. 2018;11(7):1021-1024. doi: 10.14202/vetworld.2018.1021-1024

Информация об авторах:

Святослав Валерьевич Лебедев, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-912-345-87-38.

Елена Владимировна Шейда, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-9228-62-64-02.

Оксана Вячеславовна Шошина, аспирант 3-го года обучения, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-987-891-96-55.

Вера Ивановна Корнейченко, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Испытательного центра, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 30-81-77.

Information about the authors:

Svyatoslav V Lebedev, Dr. Sci. (Biology), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-912-345-87-38.

Elena V Sheyda, Cand. Sci (Biology), Researcher, Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-922-862-64-02.

Oksana V Shoshina, 3st year postgraduate student, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-987-891-96-55.

Vera I Korneychenko, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of the Test Centre CUC, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, 8(3532)30-81-77.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023; одобрена после рецензирования 10.03.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 23.01.2023; approved after reviewing 10.03.2023; accepted for publication 20.03.2023.