

Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 3. С. 36-50.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2025. Vol. 108. No. 3. P. 36-50.

Научная статья

УДК 636.087:591.132.7

doi:10.33284/2658-3135-108-3-36

Стратегия снижения метанообразования в рубце жвачных с использованием алиментарных факторов

Елена Владимировна Шейда¹, Сергей Александрович Мирошников²,
Галимжан Калиханович Дускаев³, Иван Сергеевич Мирошников⁴

^{1,3,4}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

¹elena-shejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

²sergey_ru01@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

³gduskaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

⁴sparco911@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0190-0612>

Аннотация. В своем исследовании мы провели оценку влияния различных алиментарных факторов на интенсивность метаболических процессов и метанообразование в рубце жвачных. Исследования проводили методом *in vitro*. Нативная рубцовая жидкость, используемая в качестве объекта исследования, была получена через три часа после кормления основным рационом через фистулу рубца у бычков породы казахская белоголовая возрастом 11-12 месяцев. В качестве испытуемого растительного субстрата использовали отходы маслоперерабатывающих предприятий – подсолнечную лузгу, подвергнутую механическому измельчению, физической (кавитация) и ферментативной обработке (в биореакторе), а также обогащенную ультрадисперсными частицами. Уровень летучих жирных кислот и концентрации метана в содержимом рубца определялся методом газовой хроматографии. На основании проведенных исследований, нами установлено, что дополнительное включение в состав основного рациона жвачных животных минеральных препаратов в виде ультрадисперсных частиц, а также предварительное разложение труднопереваримых кормовых субстратов (лузга подсолнечника) способствует усилению интенсивности метаболических процессов в рубце, что привело к увеличению переваримости питательных веществ. При этом химическая и физическая обработки кормового субстрата снизили производство метана в рубце и тем самым нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, метанообразование, рубец, ферментация, ферментер, кавитация, ультрадисперсные частицы, летучие жирные кислоты

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-16-00088.

Для цитирования: Стратегия снижения метанообразования в рубце жвачных с использованием алиментарных факторов / Е.В. Шейда, С.А. Мирошников, Г.К. Дускаев, И.С. Мирошников // Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 3. С. 36-50. [Sheida EV, Miroshnikov SA, Duskaev GK, Miroshnikov IS. A strategy for reducing methane formation in the rumen of ruminants using alimentary factors. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(3):36-50. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-3-36>

Original article

A strategy for reducing methane formation in the rumen of ruminants using alimentary factors

Elena V Sheida¹, Sergey A Miroshnikov², Galimzhan K Duskaev³, Ivan S Miroshnikov⁴

^{1,3,4}Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

²Orenburg State University, Orenburg, Russia

¹elena-shejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

²sergey_ru01@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

³gduskaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9015-8367>

⁴sparco911@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0190-0612>

Abstract. In our study, we evaluated the influence of various nutritional factors on the intensity of metabolic processes and methane formation in the rumen of ruminants. The studies were conducted using the *in vitro* method. The native rumen fluid used as the object of the study was obtained three hours after feeding the main diet through a rumen fistula in Kazakh White-Headed bull calves, aged 11-12 months. The tested plant substrate was waste from oil processing plants – sunflower husk, subjected to mechanical grinding, physical (cavitation) and enzymatic treatment (in a bioreactor), as well as enriched with ultrafine particles. The level of volatile fatty acids and the concentration of methane in the contents of the rumen was determined by gas chromatography. Based on our research, we found that the additional inclusion of mineral preparations in the form of ultrafine particles in the main diet of ruminants, as well as the preliminary decomposition of indigestible feed substrates (sunflower husks), enhances the intensity of metabolic processes in the rumen of ruminants, which led to an increase in the digestibility of nutrients. At the same time, chemical and physical treatment of the feed substrate reduced the production of methane in the rumen and thus the environmental impact.

Keywords: cattle, methane formation, rumen, fermentation, fermenter, cavitation, ultrafine particles, volatile fatty acids

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 20-16-00088.

For citation: Sheida EV, Miroshnikov SA, Duskaev GK, Miroshnikov IS. A strategy for reducing methane formation in the rumen of ruminants using alimentary factors. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2025;108(3):36-50. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-3-36>

Введение.

Сельское хозяйство способствует около 10-12 % антропогенных выбросов парниковых газов, при этом на животноводство приходится почти 80 % в этой сфере. Это особенно связано с образованием метана в результате рубцовой ферментации кормов. Производство метана жвачными вызывает озабоченность во всем мире из-за накопления парниковых газов в атмосфере, а также из-за потери энергии, потребляемой животными.

Метан является побочным продуктом пищеварения жвачных животных, вырабатываемым метаногенными микроорганизмами *Archaea* в процессе, называемом ферментацией или метаногенезом. Крупный рогатый скот производит примерно в 7 и 9 раз больше метана, чем овцы и козы соответственно, вырабатывается он в основном в рубце (87-90 %) и, в меньшей степени (13-10 %), в толстом кишечнике. Скорость и тип ферментации зависят от многих различных факторов, при этом на выбросы метана в большей степени оказывает влияние уровень потребления корма, тип углеводов в рационе, обработка корма и наличие в рационах дополнительных ингредиентов (Getabalew M et al., 2019).

Экосистема рубца представляет собой анаэробную среду, в которой происходит деградация растительного корма. Переваривание компонентов корма микробиотой (бактериями, простейшими, грибами) приводит к образованию летучих жирных кислот. Эти кислоты, в основном ацетат, пропионат и бутират, используются животным в качестве источника энергии. Во время данного

процесса также образуются газы, и их продукция устраняется в основном посредством отрыжки, углекислый газ (CO_2) и водород (H_2) используются для образования метана. Все газы, образующиеся в рубце в процессе метаногенеза, помимо их негативного влияния на окружающую среду способствуют потере 2-15 % валового потребления энергии для животного. Состав корма или его качество влияют на производство метана у жвачных животных. Пищеварение в рубце зависит от активности микроорганизмов, которым необходимы энергия, азот и минералы (Getabalew M et al., 2020).

Желудочно-кишечный тракт жвачных животных густонаселен различными микроорганизмами, которые играют критическую функциональную роль в обеспечении животного питательными веществами и поддержании процессов жизнедеятельности. Микробное сообщество рубца отличается высоким разнообразием, которое эволюционировало с хозяином в течение миллионов лет, чтобы обеспечить наличие определенных метаболических функций, необходимых для выживания, здоровья, роста и развития. Наряду с бактериями в рубце существуют грибы, метаногенные археи и простейшие. Микробиота выполняет основные физиологические функции, включая переваривание и метаболизм пищевых компонентов, для получения энергии, усвоения основных белков (65-85 %) и удовлетворения энергетических (около 80 %) потребностей хозяина. Благодаря их вкладу в развитие рубцовой микрофлоры и физиологии пищеварения, рубцовые микробы считаются одним из решающих факторов, влияющих на эффективность конверсии корма у жвачных животных. Любое изменение в микробиоме рубца оказывает воздействие на течение физиологических процессов в организме (Hassan FU et al., 2020). Микроорганизмы рубца в основном анаэробны и в процессе рубцовой ферментации производят различные вещества, которые используются самим хозяином или другими микроорганизмами. Метан образуется при участии метаболического водорода в рубцовой ферментации.

Для максимального ускорения метаболических процессов водород в рубцовой жидкости превращается из ЛЖК, что повышает продуктивность жвачных животных и сокращает объем выбросов метана в окружающую среду. Понимание микробного разнообразия и метаболических процессов в рубце имеет огромное значение для оптимизации эффективности использования кормов и снижения выбросов парниковых газов в атмосферу. Существуют разные стратегии для регулирования обменных процессов в рубце, например, управление микробиомом, предполагающее изменение рациона и применение различных кормовых добавок (Ahmed MG et al., 2024).

Цель исследований.

Изучить влияние различных кормовых добавок на интенсивность течения метаболических процессов и образования метана в рубце жвачных.

Материалы и методы исследований.

Объект исследования. Рубцовая жидкость, полученная от фистулированных бычков казахской белоголовой породы в возрасте 18 мес. Пробы воздуха из рабочих емкостей инкубатора и ферментера для определения метана.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Все процедуры над животными были выполнены в соответствии с правилами Комитета по этике животных ФНЦ БСТ РАН.

Схема эксперимента. Экспериментальные исследования проводились в период 2020-2024 гг. в Федеральном научном центре биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (ФНЦ БСТ РАН), опыты были направлены на поиск различных кормовых добавок, оказывающих влияние на метаболические процессы в рубце жвачных и интенсивность метанообразования.

Исследования химического состава испытуемых образцов производили после инкубации методом *in vitro* с помощью установки – инкубатора «ANKOM DaisyII» (модификации D200 и D200I; ANKOM Technology, США) по специализированной методике. В качестве дисперсионной среды была выбрана дистиллированная вода. Каждый эксперимент был проведен в четырех повторностях. Уровень летучих жирных кислот (ЛЖК) в содержимом рубца определяли методом газовой хроматографии на хроматографе газовом «Кристаллюкс-4000М», определение уровня метана осуществляли на приборе «Кристаллюкс-2000М», фирма изготовитель: СКБ Хроматек (Россия) методом газовой хроматографии.

В наших исследованиях были проведены три серии экспериментов (табл. 1).

Таблица 1. Схема эксперимента
Table 1. The scheme of the experiment

№ серии/ No series	Цель исследования / The purpose of the study	Объект изучения / The object of study	Спецификация / Specification
1	2	3	4
1	Изучение влияния кавитационной обработки лузги подсолнечника и ультрадисперсных частиц цинка в различных дозах на течение метаболических процессов в рубце и метанообразование / <i>Study of the effect of cavitation treatment of sunflower husks and ultrafine zinc particles in various doses on the course of metabolic processes in the rumen and methane formation</i>	Ультрадисперсные частицы цинка (Zn – размер 90 нм, удельная поверхность 5,34 Суд, м ² /г, полученные методом электрического взрыва проводника в атмосфере аргона), содержали 90 % Zn (ООО «Платина», г. Москва) / <i>Ultrafine zinc particles (Zn – size 90 nm, specific surface area 5.34 Sh,m²/g, obtained by the method of electric explosion of a conductor in an argon atmosphere) contained 90% Zn (Platina LLC, Moscow)</i>	I (контрольный образец) – лузга подсолнечника механически измельченная Опытные образцы – измельченная лузга (механическое измельчение + гидромодуль (вода) + обработка ультразвуком (УЗ) при +20 °С, 15 минут, 27 кГц) + УДЧ Zn в дозе 1,5 мг/кг СВ кормового субстрата – II образец; 3,0 – III образец; 6,0 – IV образец / <i>I (control sample) – mechanically crushed sunflower husk Prototypes – crushed husk (mechanical crushing + hydromodule (water) + ultrasonic treatment at +20 °C, 15 minutes, 27 kHz) + UDP Zn in mg/kg of SV feed substrate at a dose of 1.5 – II sample; 3.0 – III sample; 6.0 – IV sample</i>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
2	Изучение микробиома рубца при использовании УДЧ форм минералов / <i>Study of the rumen microbiome using UDP forms of minerals</i>	Ультрадисперсные частицы (УДЧ) Fe ($d=90$ нм, Z-потенциал $7,7\pm0,5$ мВ), содержали 99,8 % Fe; Cr_2O_3 ($d=91$ нм, удельная поверхность -9 м ² /г, Z-потенциал $-93\pm0,53$ мВ), содержали 99,8 % Cr, получены методом плазмохимического синтеза (ООО «Платина», г. Москва). / <i>Ultrafine particles (UDP) Fe ($d=90$ nm, Z-potential 7.7 ± 0.5 mV), contained 99.8% Fe; Cr_2O_3 ($d=91$ nm, specific surface area -9 m²/g, Z-potential -93 ± 0.53 mV), contained 99.8% Cr, were obtained by plasmochemical synthesis (Platina LLC, Moscow)</i>	Контрольная группа – основной рацион (ОР); I – ОР+ УДЧ Fe в дозе 1,4 мг/кг корма; II – ОР + УДЧ Cr_2O_3 в дозе 200 мкг/кг корма / <i>Control group – basic diet (BD); I – BD+ UDP of Fe in a dose of 1.4 mg/kg of fodder; II – BD+ UDP of Cr_2O_3 in a dose of mcg/kg of fodder</i>
3	Изучение влияния непрерывной ферментации на эффективность разложения отходов производств и снижения эмиссии метана в окружающую среду / <i>Study of the effect of continuous fermentation on the efficiency of industrial waste decomposition and reduction of methane emissions into the environment</i>	Лузга без обработки – механически измельченная до дисперсии 1-2 мм; Лузга кавитированная (ЛК); Лузга ферментированная (ЛФ) / <i>Husk without processing – mechanically crushed to a dispersion of 1-2 mm; Cavitated husk (CH); Fermented husk (FH)</i>	Кавитацию лузги проводили по схеме – механическое измельчение + гидромодуль (вода) + обработка УЗ при $+20$ °C, 15 минут, 27 кГц; ферментацию лузги подсолнечника осуществляли в течение 9 суток непрерывной ферментации без дополнительного включения лузги / <i>Husk cavitation was carried out according to the scheme – mechanical grinding + hydromodule (water) + ultrasonic treatment at $+20$ °C, 15 minutes, 27 kHz; sunflower husk fermentation was carried out during 9 days of continuous fermentation without additional inclusion of husk</i>
каждый образец корма был протестирован в трехкратной повторности / <i>each feed sample was tested three times.</i>			

Для осуществления третьей серии экспериментов коллективом авторов была разработана конструкция биореактора. Ферментацию осуществляли в течение 15 суток непрерывной ферментации без дополнительного включения субстрата.

Ферментер заполняли на 80 % от объема емкости ($V=100$ л), причем $2/3$ этого объема загружали опытными кормовым субстратом. Ферментация в биореакторе была проведена на растительном субстрате (отходы масложировой промышленности) – лузга подсолнечника. Образцы лузги высушивали ($+60$ °C) до константного веса.

Жидкую часть ферментера представляла рубцовая жидкость, полученная от бычков породы казахская белоголовая с хронической фистулой рубца ($n=4$), возраст – 18 месяцев.

Подготовку лузги подсолнечника проводили методом непрерывной ферментации в биореакторе в течение 15 суток, однако опытным путем учета интенсивности метаболических процессов в содержимом биореактора было установлена эффективная деградация лузги в течение 9 суток, далее процессы ингибировались.

Оборудование и технические средства. Лабораторные исследования проводили с использованием приборной базы Испытательного центра ЦКП ФНЦ БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Анализ микробиоты содержимого рубца проводили с помощью MiSeq («Illumina», США) методом секвенирования нового поколения (NGS) с набором реагентов MiSeq® Reagent Kit v3 (600 cycle) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» (Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН, г. Оренбург). Кавитационную обработку проводили с помощью ультразвукового диспергатора УЗД2-0,4/22, УЗПМ, Россия. Для ферментации использовали биореактор УПЭСм-0,05/3,0н/с (ООО «Основа», г. Москва, Россия).

Статистическая обработка. Численные данные были обработаны с помощью программы SPSS «Statistics 20» («IBM», США), рассчитывали средние (M), среднеквадратичные отклонения ($\pm\sigma$), ошибки стандартного отклонения ($\pm SE$). Для сравнения вариантов использовали непараметрический метод анализа. Различия считали статистически значимыми при $P\leq 0,05$, $P\leq 0,01$, $P\leq 0,001$.

Результаты исследований.

Анализ данных первой серии экспериментов показал, что физическая обработка ультразвуком при $+20$ °C, 15 минут, 27 кГц подсолнечной лузги наряду с механической способствовала лучшей переваримости СВ на 19,0 % ($P\leq 0,05$). Дополнительное включение УДЧ цинка в кавитированную лузгу подсолнечника при инкубировании в «искусственном рубце» еще больше улучшало переваримость СВ на 21,9-22,4 % относительно контрольного образца. Переваримость СВ лузги подсолнечника при включении цинка составила 43,1-43,6 %, при сравнении в контрольном образце переваримость составила 21,2 %.

Самая высокая концентрация летучих жирных кислот в рубцовой жидкости была в образце с включением УДЧ цинка в концентрации 3,0 мг на кг сухого вещества субстрата, при этом количество ЛЖК было выше, чем в контрольном образце в 2,4 раза (табл. 2). В 1 образце (контрольном) отмечена самая низкая концентрация ЛЖК, что свидетельствовало об уменьшении активности рубцовой микробиоты и привело к снижению переваримости сухого вещества кормового субстрата при сравнении с опытными образцами.

Таблица 2. Концентрация летучих жирных кислот при использовании УДЧ цинка, ммоль/л, $n=3$

Table 2. Concentration of volatile fatty acids when using ultrafine particle of zinc, mmol/l, $n=3$

Наименование образца / Sample	Летучие жирные кислоты, ммоль/л / Volatile fatty acids, mmol/l		
	уксусная / Acetic	пропионовая / Propionic acid	масляная / Butyric
1	56,4 $\pm$ 0,06	58,3 $\pm$ 0,08	51,3 $\pm$ 0,06
2	99,5 $\pm$ 0,09*	114,9 $\pm$ 0,10*	86,1 $\pm$ 0,02*
3	129,9 $\pm$ 0,12*	160,8 $\pm$ 0,04**	113,7 $\pm$ 0,10**
4	145,2 $\pm$ 0,18*	185,7 $\pm$ 0,04**	125,4 $\pm$ 0,09**

Примечание: * – $P\leq 0,05$; ** – $P\leq 0,01$ при сравнении с контрольной группой

Note: * – $P\leq 0,05$; ** – $P\leq 0,01$ when compared with the control group

Кавитационная обработка кормового субстрата и дополнительное включение УДЧ цинка способствовали снижению метанообразования в рубце жвачных. Так, в опытных образцах концентрация метана при 48-часовом инкубировании была ниже на 69,2-72,0 % ($P \leq 0,05$) относительно контрольного образца (рис. 1). Причем следует отметить прямую связь повышения концентрации цинка с снижением концентрации метана в рубцовой жидкости.



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

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

Рисунок 1. Концентрация метана при использовании УДЧ цинка, ммоль/л, n=3

Figure 1. Methane concentration when using UDP of zinc, mmol/l, n=3

Метагеномное секвенирование рубцовой жидкости контрольного образца во второй серии экспериментов показало доминирование филумов *Firmicutes* (17,0 %), *Bacteroidetes* (50,0 %), *Verrucomicrobia* (13,0 %), *Proteobacteria* (10,0 %), ответственных за трансформацию основных компонентов рациона – целлюлозу, гемицеллюлозу, крахмал, органические кислоты, белки. При этом как в контрольном образце, так и в опытных количество филумов было одинаковым, и составило 12 филумов, однако численность каждого из них не превышала 1,5 %.

Дополнительное включение УДЧ железа способствовало снижению общей численности микроорганизмов в рубцовой жидкости, при этом также доминирующими являлись бактерии филума *Bacteroidetes* (56,0 %), *Firmicutes* (16,0 %), *Verrucomicrobia* (11,0 %), *Proteobacteria* (9,0 %). Дополнительное включение УДЧ хрома показало преобладание бактерий филумов *Bacteroidetes* (58,0 %), *Firmicutes* (15,0 %), *Proteobacteria* (9,0 %) и *Verrucomicrobia* (11,0 %). Как в контрольной, так и опытных группах отмечено преобладание классов *Bacteroidia*, *Clostridia* и *Negativicutes*, однако следует отметить, что в контрольной группе общая численность бактерий была значительно выше, чем в опытных группах.

Дополнительное включение НЧ способствовало увеличению численности бактерий семейств *Prevotellaceae* на 4,0 % (Fe) и 9,0 % (Cr_2O_3) относительно контроля, а также *Selenomonadaceae*, *unclassified_Bacteroidales* и *unclassified_Bacteria*.

Метан вырабатывается в рубце и слепой кишке животных группой архей, известных под общим названием метаногены, которые относятся к типу *Euryarcheota*. Наибольшее производство метана наблюдается у жвачных животных, поскольку метаногены способны свободно производить метан в ходе нормального процесса переваривания корма. В исследованиях при добавлении УДЧ железа и хрома отмечено снижение в рубцовой жидкости домена архей, в частности представителей *Methanobrevibacter* на 0,9 и 0,8 %, *Methanosphaera* – на 0,13 и 0,08 % и *Methanomicrobium* – на 0,02 и 0,07 % соответственно при включении железа и хрома (рис. 2). Установлено, что при включении УДЧ железа и хрома численность представителей метанообразующего класса *Methanobacteria* снижалась, концентрация в группе в присутствии железа была ниже на 11,6 % относительно контроля, а при введении УДЧ хрома – на 6,4 % ($P \leq 0,05$). Численность представителей класса *Methanomicrobia* в опытных группах относительно контроля также достоверно снижалась на 9,7 % в присутствии Cr_2O_3 и на 2,8 % – в присутствии Fe ($P \leq 0,01$).

Анализ концентрации метана показал, что включение УДЧ способствовало достоверному снижению уровня метана в опытных группах относительно контрольной на 64,2 % в присутствии хрома и на 44,8 % в присутствии железа ($P \leq 0,001$) (рис. 3).

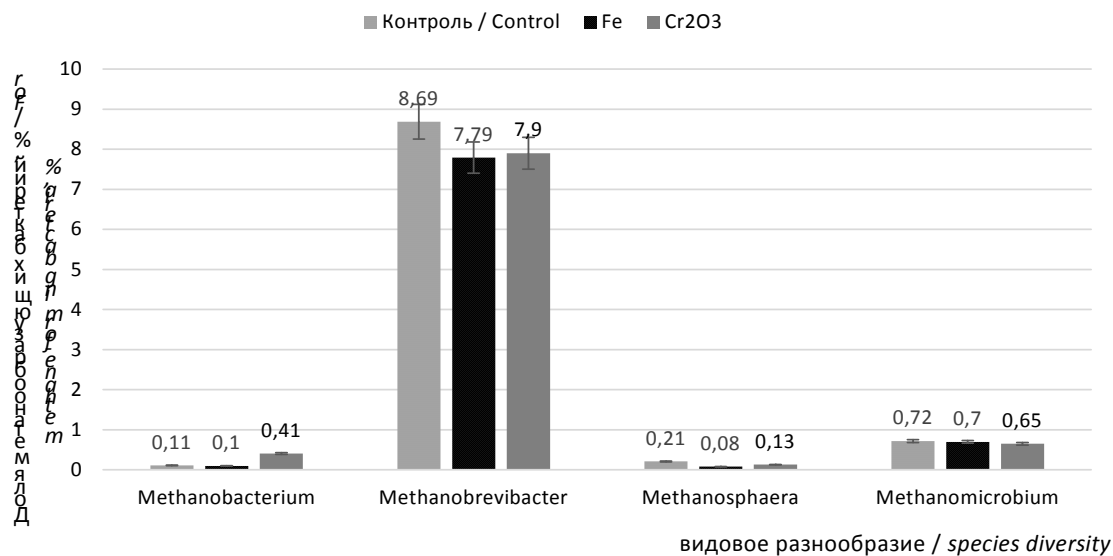
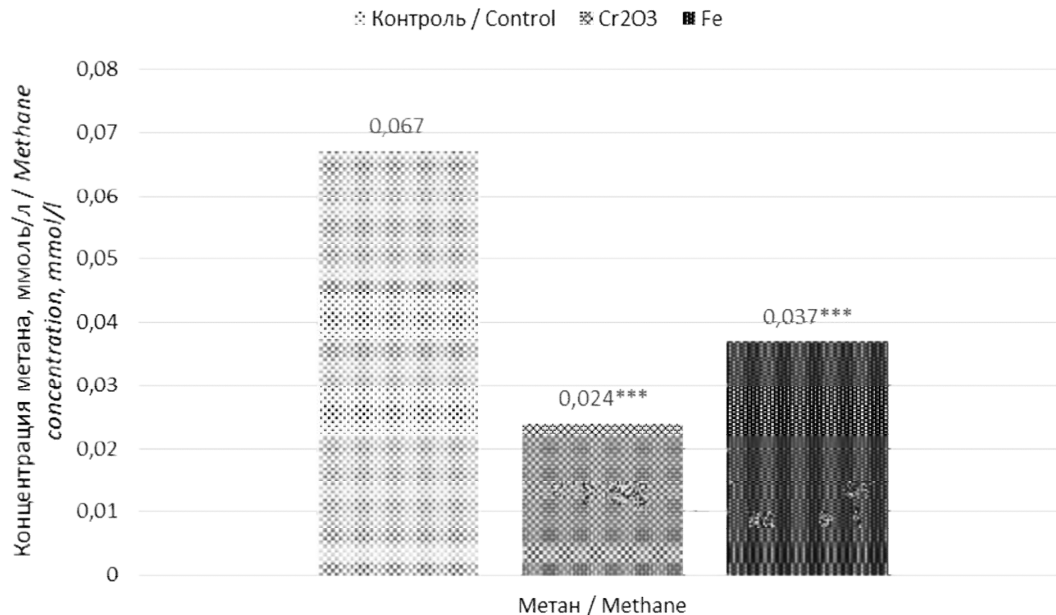


Рисунок 2. Таксономическое разнообразие домена Archaea рубца, %
 Figure 2. Taxonomic diversity of the Archaea rumen domain, %



Примечание: *** – $P \leq 0,001$ при сравнении с контрольной группой
 Note: *** – $P \leq 0,001$ when compared with the control group

Рисунок 3. Концентрация метана при включении в рацион УДЧ Cr_2O_3 и Fe, ммоль/л
 Figure 3. Methane concentration when included the UDP of Cr_2O_3 and Fe into the diet, mmol/l

После подготовки кормовых субстратов различными способами они были протестированы в системе искусственный рубец методом *in vitro*. В результате при разложении лузги подсолнечника в биореакторе было отмечено повышение переваримости СВ после 48-часовой инкубации составило более 20 % (табл. 3).

Таблица 3. Переваримость сухого вещества кормового субстрата *in vitro*, %, n=3Table 3. *In vitro* digestibility of the dry matter of the feed substrate, % n=3

Образец корма / <i>feed sample</i>	Переваримость СВ, % / <i>The digestibility of DM, %</i>
Лузга без обработки / <i>Unprocessed husk</i>	21,2±0,23
ЛК / <i>CH</i>	40,2±0,11*
Лузга ферментированная (ЛФ) / <i>FH</i>	43,1±0,51*

Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении с образцом без обработки

Note: * – $P \leq 0,05$ when compared with the sample without treatment

Ферментация растительного субстрата в биореакторе также способствовала увеличению интенсивности метаболических процессов в рубце, что сопровождалось повышением концентрации в рубцовой жидкости ЛЖК (табл. 4). Относительно образца лузги без обработки использование ферментированной лузги увеличивало концентрацию уксусной кислоты в 5,6 раз ($P \leq 0,01$), пропионовой – в 1,8 раз ($P \leq 0,05$), масляной – в 2 раза ($P \leq 0,05$), капроновой – в 5 раз ($P \leq 0,01$). Использование кавитированной лузги увеличивало общее содержание ЛЖК относительно образца без обработки в 2,8 раз ($P \leq 0,01$), при этом уровень уксусной кислоты увеличился в 2,2 раз ($P \leq 0,01$), пропионовой – в 3,4 раз ($P \leq 0,05$), масляной – в 5,7 раз ($P \leq 0,01$), валерьяновой – в 1,7 раз ($P \leq 0,05$) и капроновой – в 3,9 раз ($P \leq 0,05$).

Таблица 4. Концентрация летучих жирных кислот, ммоль/100 мл

Table 4. Concentration of volatile fatty acids, mmol/100 ml

Наименование образца / <i>the prototype</i>	Летучие жирные кислоты, ммоль/л / <i>Volatile fatty acids, mmol/l</i>				
	уксусная / <i>Acetic</i>	пропионовая / <i>Propionic</i>	масляная / <i>Butyric</i>	валерьяновая / <i>Valerianic</i>	капроновая / <i>Caproic</i>
Лузга б/о / <i>Unprocessed husk</i>	20,37±0,08	1,98±0,01	3,97±0,02	3,09±0,08	2,43±0,02
Лузга кавит. / <i>Cavitated husk (CH)</i>	44,7±0,14**	6,83±0,06*	22,6±0,14**	5,27±0,06*	9,59±0,11*
Лузга фермен. / <i>Fermented husk (FH)</i>	113,6±0,16**	3,5±0,02*	7,9±0,07*	2,05±0,02	11,9±0,11**

Примечание: * – $P \leq 0,05$, ** – $P \leq 0,01$ при сравнении с образцом без обработки

Note: * – $P \leq 0,05$, ** – $P \leq 0,01$ when compared with the sample without treatment

Концентрация метана при предварительной обработке лузги подсолнечника кавитацией и при разложении ее в биореакторе значительно снижалась относительно нативного образца на 67,2-69,4 % (рис. 4).

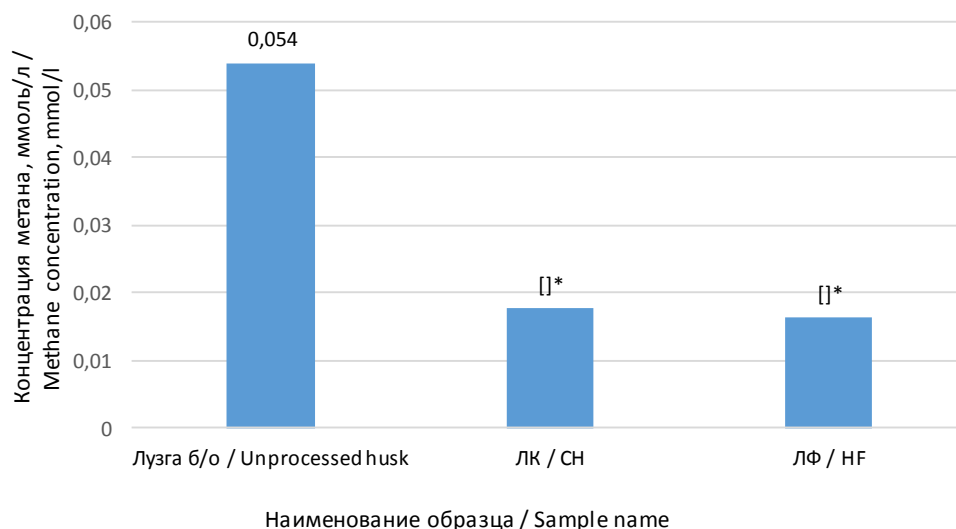


Рисунок 4. Концентрация метана при деградации лузги подсолнечника в инкубаторе в течение 48 часов, ммоль/л

Figure 4. Methane concentration during decomposition of sunflower husks in an incubator for 48 hours, mmol/l

Обсуждение полученных результатов.

Ввиду изменения климата вероятность получения стабильного урожая кормовых культур и кормов из них снижается, в связи с этим возникает потребность поиска дополнительных кормовых средств для восполнения кормовой базы (Левахин Г.И. и др., 2005). К таким альтернативным средствам относятся отходы сельскохозяйственного производства – лузга, фуззы, отруби и т. д. Лузга подсолнечника составляет примерно 20-30 % от общей массы семян в зависимости от сорта. Извлечение энергии из отходов маслоэкстракционных производств является старейшим и простейшим методом удовлетворения энергетических потребностей населения (Matin A et al., 2019). Однако чаще всего высушенная шелуха остается неиспользованной, хотя она представляет собой пригодную для использования сельскохозяйственную биомассу. Из-за низкого содержания влаги лузга может храниться в течение длительного времени без существенного ухудшения ее качества и питательной ценности (Bilandzija N et al., 2018), однако в России использование данного продукта находится на низком уровне.

Лузга подсолнечника является важным компонентом корма для животных, который активно используется в сельском хозяйстве и обладает рядом полезных свойств. Она богата клетчаткой, что способствует улучшению пищеварения у животных. Клетчатка помогает поддерживать здоровье кишечника и способствует продвижению кормовых масс по желудочно-кишечному тракту (Adeleke BS and Babalola OO, 2020). Лузга подсолнечника является хорошим источником энергии, что делает его ценным для рациона животных, особенно для крупного рогатого скота и свиней, кроме того, содержит некоторые микроэлементы и минералы, которые необходимы для нормального роста и развития животных (de Moraes Oliveira VR et al., 2016). Использование лузги подсолнечника в кормлении не только снижает затраты на корма, но и помогает утилизировать отходы, а также снижает выбросы метана в окружающую среду.

Необходимо отметить, что потребление животными кормов, богатых клетчаткой, способствует активизации рубцовой микрофлоры для ее расщепления, в связи с этим метаболизм в рубце идет более интенсивно, что сопровождается образованием ЛЖК (Угорец В.И. др., 2014; Дускаев Г.К. и др., 2019; Резниченко В.Г. и др., 2006). В данном случае подвергнутую обработке лузги подсолнечника можно рассматривать как перспективным дополнительным источником

веществ для животных.

Анализ литературы показал, что эпителий рубца активно поглощает цинк и играет важную роль в его метаболизме (Genther-Schroeder ON et al., 2025). Выявлено (Abdollahi M et al., 2020), что высокодисперсный оксид цинка увеличивает переваримость питательных веществ и концентрацию летучих жирных кислот в рубце, аналогичный эффект наблюдался в проведенном нами эксперименте. Вероятным механизмом действия в данном случае может быть то, что УДЧ цинка, влияя на микробиологическую ферментацию в рубце, могут изменять характер ферментации, тем самым увеличивая способность эпителиальных клеток рубца хозяина транспортировать жирные кислоты (Petrič D et al., 2024).

Ввиду того, что разные источники цинка, железа, хрома (например Zn-метионин, цитрат железа, пропионат хрома) и дозировка по-разному влияют на процессы ферментации (Chen F et al., 2020), это сказывается на образовании газов и выработку метана (Anam MS et al., 2023). В нашем случае УДЧ цинка способствовали снижению метанообразования.

Цитрат железа не оказывает никакого влияния на состав бактериального сообщества, метаногенные археи или выработку метана (Clemmons BA et al., 2020; Wu H et al., 2016).

Соединения хрома, активно изменяя микробиоту рубца и увеличивая концентрацию летучих жирных кислот, также имеют зависимость от источника вещества (Zhao C et al., 2023; Spears JW et al., 2024). Кроме того, установлено активное поглощение и внутриклеточное накопление соединений хрома метаноокисляющими бактериями (Enbaia S et al., 2021), что может влиять на уровень метана в биореакторе.

Ранее установлено, что в процессе анаэробного сбраживания твердых отходов кожевенных заводов (содержащих соединения хрома), вырабатывается ассоциацией бактерий отряда *Bacteroidales* (Agustini CB et al., 2020). Это согласуется с проведенными исследованиями, наблюдалось превалирование бактерий именно этого вида.

Кавитационная методика утилизации сельскохозяйственных отходов состоит в циклической обработке исходного сырья (навоза, птичьего помета, отходов боен) с помощью специального оборудования, создающего гидродинамическую кавитацию в рабочей среде. Гидродинамическая кавитация обладает определенными физическими и химическими характеристиками, которые разрушают патогенные микроорганизмы и изменяют структуру обрабатываемых материалов (Атландерова К.Н. и др., 2022). Гидродинамическая кавитация и ферменты могут значительно улучшить структурные и функциональные свойства отходов производства (рисовая шелуха) (Quan Z et al., 2025). В представленном эксперименте это сопровождалось увеличением уксусной и пропионовой кислот, а также снижением метанообразования.

Заключение.

Таким образом, физическая обработка подсолнечной лузги и дополнительное включение УДЧ цинка способствовала увеличению переваримости СВ; отмечен дозозависимый эффект УДЧ цинка в отношении концентрации летучих жирных кислот в рубцовой жидкости (более высокий при 3,0 мг на кг сухого вещества) и метанообразования (при добавлении УДЧ железа и хрома); установлено доминирование филума *Bacteroidetes* (более 50,0 %) на фоне введения УДЧ железа. Кавитация и ферментация лузги подсолнечника в биореакторе способствовала увеличению интенсивности метаболических процессов, что сопровождалось повышением общей концентрации ЛЖК в 2,8-4,4 раза, на фоне снижения концентрации метана на 67,2-69,4 %.

Список источников

1. Влияние лузги кавитированной на метаболит конечных продуктов ферментации, микробиом и физико-химические параметры рубца (in vitro) / К.Н. Атландерова, С.А. Мирошников, В.А. Рязанов, Г.К. Дускаев, Е.В. Шейда // Аграрная наука. 2022. № 12. С. 20-25. [Atlanderova KN,

Miroshnikov SA, Ryazanov VA, Duskaev GK, Sheida EV. Effect of cavitated husk on the metabolome of fermentation end products, microbiome and physicochemical parameters of the rumen (in vitro). *Agricultural Science*. 2022;12:20-25. (*In Russ.*). doi: 10.32634/0869-8155-2022-365-12-20-25

2. Использование пробиотиков и растительных экстрактов для улучшения продуктивности жвачных животных (обзор) / Г.К. Дускаев, Г.И. Левахин, В.Л. Королёв, Ф.Х. Сиразетдинов // *Животноводство и кормопроизводство*. 2019. Т. 102. № 1. С. 136-148. [Duskaev GK, Levakhin GI, Korolyov VL, Sirazetdinov FK. Use of probiotics and plant extracts to improve the productivity of ruminants (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(1):136-148. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-102-1-136

3. Левахин Г.И., Айрих В.А., Дускаев Г.К. Главное внимание созданию устойчивой кормовой базы // *Молочное и мясное скотоводство*. 2005. № 6. С. 27-29. [Levakhin GI, Ayrich VA, Duskaev GK. Glavnoe vnimanie sozdaniju ustojchivoj kormovoj bazy. *Dairy and Beef Cattle Breeding*. 2005;6:27-29. (*In Russ.*).

4. Резниченко В.Г., Дускаев Г.К., Киржаев В.В. Зависимость концентрации аммиака в рубце от техники скармливания корма // *Вестник мясного скотоводства*. 2006. Т. 2. № 59. С. 42-43. [Reznichenko VG, Duskaev GK, Kirzhaev V. Zavisimost' koncentracii ammiaka v rubce ot tehniki skarmlivaniya korma. *Herald of Beef Cattle Breeding*. 2006;2(59):42-43. (*In Russ.*).

5. Угорец В.И., Албегонова Р.Д., Икоева Л.П. Влияние характера кормления на показатели крови и рубцовое пищеварение бычков // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2014. Т. 51. № 2. С. 98-103. [Ugorets VI, Albegonova RD, Ikoeva LP. Effect of feeding nature on blood indices and bulls' ruminal digestion. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2014;51(2):98-103. (*In Russ.*).

6. Abdollahi M, Rezaei J, Fazaeli H. Performance, rumen fermentation, blood minerals, leukocyte and antioxidant capacity of young Holstein calves receiving high-surface ZnO instead of common ZnO. *Arch Anim Nutr*. 2020;74(3):189-205. doi: 10.1080/1745039X.2019.1690389

7. Agustini CB, da Costa M, Gutterres M. Biogas from tannery solid waste anaerobic digestion is driven by the association of the bacterial order bacteroidales and archaeal family methanosaetaceae. *Appl Biochem Biotechnol*. 2020;192(2):482-493. doi: 10.1007/s12010-020-03326-6

8. Ahmed MG, Elwakeel EA, El-Zarkouny SZ, Al-Sagheer AA. Environmental impact of phytobiotic additives on greenhouse gas emission reduction, rumen fermentation manipulation, and performance in ruminants: an updated review. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024;31(26):37943-37962. doi: 10.1007/s11356-024-33664-5

9. Anam MS, Astuti A, Widyobroto BP, Agus A. Effect of dietary supplementation with zinc-methionine on ruminal enzyme activities, fermentation characteristics, methane production, and nutrient digestibility: An in vitro study. *J Adv Vet Anim Res*. 2023;10(4):696-703. doi: 10.5455/javar.2023.j725

10. Bilandzija N, Voca N, Jelcic B, Jurisic V, Matin A, Grubor M, Kricka T. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;93:225-230. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.040

11. Adeleke BS, Babalola OO. Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. *Food Sci Nutr*. 2020;8(9):4666-4684. doi: 10.1002/fsn3.1783

12. de Moraes Oliveira VR, de Arruda AMV, Silva LNS, de Souza Jr JBF, de Queiroz JPAF, da Silva Melo A, Holanda JS. Sunflower meal as a nutritional and economically viable substitute for soybean meal in diets for free-range laying hens. *Animal Feed Science and Technology*. 2016;220:103-108. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.07.015

13. Chen F, Li Y, Shen Y, Guo Y, Zhao X, Li Q, Cao Y, Zhang X, Li Y, Wang Z, Gao Y, Li J. Effects of prepartum zinc-methionine supplementation on feed digestibility, rumen fermentation patterns, immunity status, and passive transfer of immunity in dairy cows. *J Dairy Sci*. 2020;103(10):8976-8985. doi: 10.3168/jds.2019-17991

14. Clemmons BA, Schneider LG, Melchior EA, Lindholm-Perry AK, Hales KE, Wells JE, Freetly HC, Hansen SL, Drewnoski ME, Hartman SJ, Myer PR. The effects of feeding ferric citrate on ruminal bacteria, methanogenic archaea and methane production in growing beef steers. *Access Microbiol.* 2020;3(1):acmi000180. doi: 10.1099/acmi.0.000180
15. Enbaia S, Eswayah A, Hondow N, Gardiner PHE, Smith TJ. Detoxification, active uptake, and intracellular accumulation of chromium species by a methane-oxidizing bacterium. *Appl Environ Microbiol.* 2021;87(2):e00947-20. doi: 10.1128/AEM.00947-20
16. Genther-Schroeder ON, Smerchek DT, Penner GB, Hansen SL. Examination of the role of the rumen in zinc metabolism. *J Anim Sci.* 2025;103:skaf052. doi: 10.1093/jas/skaf052
17. Getabalew M, Alemneh T, Akeberegn D. Methane production in ruminant animals: implication for their impact on climate change. 2019;2(4):204-211. doi:10.32474/CDVS.2019.02.000142
18. Getabalew M, Alemneh T, Bzune E. Review on Methanogenesis and its Role. 2020;6:1-7. doi: 10.33552/WJASS.2020.06.000632
19. Hassan FU, Arshad MA, Ebeid HM, Rehman MS, Khan MS, Shahid S, Yang C. Phytogenic additives can modulate rumen microbiome to mediate fermentation kinetics and methanogenesis through exploiting diet-microbe interaction. *Front Vet Sci.* 2020;12(7):575801. doi: 10.3389/fvets.2020.575801
20. Matin A, Majdak T, Krička T, Grubor M. Valorization of sunflower husk after seeds convection drying for solid fuel production. *Journal of Central European Agriculture.* 2019;20(1):389-401. doi: 10.5513/JCEA01/20.1.2018
21. Petrič D, Mikulová K, Bombárová A, Battányi D, Čobanová K, Kopel P, Łukomska A, Pawlak P, Sidoruk P, Kotwica S, Cieslak A, Váradyová Z. Efficacy of zinc nanoparticle supplementation on ruminal environment in lambs. *BMC Vet Res.* 2024;20(1):425. doi: 10.1186/s12917-024-04281-8
22. Quan Z, Chen M, Zhang D. Effects of hydrodynamic cavitation combined with snail enzyme treatment on the structure and functional properties of water-soluble dietary fiber in rice husks. *Ultrason Sonochem.* 2025;113:107236. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107236
23. Spears JW, Loh HY, Lloyd KE, Heldt JS, Engle TE. Trace mineral source and chromium propionate supplementation affect performance and carcass characteristics in feedlot steers. *J Anim Sci.* 2024;102:skae106. doi: 10.1093/jas/skae106
24. Wu H, Meng Q, Yu Z. Evaluation of ferric oxide and ferric citrate for their effects on fermentation, production of sulfide and methane, and abundance of select microbial populations using in vitro rumen cultures. *Bioresour Technol.* 2016;211:603-9. doi: 10.1016/j.biortech.2016.03.126
25. Zhao C, Shen B, Huang Y, Kong Y, Tan P, Zhou Y, Yang J, Xu C, Wang J. Effects of chromium propionate and calcium propionate on lactation performance and rumen microbiota in postpartum heat-stressed holstein dairy cows. *Microorganisms.* 2023;11(7):1625. doi: 10.3390/microorganisms11071625

References

1. Atlanderova KN, Miroshnikov SA, Ryazanov VA, Duskaev GK, Sheida EV. Effect of cavitated husk on the metabolome of fermentation end products, microbiome and physicochemical parameters of the rumen (in vitro). *Agricultural Science.* 2022;12:20-25. doi: 10.32634/0869-8155-2022-365-12-20-25
2. Duskaev GK, Levakhin GI, Korolyov VL, Sirazetdinov FK. Use of probiotics and plant extracts to improve the productivity of ruminants (review). *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2019;102(1):136-148. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-136
3. Levakhin GI, Ayrich VA, Duskaev GK. The main focus is on creating a sustainable forage base. *Dairy and Beef Cattle Breeding.* 2005;6:27-29.
4. Reznichenko VG, Duskaev GK, Kirzhaev V. Dependence of the ammonia concentration in the rumen on the feeding technique. *Herald of Beef Cattle Breeding.* 2006;2(59):42-43.

5. Ugorets VI, Albegonova RD, Ikoeva LP. Effect of feeding nature on blood indices and bulls' ruminal digestion. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2014;51(2):98-103.
6. Abdollahi M, Rezaei J, Fazaeli H. Performance, rumen fermentation, blood minerals, leukocyte and antioxidant capacity of young Holstein calves receiving high-surface ZnO instead of common ZnO. *Arch Anim Nutr*. 2020;74(3):189-205. doi: 10.1080/1745039X.2019.1690389
7. Agustini CB, da Costa M, Gutterres M. Biogas from tannery solid waste anaerobic digestion is driven by the association of the bacterial order bacteroidales and archaeal family methanosaetaceae. *Appl Biochem Biotechnol*. 2020;192(2):482-493. doi: 10.1007/s12010-020-03326-6
8. Ahmed MG, Elwakeel EA, El-Zarkouny SZ, Al-Sagheer AA. Environmental impact of phytobiotic additives on greenhouse gas emission reduction, rumen fermentation manipulation, and performance in ruminants: an updated review. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2024;31(26):37943-37962. doi: 10.1007/s11356-024-33664-5
9. Anam MS, Astuti A, Widyobroto BP, Agus A. Effect of dietary supplementation with zinc-methionine on ruminal enzyme activities, fermentation characteristics, methane production, and nutrient digestibility: An in vitro study. *J Adv Vet Anim Res*. 2023;10(4):696-703. doi: 10.5455/javar.2023.j725
10. Bilandzija N, Voca N, Jelcic B, Jurisic V, Matin A, Grubor M, Kricka T. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;93:225-230. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.040
11. Adeleke BS, Babalola OO. Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. *Food Sci Nutr*. 2020;8(9):4666-4684. doi: 10.1002/fsn3.1783
12. de Moraes Oliveira VR, de Arruda AMV, Silva LNS, de Souza Jr JBF, de Queiroz JPAF, da Silva Melo A, Holanda JS. Sunflower meal as a nutritional and economically viable substitute for soybean meal in diets for free-range laying hens. *Animal Feed Science and Technology*. 2016;220:103-108. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.07.015
13. Chen F, Li Y, Shen Y, Guo Y, Zhao X, Li Q, Cao Y, Zhang X, Li Y, Wang Z, Gao Y, Li J. Effects of prepartum zinc-methionine supplementation on feed digestibility, rumen fermentation patterns, immunity status, and passive transfer of immunity in dairy cows. *J Dairy Sci*. 2020;103(10):8976-8985. doi: 10.3168/jds.2019-17991
14. Clemmons BA, Schneider LG, Melchior EA, Lindholm-Perry AK, Hales KE, Wells JE, Freetly HC, Hansen SL, Drewnoski ME, Hartman SJ, Myer PR. The effects of feeding ferric citrate on ruminal bacteria, methanogenic archaea and methane production in growing beef steers. *Access Microbiol*. 2020;3(1):acmi000180. doi: 10.1099/acmi.0.000180
15. Enbaia S, Eswayah A, Hondow N, Gardiner PHE, Smith TJ. Detoxification, active uptake, and intracellular accumulation of chromium species by a methane-oxidizing bacterium. *Appl Environ Microbiol*. 2021;87(2):e00947-20. doi: 10.1128/AEM.00947-20
16. Genther-Schroeder ON, Smerchek DT, Penner GB, Hansen SL. Examination of the role of the rumen in zinc metabolism. *J Anim Sci*. 2025;103:skaf052. doi: 10.1093/jas/skaf052
17. Getabalew M, Alemneh T, Akebergn D. Methane production in ruminant animals: implication for their impact on climate change. 2019;2(4):204-211. doi:10.32474/CDVS.2019.02.000142
18. Getabalew M, Alemneh T, Bzune E. Review on Methanogenesis and its Role. 2020;6:1-7. doi: 10.33552/WJASS.2020.06.000632
19. Hassan FU, Arshad MA, Ebeid HM, Rehman MS, Khan MS, Shahid S, Yang C. Phytogenic additives can modulate rumen microbiome to mediate fermentation kinetics and methanogenesis through exploiting diet-microbe interaction. *Front Vet Sci*. 2020;12(7):575801. doi: 10.3389/fvets.2020.575801
20. Matin A, Majdak T, Krička T, Grubor M. Valorization of sunflower husk after seeds convection drying for solid fuel production. *Journal of Central European Agriculture*. 2019;20(1):389-401. doi: 10.5513/JCEA01/20.1.2018

21. Petrič D, Mikulová K, Bombárová A, Battányi D, Čobanová K, Kopel P, Łukomska A, Pawlak P, Sidoruk P, Kotwica S, Cieslak A, Váradyová Z. Efficacy of zinc nanoparticle supplementation on ruminal environment in lambs. *BMC Vet Res.* 2024;20(1):425. doi: 10.1186/s12917-024-04281-8
22. Quan Z, Chen M, Zhang D. Effects of hydrodynamic cavitation combined with snail enzyme treatment on the structure and functional properties of water-soluble dietary fiber in rice husks. *Ultrason Sonochem.* 2025;113:107236. doi: 10.1016/j.ultsonch.2025.107236
23. Spears JW, Loh HY, Lloyd KE, Heldt JS, Engle TE. Trace mineral source and chromium propionate supplementation affect performance and carcass characteristics in feedlot steers. *J Anim Sci.* 2024;102:skae106. doi: 10.1093/jas/skae106
24. Wu H, Meng Q, Yu Z. Evaluation of ferric oxide and ferric citrate for their effects on fermentation, production of sulfide and methane, and abundance of select microbial populations using in vitro rumen cultures. *Bioresour Technol.* 2016;211:603-9. doi: 10.1016/j.biortech.2016.03.126
25. Zhao C, Shen B, Huang Y, Kong Y, Tan P, Zhou Y, Yang J, Xu C, Wang J. Effects of chromium propionate and calcium propionate on lactation performance and rumen microbiota in postpartum heat-stressed holstein dairy cows. *Microorganisms.* 2023;11(7):1625. doi: 10.3390/microorganisms11071625

Информация об авторах:

Елена Владимировна Шейда, доктор 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, д. 29, тел.: 8-922-862-64-02.

Сергей Александрович Мирошников, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, эксперт РАН, ректор Оренбургского государственного университета, 460018, г. Оренбург, пр. Победы д. 13, тел.: 8 (3532) 77-67-70.

Галимжан Калиханович Дускаев, доктор биологических наук, доцент, профессор РАН, первый заместитель директора, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 8 (3532) 30-81-70.

Иван Сергеевич Мирошников, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 8-922-806-01-01.

Information about the authors:

Elena V Sheida, Dr. Sci. (Biology), Researcher at the Laboratory of 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.

Sergey A Miroshnikov, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Expert of the Russian Academy of Sciences, Professor, Rector of Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, tel.: 8 (3532) 77-67-70.

Galimzhan K Duskaev, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, First Deputy Director, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8 (3532) 30-81-70.

Ivan S Miroshnikov, Cand. Sci. (Biology), Researcher at the Department of Animal Feeding and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8-922-806-01-01.

Статья поступила в редакцию 25.11.2024; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 15.09.2025.

The article was submitted 25.11.2024; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 15.09.2025.