

Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 1. С. 132-143.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2023. Vol. 106, no 1. P. 132-143.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОРМЛЕНИЯ

Обзорная статья
УДК 636.088.31
doi:10.33284/2658-3135-106-1-132

Использование ферментов в кормлении крупного рогатого скота, последствия для здоровья и продуктивности

Елена Андреевна Агафонова¹, Елена Владимировна Шейда², Ольга Вилориевна Кван³

¹²³Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹alenaagafonov4@yandex.ru

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

³kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Аннотация. Применение экзогенных ферментов в рационах крупного рогатого скота положительно влияет на усвояемость клетчатки и повышение эффективности использования корма жвачными животными. Ферменты, используемые в кормах для животных, считаются зоотехническими добавками, которые улучшают консистенцию и питательную ценность корма, повышают усвояемость и продуктивность животных. Добавление экзогенных ферментов в рацион помогает жвачным животным переваривать и усваивать больше клетчатки. В обзоре представлено и обсуждается использование экзогенных ферментов, способствующих увеличению усвояемости клетчатки и повышению продуктивности крупного рогатого скота. Применяя соответствующие методы и способы кормления, можно значительно повысить усвояемость клетчатки, а также улучшить консистенцию и вкусовые качества кормов. Особенно при добавлении к влажным кормам, так как высокое содержание влаги благоприятно воздействует на фибролитические ферменты, которым необходима вода для гидролиза сложных волокнистых полимеров с выделением простых мономеров. Способ действия каждого фермента индивидуален и взаимозависим, его использование в сочетании с составами кормов должно осуществляться рационально и осторожно для достижения максимального положительного эффекта.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, кормление, ферменты, состав кормов, продуктивность

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

Для цитирования: Агафонова Е.А., Шейда Е.В., Кван О.В. Использование ферментов в кормлении крупного рогатого скота, последствия для здоровья и продуктивности (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 1. С. 132-143. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-132>

THEORY AND PRACTICE OF FEEDING

Review article

Enzyme use in cattle nutrition, implications for health and productivity

Elena A Agafonova¹, Elena V Sheida², Olga V Kvan³

¹²³Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹alenaagafonov4@yandex.ru

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

³kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

Abstract. The use of exogenous enzymes in cattle diets positively affects the digestibility of fiber and increases the efficiency of feed use by ruminants. Enzymes used in animal feed are considered to be zootechnical additives that improve the consistency and nutritional value of feed, increase digestibility and productivity of animals. The review presents and discusses the use of exogenous enzymes that contribute to an increase in the digestibility of fiber and increasing the productivity of cattle. Using the appropriate

methods and methods of feeding, you can significantly increase the digestibility of fiber and improve the consistency and taste of feed. Especially when adding to moist feed, since high moisture content favorably affects fibolytic enzymes that require water for hydrolysis of complex fibrous polymers with the release of simple monomers. The method of action of each enzyme is individual and interdependent, its use in combination with feed composition should be carried out rationally and carefully to achieve the maximum positive effect.

Keywords: cattle, feeding, enzymes, feed composition, productivity

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

For citation: Agafonova EA, Sheida EV, Kvan OV. Enzyme use in cattle nutrition, implications for health and productivity (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(1):132-143. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-132>

Введение.

Мировой спрос на продукты животного происхождения стремительно растёт, что подчеркивает важность применения стратегий повышения продуктивности животных. Основными ограничениями в современном секторе животноводства являются высокая стоимость кормов и низкое качество имеющихся кормовых ресурсов. На протяжении многих лет специалисты по питанию животных разрабатывали различные физические, химические и биологические методы для преодоления проблем, связанных с кормами для скота. С возникающими проблемами получения экологически безопасной пищевой продукции применение биологических методов в приготовлении кормов к скармливанию находятся в центре внимания. В качестве метода подготовки кормов выступает использование экзогенных ферментов, это и становится широко обсуждаемой темой среди специалистов по питанию животных (Carrillo-Diaz MI et al., 2022; Huang Z et al., 2020; Tirado-Gonzalez DN et al., 2018).

Использование экзогенных ферментов в рационах моногастричных животных не является новой тенденцией, хотя добавление ферментов в рацион жвачных животных ещё не получило широкого практического применения (Sujani S et al., 2015). Ранние попытки исследований по добавлению в рацион жвачных животных экзогенных ферментов имеют довольно долгую историю, которая была описана в 1960-х годах, в основном с учётом амилолитических и протеолитических ферментов. Но противоречивость полученных результатов, скудные знания о способе действия ферментов и высокая стоимость производства ферментов препятствовали дальнейшему развитию этой области.

Недавние достижения в биотехнологии, снижение себестоимости производства ферментов и более чёткое определение коммерческих ферментных продуктов побудили исследователей пересмотреть потенциал экзогенных ферментов для улучшения использования корма жвачными животными. Проведённые исследования продемонстрировали благотворный эффект включения в рацион жвачных животных экзогенных ферментов, более конкретно, экзогенных фибролитических ферментов в качестве средства повышения усвояемости клетчатки и увеличения эффективности использования корма жвачными животными *in vitro* (Betancur-Murillo CL et al., 2023; Abid K et al., 2021), *in vivo* (Lunsin R et al., 2021) и *in situ*. Между тем в некоторых других исследованиях (Singh A et al., 2022) не было отмечено существенных различий в усвояемости питательных веществ корма при добавлении ферментов. Благодаря огромным усилиям исследователей использование экзогенных ферментов для повышения качества и усвояемости кормов для жвачных животных находится на грани получения практических преимуществ, хотя существуют некоторые вопросы, такие как способ действия ферментов, синергизм между экзогенными ферментами и микрофлорой рубца, подходящий способ применения и оптимальная дозировка, которые необходимо уточнить.

Цель исследования.

Предоставить краткий обзор аспектов, связанных с использованием экзогенных ферментов в рационах жвачных животных.

Материалы и методы исследования.

Поиск и анализ литературы проводился с использованием интернет-ресурсов: РИНЦ – <https://www.elibrary.ru>, ScienceDirect – <https://www.sciencedirect.com>, PubMed – <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> за период 2005-2022 гг.

Результаты исследования и обсуждение.**Источники экзогенных ферментов.**

Экзогенные ферменты, которые используются в питании жвачных животных, можно разделить на три основные категории: фибролитические, амилолитические и протеолитические. В дополнение к основным категориям ферментов фитаза, которая широко используется в питании моногастрических животных и птицы, также становится популярной в кормление жвачных животных.

Ферментные продукты получают главным образом из четырёх бактерий (*Bacillus subtilis*, *Lactobacillus acidophilus*, *L. plantarum* и *Streptococcus faecium*, spp.), трёх видов грибов (*Aspergillus oryzae*, *Trichoderma reesei* и *Saccharomyces cerevisiae*) и некоторых дрожжей. Целлюлазу получают с использованием как грибов, так и бактерий, но с большим акцентом на использование грибов из-за их способности производить достаточное количество ферментов (Arriola KG et al., 2017; Ellatif SA et al., 2022) и часто менее сложных, чем бактериальная целлюлаза.

Однако с совершенствованием знаний в области микробиологии выделение и производство целлюлазы из бактерий в настоящее время становятся всё более популярными, по причине того, что бактерии имеют высокую скорость роста, чем грибы, что позволяет производить ферменты с высокой рекомбинантностью. Бактериальные целлюлазы часто более сложны и представляют собой мультиферментные комплексы, обеспечивающие повышенный синергизм. Штаммы бактерий, такие как термофильные или психрофильные, алкалофильные, рацидофильные и галофильные, обитают в широком разнообразии и занимают все промышленные ниши (Singh A et al., 2022; Islam R et al., 2021). Бактерии, дрожжи и нитевидные грибы также являются основными продуцентами для производства гексиланаз (Campana M et al., 2023).

Наиболее важными продуцентами ксиланолитических ферментов являются *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Streptomyces*, *Phanerochaetes*, хитридиомицеты, *Ruminococcus*, *Fibrobacteres*, *Clostridia* и *Bacillus*. Некоторые учёные сообщают об извлечении бактерий, продуцирующих ксиланазу из почвы, однако значительное количество ксиланазы было извлечено из *Bacillus pumilus* (Ibarra-Islas A et al., 2023; Lunsin R et al., 2021; Zayed MS et al., 2020).

Aspergillus oryzae является основным микроорганизмом, используемым для извлечения фермента амилазы (Singh A et al., 2022), также помимо него используются микроорганизмы *Chromohalobacter sp.*, *Halobacillus sp.*, *Haloarcula hispanica*, *Halomonas meridiana*, *Bacillus sp.*, *Bacillus Licheniformis* (Silva DL et al., 2022; Henry DD et al., 2020).

Добавление фибролитических ферментов в рацион жвачных животных было предметом научного интереса во многих исследованиях (Rodrigues GRD et al., 2022), поскольку переваривание фракций клетчатки в пищеварительной системе жвачных животных достигает лишь 65-70 % даже при идеальных условиях. В настоящее время на рынке коммерчески доступно несколько ферментных препаратов для кормления крупного рогатого скота. Основными методами извлечения ферментов являются ферментация в твёрдом состоянии и ферментация под водой, которые в дальнейшем сочетаются с многочисленными биотехнологическими аспектами (Sujani S and Seresinhe RT, 2015).

Ферменты – это не что иное, как встречающиеся в природе биокатализаторы, синтезируемые из живых клеток для выполнения специфических биохимических реакций. Фибролитические ферменты являются катаболическими продуктами, вырабатываемыми живыми организмами. Ком-

мерческие ферментные препараты представлены не одним видом фермента, а наряду с этим присутствуют вторичные продукты ферментации, такие как амилазы, пектиназы или протеазы (Mendoza GD et al., 2014). Для расщепления сложной матрицы клеточных стенок, состоящей из структурных углеводов (целлюлозы и гемицеллюлозы), белков, фенольных соединений и воды, необходимы разнообразные ферменты (Attiola KG et al., 2017; Rathinam NK et al., 2017).

Использование ферментов в питании животных.

Ферменты, используемые в кормах для животных, считаются зоотехническими добавками, которые улучшают консистенцию и питательную ценность корма, повышают усвояемость, продуктивность и снижают действие антинутриентов. Они также поддерживают здоровье кишечника, кроме того, процесс пищеварения препятствует росту патогенных микроорганизмов. Ферментные препараты добавляют отдельно или в виде мультиферментных продуктов на всех стадиях роста жвачных и моногастрических животных (Ugwuanji JO, 2016; Ojha BK et al., 2019; Lucio BSV et al., 2021; Cowieson A, 2010).

Эффекты действия ферментов, используемых при переработке кормов для животных, до конца не выяснены. Однако их успех можно объяснить любым из следующих механизмов воздействия на связи или компоненты, которые не могут быть гидролизованы эндогенными ферментами. Деградация антипитательных факторов, которые снижают усвояемость и повышают вязкость корма. Разрыв клеточной стенки и высвобождение питательных веществ, прикрепленных к ней, повышение переваривания различных компонентов кормов, уменьшение секреции и потери эндогенных белков в кишечнике снижает затраты питательных ресурсов для поддержания жизни и здоровья животного. Ферменты способствуют увеличению количества пищеварительных ферментов, которых у животного недостаточно или они вообще отсутствуют, приводят к улучшению пищеварения, особенно у молодых животных с незрелой пищеварительной системой (Ojha BK et al., 2019; Edison KL et al., 2022).

Способ действия каждого фермента индивидуален и взаимосвязан, его использование в сочетании с составами кормов должно осуществляться рационально и осторожно для достижения максимального положительного эффекта. Ферменты прямо или косвенно воздействуют на питательные вещества, оказывая основное воздействие на субстрат, на который они направлены, а также вызывают побочные эффекты. Например, в лигноцеллюлозном комплексе ферменты, разлагающие лигнин, будут атаковать свой субстрат в качестве основного эффекта и, следовательно, они получат доступ к питательным веществам, связанным с лигнином (углеводам или белкам), в качестве побочного эффекта (Singh A et al., 2022).

На каталитическую активность ферментов влияют температура, pH и специфичность субстрата, поэтому ферменты, используемые в качестве добавок должны быть термостойкими, стабильными и способными сохранять свою активность в пищеварительной системе животного (Ojha BK et al., 2019). Одним из способов гарантировать, что экзогенные ферменты сохраняются до того места и момента, когда они начнут действовать, является их инкапсуляция, чтобы стабилизировать их для обработки корма или их прохождения через желудочно-кишечный тракт, защищая их от неблагоприятных условий и вызывая их высвобождение в месте действия (Ojha BK et al., 2019). Целью добавления ферментов в корма для животных является повышение эффективности питания, производственных требований и, следовательно, снижение стоимости кормления (Bedford MR, 2018; Abdelrahman M et al., 2016).

Применение ферментов в кормлении жвачных животных развивалось медленно, сложность пищеварительной системы этих животных и существование жвачных микроорганизмов, которые выделяют ферменты и осуществляют процессы брожения, затрудняют интерпретацию полученных данных. Большая часть исследований, проведенных на жвачных животных, была основана на использовании фибролитических ферментов, амилаз и протеаз. В основном мультиферментных комплексов, состоящих из целлюлаз, ксиланаз, амилаз и пектиназ (Ugwuanji JO, 2016). Они обычно используются для улучшения усвояемости клеточных стенок корма, повышения доступности крахмала, присутствующего в злаках, и улучшения продуктивности молочного скота (Singh A et

al., 2022; Shekhar S et al., 2010). В стремлении увеличить производство молока и снизить его стоимость было показано, что использование ферментов в кормлении жвачных животных оказывает положительное влияние на надои молока (Refat B et al., 2018).

Ферменты, такие как ксиланазы, использовались при предыдущей обработке кормов для улучшения их усвояемости у жвачных животных (Lucio BSV et al., 2021) и для облегчения компостирования глюканидами, пектиназами, целлюлазами, протеазами, амилазами, фитазами, галактозидазами и липазами, для расщепления компонентов корма, снижения вязкости сырья (Rodrigues GRD et al., 2022).

Обычно для кормления жвачных животных используют сельскохозяйственные отходы, однако многие из них непитательны, содержат мало белка, большое количество клетчатки и имеют низкую усвояемость. Использование экзогенных ферментов для улучшения качества этих кормовых продуктов является современной тенденцией. Было показано, что включение целлюлаз в рационы сельскохозяйственных животных улучшает использование корма и продуктивность животных *in vitro*, *in situ* и *in vivo* за счёт деградации клетчатки, а также улучшает выработку молока у коров и мелких жвачных животных (Mousa GA et al., 2022; Azzaz NH et al., 2021).

У молочных коров переваримость сухого вещества и выработка молока повысились в рационах с 34 % силоса из ячменя, обработанного фибролитическими ферментами (смесь целлюлазы и ксиланазы) из *Trichoderma reesei* (Refat B et al., 2018; Yang JC et al., 2022). Недавно Golder NM с коллегами (2019) охарактеризовали реакцию в области применения фибролитических ферментов у дойных коров с добавкой до родов и в течение 200 дней с начала лактации на трёх молочных фермах в США. Восемь случайно распределённых загонов контролировались без введения фермента и ещё восемь загонов получали дозу фибролитических ферментов 750 мл/т корма в течение пяти месяцев. Результаты показали, что выработка молока увеличилась при ферментативной обработке до 0,70-0,80 кг/сут, это могло быть связано с более высокой усвояемостью корма. Масса тела коров, которым добавляли ферменты, не увеличилась. Однако наблюдалось более высокое потребление сухого вещества (0,20 кг на голову в день). Кроме того, у коз удалось продемонстрировать влияние на ежедневный прирост массы тела, выработку молока и потребление корма при включении в рацион ферментного экстракта, полученного из отработанного субстрата *Pleurotus ostreatus* (Trejo LT et al., 2017; Estrada-Reyes Z et al., 2022). Однако, несмотря на преимущества фибролитических ферментов, использование их в рационе крупного рогатого скота мясного направления продуктивности не показывает существенных результатов (Rodrigues GRD et al., 2022).

Что касается амилолитических ферментов, то они являются потенциальными добавками для улучшения переваривания крахмала в рационе жвачных животных. Некоторые амилазы из *B. licheniformis* и *Aspergillus niger* могут повышать усвояемость крахмала злаков, таких как сорго и кукуруза (Singh A et al., 2022; Devant M et al., 2020; Zeuner B et al., 2020). Эти ферменты были способны воздействовать на группу амилозы и амилопектина, в частности на α -1,4 или α -1,6 гликозидные связи, высвобождая глюкозу, мальтотриозу и мальтозу, которые могут быть использованы в качестве субстрата микроорганизмами жвачных животных, такими как *Megasphaera elsdenii*, *Prevotella ruminicola* и *Selenomonas ruminantium* (Liu ZK et al., 2022).

Выделенный амилолитический фермент *B. licheniformis* был в 69 раз активнее, чем ферменты, обнаруженные в рубце, его активность составила 4,19 мм/мин. Действие данного фермента было продемонстрировано в исследованиях *in vivo* на овцах, которых кормили рационом на основе сорго (70 %), обработанного этими ферментами, что привело к снижению потребления сухого вещества, органических веществ и крахмала. Однако степень использования крахмала определяется его типом или источником, химическим и питательным составом рациона, количеством пищи, потребляемой в единицу времени, механическими изменениями (степень пережевывания) и физико-химическими свойствами (степень гидратации и желатинизации) и адаптацией микроорганизмов румина к субстрату (Singh A et al., 2022; Lopez-Aguirre D et al., 2016).

С другой стороны, использование фитазы у жвачных животных улучшает использование фосфора и уменьшает необходимость добавления в корм неорганического фосфата, а также способствует снижению содержания фосфора в фекалиях (Ojha BK et al., 2019).

Способы применения экзогенных ферментов.

Способы применения варьируются от предварительной обработки корма в течение определённого периода времени перед скармливанием (например, приготовление силоса, заготовка кормов) до применения во время кормления (внесение в сено, в полностью смешанные рационы, концентраты), даже прямое внесение в рубец. Поскольку активность ферментов строго зависит от типа корма, при выборе подходящего метода следует уделять особое внимание специфичности ферментного корма (Singh A et al., 2022; Шакуя J et al., 2019). Ферменты можно добавлять в жидкой или гранулированной форме в сено, силос, концентрат, добавку или премикс.

Благодаря высокому содержанию влаги фибролитические ферменты проявляют повышенную эффективность при применении к влажным кормам по сравнению с сухими кормами, поскольку вода способствует распространению ферментов и необходима для гидролиза сложных волоконистых полимеров с выделением простых мономеров. Помимо этого, значения pH силоса обычно находятся на уровне или около оптимального pH для многих производящих ферменты грибов (Singh A et al., 2022). Однако на практике эффект больше, если ферменты вносят в жидкой форме в сухой корм по сравнению с влажным кормом.

Гемицеллюлолитическая активность снижалась при внесении ферментов в силос, в результате чего активность ксиланазы снизилась до 50 %. При этом целлюлолитическая активность ферментов осталась неизменной (Jabri J et al., 2022; Manju GU et al., 2019).

Refat B с коллегами (2018) наблюдали, что внутрижелудочная инфузия фибролитических ферментов в более низких дозах (10 г на корову в день) не оказывала существенного влияния на использование питательных веществ и характер ферментации. Напротив, Singh A с соавторами (2022) наблюдали повышенную фибролитическую активность в спинномозговой жидкости овец при дозировке 12 г/сут. Это влияние фибролитических ферментов в экспериментах может быть обусловлено различиями в активности фермента, специфичности субстрата, внутренней среде кишечника и способе применения.

Refat B с соавторами (2022) сообщили, что благоприятные реакции при добавлении фермента к смешанному рациону, возможно, обусловлены улучшенным потреблением легкоусвояемого органического вещества, тогда как в том же исследовании они не оказывали существенного эффекта при добавлении фермента в концентрат или непосредственном введении в рубец. Значительные улучшения как в потреблении сухого вещества, так и его усвояемости наблюдались у овец, которых кормили сеном из морской травы (*Panicum maximum*) с добавлением фибролитических ферментов (Singh A et al., 2022; Soltan Y et al., 2022).

Как показали эти исследования, добавление ферментов перед кормлением улучшает переваривание клетчатки в рубце, изменяя структуру корма, тем самым повышая его переваримость. Neumann M с соавторами (2018b) сообщили, что добавление фибролитического фермента в концентраты за месяц до кормления увеличивает переваривание рациона и выработку молока молочными коровами. Фермент, применяемый при заготовке кормов, улучшил потребление сырого протеина, переваримость сухого вещества и сырого протеина сена из бермудской травы (Ahmed K, 2016). Обнаружили, что использование аэробных ферментов в сочетании с силосованием показало отрицательный эффект, поскольку содержание нейтрально-детергентной клетчатки увеличилось, а усвояемость *in vitro* заметно снизилась (от 14 до 19 % единиц) по сравнению с силосом без ферментативной обработки и независимо от корма. В другом исследовании (Singh A et al., 2022) продемонстрировано, что добавление фибролитического фермента непосредственно в рубец увеличивает фибролитическую активность в рубцовой жидкости без предварительной обработки кормового фермента.

Влияние экзогенных ферментов на формирование продуктивности и эффективность использования корма.

Важными факторами, определяющими потребление корма и продуктивность животных у жвачных, являются содержание волокон и перевариваемость. Использование ферментативных диет с фибролитической активностью может эффективно помочь жвачным животным переваривать больше клетчатки, следовательно, повышает усвояемость питательных веществ (Mousa GA et al., 2022).

Возможный способ действия фибролитических ферментов можно объяснить их воздействием на корм перед употреблением или улучшением переваривания в рубце и/или их воздействием на поструминальный пищеварительный процесс. Воздействие фибролитических ферментов на корм перед употреблением может быть простым или сложным, таким как высвобождение растворимого углеводного гидрата, высвобождение или удаление структурных компонентов корма, которые ограничивают переваривание микробов в рубце (Singh A et al, 2022). В рубце эти ферменты могут воздействовать непосредственно на корм или косвенно синергически влиять на микробиом рубца. В нижних отделах пищеварительного тракта ферменты остаются активными, что способствует перевариванию клетчатки корма или непосредственно снижает вязкость перевариваемого продукта, что ещё больше позволяет улучшить усвоение питательных веществ. Ферменты также увеличивают скорость разложения корма (Arriola KG et al., 2017).

В исследованиях, проведённых Singh A с коллегами (2022), установлено, что добавки в рацион дойных коров фибролитических ферментов не вызывали каких-либо существенных изменений в потреблении сухого вещества корма. Но с применением экзогенных фибролитических ферментов значительно увеличился удой молока ($p < 0,003$) (41,0 против 39,5 кг/корова/день) по сравнению с молочными коровами контрольной группы. Кроме того, эффективность кормления у молочных коров раннего периода лактации значительно улучшилась по сравнению с контролем. Эти результаты согласуются с исследованиями Marimuthu M с соавторами (2019), где они наблюдали повышенную выработку молока с помощью введения ксиланазы-эстеразы и тенденцию к улучшению перевариваемости сухого вещества и увеличению молочной продуктивности с помощью включения ксиланазы и целлюлазы. Estrada-Reyes Z с коллегами (2022) показали, что добавление ферментов не улучшало перевариваемость питательных компонентов корма *in vivo* у молочных коров. При этом было установлено, что использование фибролитических ферментов не оказало влияния на производство молока.

Значительное увеличение количества и качество молока, а именно повышение содержания жира и белка, были отмечены при использовании ферментированного корма (Ellatif SA et al., 2022; Arriola KG et al., 2017).

Экзогенный протеолитический фермент может увеличивать общую усвояемость в желудочно-кишечном тракте сухого вещества, органического вещества (ОВ), нейтрально-детергентной клетчатки (Ali U et al., 2023). Добавление протеолитического фермента улучшает некоторые показатели качества молока, такие как содержание жира и молочной лактозы, но снижает содержания молочного белка. Экзогенные ферменты, особенно фитаза, способствуют снижению выведения из организма коров с фекалиями некоторых питательных веществ. Lunsin R с коллегами (2021) заявили, что у коров, получавших ферментную композицию снижалась экскреция с фекалиями сухого вещества и нейтрально-детергентной клетчатки, а также снижался уровень потерь азота и фосфора с калом. Повышение уровня ферментов в рационе также линейно увеличивало выработку кишечного метана. При добавлении смеси экзогенных ферментов в рацион коров отмечено увеличение микробного синтеза азота в рубце, концентрации короткоцепочечных жирных кислот и тем самым привело к увеличению усвояемости питательных веществ.

Ran T с соавторами (2019) исследовали влияние добавок фибролитических ферментов в смешанный рацион коров на ферментацию в рубце, синтез микробного белка, переваривание питательных веществ, выход и состав молока, и установили, что существенных различий ни в одном из изученных параметров выявлено не было.

Tirado-Gonzalez DN с коллегами (2018) провели исследование для определения влияния различных уровней воздействия фибролитического фермента в финишном рационе на продуктивность бычков и характеристики туши. Фибролитические ферменты не влияют на производительность бычков, но улучшают выход и нежность туши. В исследовании Singh A с соавторами (2022) сообщалось, что добавление ферментов не влияло на потребление сухого вещества, тогда как отмечено повышение общей перевариваемости в желудочно-кишечном тракте питательных веществ, включая нейтрально-детергентную клетчатку, концентрации аммиака в рубце, общего количества короткоцепочечных жирных кислот и прирост живой массы.

Jabri J с коллегами (2022) провели эксперимент по оценке влияния экзогенных фибролитических ферментов на показатели роста и пищеварения у бычков. Дозы фибролитических ферментов составляли 0, 15 или 30 г на кг концентрата. Установлено, что по мере увеличения уровня ферментов ежедневный прирост, потребление питательных веществ, пищеварение и конверсия корма были значительно увеличены относительно контроля.

Ahmed K (2016) заявил, что использование ферментов в питании скота увеличивало ($p < 0,05$) переваримость сухого вещества, усвояемость азота и нейтрально-детергентной клетчатки. В исследовании с включением в рацион бычкам протеолитического фермента отмечено увеличение переваримости сухого вещества ($p = 0,02$), но это не оказало влияния на изменение конечной массы тела (Neumann M et al., 2018b).

Были проведены исследования по оценке влияния добавок двух различных ферментативных комплексов, фибролитических (NSPases) или амилолитических (EXP3066) ферментов, на показатели роста животных, переваримость корма, поведение и мясную продуктивность крупного рогатого скота. Тридцать шесть бычков-годовалок породы Ангус со средним весом $391 \pm 5,0$ кг были разделены на три группы: контроль, NSPases и EXP3066. Основной рацион состоял на 85 % из цельного зерна кукурузы и на 15 % – из ядер. NSPases увеличили среднесуточный прирост в 63 и 84 дни и соотношение прироста к корму в 42, 63 и 84 дни. Общий вес туши и суточный прирост были улучшены на 4,8 % и 6,0 % с добавками EXP3066 и NSPases соответственно. В опытных группах, получавших добавки, наблюдалось увеличение усвояемости сухого вещества и снижение остаточного процента цельного зерна в фекалиях при добавлении ферментов.

Neumann M с соавторами (2018a) изучили эффекты добавления двух экзогенных фибролитических ферментов к общему смешанному рациону на продуктивность лактирующих молочных коров. Двенадцать фибролитических ферментов были подвергнуты скринингу в серии анализов *in vitro*, при этом выявляли наиболее эффективные ферменты и их оптимальные дозы для повышения усвояемости рациона.

В другом эксперименте 166 голштинских коров были сгруппированы по уровню лактации (45 многоплодных и 21 первородящая) и случайным образом распределены в 3 группы: контрольная, группа с включением фермента ксиланазы и группа с включением смеси целлюлазы и ксиланазы в соотношении 75:25. Ферменты добавляли в корм и скармливали в течение 14-дневного подготовительного периода и 70-дневного учётного периода. При использовании ксиланазы в рационе отмечено увеличение потребления количества сухого вещества (кг/сут) (23,5 против 22,6), органического вещества (21,9 против 20,9) и сырого белка (3,9 против 3,7) и, как правило, увеличивался выход (кг/сут) молока с поправкой на жирность (41,8 против 40,7) и молочного жира (1,48 против 1,44). Использование смеси ксиланазы и целлюлазы увеличило надои молока (кг/сут) в течение 3-й недели (41,2 против 39,8, тенденция), 6-й (41,9 против 40,1) и 7-й (42,1 против 40,4) (Kaur A et al., 2017).

Заключение.

Таким образом, включение экзогенных ферментов в рацион крупного рогатого скота оказывает положительное влияние на эффективность использования корма, рост и продуктивность животных, хотя некоторые спорные моменты нуждаются в дальнейшем исследовании, например,

такие вопросы, как подбор специфичного фермента для корма, способ введения и оптимальные дозировки введения ферментов.

Список источников
References

1. Abdelrahman M, Sami A, Suliman GM, Gamaleldin S, Abudabos A. Growth performance and economic efficiency of fattening Naimi lambs on unconventional ration enhanced with enzyme cocktail. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2016;53(2):467-471. doi: 10.21162/PAKJAS/16.4536
2. Abid K, Jabri J, Beckers Y, Yaich H, Malek A, Rekhis J, Kamoun M. Study on effect of fibrolytic enzymes supplementation on in vitro gas production kinetics and ruminal fermentation of date palm (*Phoenix dactylifera*) by-products. *Research Aspects in Agriculture and Veterinary Science*. 2021;3:74-88. doi: 10.9734/bpi/raavs/v3/12608D
3. Ahmed K. Effect of fibrolytic enzymes on serum testosterone level and some of carcass traits in Turkish Awassi male lambs. *Indian Journal of Animal Research*. 2016;50(6):919-921. doi: 10.18805/ijar.11475
4. Ali U, Saeed M, Ahmad Z, Shah F, Rehman MA, Mehmood T, Waseem M, Hafeez H, Azam M, Rahman A. Stability and survivability of alginate gum-coated lactobacillus rhamnosus GG in simulated gastrointestinal conditions and probiotic juice development. *Journal of Food Quality*. 2023;2023:3660968. doi: 10.1155/2023/3660968
5. Arriola KG, Oliveira AS, Ma ZX, Lean IJ, Giurcanu MC, Adesogan AT. A meta-analysis on the effect of dietary application of exogenous fibrolytic enzymes on the performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:4513-4527. doi: 10.3168/jds.2016-12103
6. Azzaz HH, Tawab AMAE, Khattab MSA, Szumacher-Strabel M, Cieslak A, Murad HA, Kielbowicz M, El-Sherbiny M. Effect of cellulase enzyme produced from penicilliumchrysogenum on the milk production, composition, amino acid, and fatty acid profiles of egyptian buffaloes fed a high-forage diet. *Animals*. 2021;11(11):3066. doi: 10.3390/ani11113066
7. Bedford MR. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: the role of data interpretation. *British Poultry Science*. 2018;59(5):486-493. doi: 10.1080/00071668.2018.1484074
8. Betancur-Murillo CL, Aguilar-Marin SB, Jovel J. Prevotella: A key player in ruminal metabolism. *Microorganisms*. 2023;11(1):1. doi: 10.3390/microorganisms11010001
9. Campana M, Morais JPG, Capucho E, Garcia TM, Pedrini CA, Gandra JR, Valle TAD. Fibrolytic enzymes increase fermentation losses and reduce fiber content of sorghum silage. *Annals of animal science*. 2023;2023(1): 165-172. doi: 10.2478/aoas-2022-0038
10. Carrillo-Diaz MI, Miranda-Romero LA, Chavez-Aguilar G, Zepeda-Batista JL, Gonzalez-Reyes M, Garcia-Casillas AC, Tirado-Gonzalez DN, Tirado-Estrada G. Improvement of ruminal neutral detergent fiber degradability by obtaining and using exogenous fibrolytic enzymes from whiterot fungi. *Animals*. 2022;12(7):843. doi: 10.3390/ani12070843
11. Cowieson A. Strategic selection of exogenous enzymes for corn/soy-based poultry diets. *Journal of Poultry Science*. 2010;47(1):1-7. doi: 10.2141/JPSA.009045
12. Devant M, Yu S, Genis S, Larsen T, Li W. Effects of exogenous glucoamylase enzymes alone or in combination with a neutral protease on apparent total tract digestibility and feces d-lactate in cross-bred angus bulls fed a ration rich in rolled corn. *Animals*. 2020;10(6):1077. doi: 10.3390/ani10061077
13. Edison KL, Ragitha VS, Pradeep NS. Beta-glucanases in animal nutrition. In: Pradeep N, Edison LK, editors. *Microbial Beta Glucanases. Interdisciplinary biotechnological advances*. Springer, Singapore; 2022:73-83. doi: 10.1007/978-981-19-6466-4_5
14. El-Bordeny N, El-Sayed HM, Hemmat ST, Mahran. Evaluation of exogenous fibrolytic enzyme supplementation to improve feed utilization in ruminants. *Journal of Environmental Science*. 2017;39(1):69-90. doi: 10.21608/jes.2017.19858

15. Ellatif SA, Razik ESA, AL-surhane AA, Al-Sarraj F, Daigham GE, Mahfouz AY. Enhanced production, cloning, and expression of a xylanase gene from endophytic fungal strain *Trichoderma harzianum* kj831197.1: unveiling the in vitro anti-fungal activity against phytopathogenic fungi. *J Fungi*. 2022;8(5):447 doi: 10.3390/jof8050447
16. Estrada-Reyes Z, Tsukahara Y, Goetsch A, Gipson T, Sahlu T, Puchala R, Mateescu R. Genetic markers for resistance to gastrointestinal parasites in sheep and goats from the southern region of the united states. 01/2022. doi: 10.32473/edis-an383-2022
17. Golder HM, Rossow HA, Lean IJ. Effects of in-feed enzymes on milk production and components, reproduction, and health in dairy cows. *J Dairy Sci*. 2019;102(9):8011-8026. doi: 10.3168/jds.2019-16601
18. Henry DD, Ciriaco FM, Araujo RC, Fontes PL, Oosthuizen N, Mejia-Turcioc SE, Garcia-Ascolani ME, Rostoll-Cangiano L, Schulmeister TM, Dubeux JCB, Lamb GC, Dilorenzo N. Effects of bismuth subsalicylate and encapsulated calcium-ammonium nitrate on ruminal fermentation of beef cattle. *Journal of Animal Science*. 2020;98(8):skaa199. doi: 10.1093/jas/skaa199
19. Huang Z, Li Z, Xu A, Zheng D, Ye Y, Wang Z. Effects of exogenous multienzyme complex supplementation in diets on growth performance, digestive enzyme activity and non-specific immunity of the Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*. *Aquaculture Nutrition*. 2020;26(2):306-315. doi: 10.1111/anu.12991
20. Ibarra-Islas A, Hernandez JEM, Armenta S, Lopez JE, Lopez PMG, Leon SH, Arce-Cervantes O. Use of nutshells wastes in the production of lignocellulolytic enzymes by white-rot fungi. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2023;66:e23210654 . doi: 10.1590/1678-4324-2023210654
21. Islam R, Rahman M, Islam S, Ahmed S, Jahan M, Paul SI, Selim ASM. Degradation of lignocellulosic content of rice straw using aerobic cellulolytic bacteria isolated from forest soil of Bangladesh. *African Journal of Microbiology Research*. 2021;15(3):161-170. doi: 10.5897/AJMR2021.9498
22. Jabri J, Ammar H, Abid K, Beckers Y, Yaich H, Malek A, Rekhis J, Morsy A, Soltan Y, Soufan W, Almadani M, Chahine M, Marti MH, Okla M, Kamoun M. Effect of exogenous fibrolytic enzymes supplementation or functional feed additives on in vitro ruminal fermentation of chemically pre-treated sunflower heads. *Agriculture*. 2022;12(5):696. doi: 10.3390/agriculture12050696
23. Kaur A, Singh A, Dua A, Mahajan R. Cost-effective and concurrent production of industrially valuable xylano-pectinolytic enzymes by a bacterial isolate *Bacillus pumilus* AJK. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*. 2017;47(1):8-18. doi: 10.1080/10826068.2016.1155059
24. Liu ZK, Y Li, Zhao CC, Liu ZJ, Wang LM, Li XY, Pellikaan WF, Yao JH, Cao YC. Effects of a combination of fibrolytic and amylolytic enzymes on ruminal enzyme activities, bacterial diversity, blood profile and milk production in dairy cows. *Animal*. 2022;16(8):100595. doi: 10.1016/j.animal.2022.100595
25. Lopez-Aguirre D, Hernandez-Melendez J, Rojo R, Sanchez-Davila F, Lopez-Villalobos N, Salem AFZM, Martinez-Gonzalez JC, Vazquez-Armijo JF, Ruiz S. Effects of exogenous enzymes and application method on nutrient intake, digestibility and growth performance of Pelibuey lambs. *Springer Plus*. 2016;5:1399. doi: 10.1186/s40064-016-3075-7
26. Lucio BSV, Hernandez-Dominguez E, Villa-Garcia M, Diaz-Godinez G, Mandujano-Gonzalez V, Mendoza-Mendoza B, Alvarez Cervantes J. Exogenous enzymes as zootechnical additives in animal feed: a review. *Catalysts*. 2021;11(7):851. doi: 10.3390/catal11070851
27. Lunsin R, Pilajun, R, Cherdthong A, Wanapat M, Duanyai S, Sombatsri P. Influence of fibrolytic enzymes in total mixed ration containing urea-molasses-treated sugarcane bagasse on the performance of lactating Holstein–Friesian crossbred cows. *Animal Science Journal*. 2021;92(1):e13652. doi: 10.1111/asj.13652
28. Manju GU, Sreesujatha RM, Naveen Kumar S, Giridhar KS, Suma, Ananth Krishna LR. Effect of supplementation of cellulolytic enzymes on the performance of growing mandya lambs fed with urea treated farm sugarcane bagasse. *International Journal of Current Microbiology And Applied Sciences*. 2019;8(11):502-509. doi: 10.20546/ijcmas.2019.811.061

29. Marimuthu M, Sorimuthu A, Sankareswaran M. Production and optimization of xylanase enzyme from bacillus subtilis using agricultural wastes by solid state fermentation. *International Journal of Pharmaceutical Investigation*. 2019;9(4):169-173. doi: 10.5530/ijpi.2019.4.32
30. Mendoza GD, Loera-Corral O, Plata-Perez FX, Hernandez-Garcia PA, Ramirez-Mella M. Considerations on the use of exogenous fibrolytic enzymes to improve forage utilization. *Scientific World Journal*. 2014; 2014:247437. doi: 10.1155/2014/247437
31. Mousa GA, Allak MA, Hassan OGA. Influence of fibrolytic enzymes supplementation on lactation performance of ossimi ewes. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*. 2022;10(1):27-34. doi: 10.17582/journal.aavs/2022/10.1.27.34
32. Neumann M, Leao GFM, Horst EH, Stuaní OF, Sangali CP, Castilho R. Exogenous enzymes improve performance and carcass traits of feedlot cattle fed high-grain diet. *Revista brasileira de zootecnia*. 2018a;47:e20170308. doi: 10.1590/rbz4720170308
33. Neumann M, Leao GFM, Vigne GLD, Santos LC, Venancio BJ, Dochwat, A. Xylanase - complex efficacy in high-energy diet for bulls finished in feedlot. *Acta Scientiarum Animal Sciences*. 2018b;40:e37321. doi: 10.4025/actascianimsci.v40i1.37321
34. Ojha BK, Singh PK, Shrivastava N. Chapter 7 - Enzymes in the Animal Feed Industry. In: Kuddus M, editor. *Enzymes in Food Biotechnology*. USA, MA, Cambridge: Academic Press; 2019:93-109. doi: 10.1016/B978-0-12-813280-7.00007-4
35. Ran T, Saleem AM, Shen Y, Ribeiro GO, Beauchemin KA, Tsang A, Yang W, McAllister TA. Effects of a recombinant fibrolytic enzyme on fiber digestion, ruminal fermentation, nitrogen balance, and total tract digestibility of heifers fed a high forage diet1. *J Anim Sci*. 2019;97(8):3578-3587. doi: 10.1093/jas/skz216
36. Rathinam NK, Samanta D, Kumar A, Sani R. Bioprospecting of thermostable cellulolytic enzymes through modeling and virtual screening method. *Canadian Journal of Biotechnology*. 2017;1(1):19-25. doi: 10.24870/cjb.2017-000105
37. Refat B, Christensen DA, Ismael A, Feng X, Rodriguez-Espinosa M, Guevara-Oquendo VH, Yang J, Alzahal O, Yu P. Evaluating the effects of fibrolytic enzymes on rumen fermentation, omasal nutrient flow and production performance in dairy cows during early lactation. *Canadian Journal of Animal science*. 2022;102(1):39-49. doi: 10.1139/cjas-2020-0062
38. Refat B, Christensen DA, McKinnon JJ, Yang W, Beattie AD, McAllister TA, Eun JS, Abdel-Rahman GA, Yu P. Effect of fibrolytic enzymes on lactational performance, feeding behavior, and digestibility in high-producing dairy cows fed a barley silage-based diet. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(9):7971-7979. doi: 10.3168/jds.2017-14203
39. Rodrigues GRD, Siqueira MTS, Dutra TO, Schultz EB, Sousa LF, Macedo GL. Uso de enzima amilolítica associada a enzimas proteolíticas e fibrolíticas na dieta para ovinos. *Revista Agraria Acadêmica*. 2022;5(3):59-72. doi: 10.32406/v5n3/2022/59-72/agrariacad
40. Shakya J, Balhara AK, Dahiya SS, Lailar PC, Singh I. Improved dairy production through enzyme supplementation. *The Indian Journal of Animal Sciences*. 2019;89(10):1045-1061. doi: 10.56093/ijans.v89i10.94995
41. Shekhar C, Thakur SS, Shelke SK. Effect of exogenous fibrolytic enzymes supplementation on milk production and nutrient utilization in Murrah buffaloes. *Trop Anim Health Prod*. 2010;42:1465-1470. doi: 10.1007/s11250-010-9578-2
42. Silva DL, Dalolio FS, Teixeira LV, Sens Rafael, Albino LFT, Rostagno Horacio. Impact of the supplementation of exogenous protease and carbohydrase on the metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility of soybean meals in two Brazilian regions. *Brazilian Journal of Poultry Science*. 2022;24(04):001-010. doi: 10.1590/1806-9061-2021-1452
43. Singh A, Anil, Nair PM, Yadav S, Jamadar P, Tiwari J, Durge A. A review on the role of exogenous fibrolytic enzymes in ruminant nutrition. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2022;41(36):45-58. doi: 10.9734/CJAST/2022/v41i363966
44. Soltan Y, Patra A. Ruminal microbiome manipulation to improve fermentation efficiency in ruminants. In: Patra AK, editor. *Animal Feed Science and Nutrition. Production, Health and Environment [Internet]*. 2022. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.101582>
45. Sujani S, Seresinhe RT. Exogenous enzymes in ruminant nutrition: A review. *Asian Journal of Animal Sciences*. 2015;9(3):85-99. doi: 10.3923/ajas.2015.85.99

46. Tirado-Gonzalez DN, Miranda-Romero LA, Ruiz-Flores A, Medina-Cuellar S, Ramirez-Valverde R, Tirado-Estrada G. Meta-analysis: effects of exogenous fibrolytic enzymes in ruminant diets. *Journal of Applied Animal Research*. 2018;46(1):771-783. doi: 10.1080/09712119.2017.1399135
47. Trejo LT, Zepeda BA, Franco FJ, Soto SS, Ojeda RD, Ayala MM. Uso de extracto enzimatico de *Pleurotus ostreatus* sobre los parametros productivos de cabras. *Abanico Vet*. 2017;7(2):14-21. doi: 10.21929/abavet2017.72.1
48. Ugwuanyi JO. Chapter 10 - Enzymes for nutritional enrichment of agro-residues as livestock feed. In: Gurpreet SD, Surinder K, editors. *Agro-Industrial Wastes as Feedstock for Enzyme Production*. USA, MA, Cambridge: Academic Press; 2016:233-260. doi: 10.1016/B978-0-12-802392-1.00010-1
49. Yang JC, Guevara-Oquendo VH, Refat B, Yu P. Effects of exogenous fibrolytic enzyme derived from *trichoderma reesei* on rumen degradation characteristics and degradability of low-tannin whole plant faba bean silage in dairy cow. *Dairy*. 2022;3(2):303-313. doi: 10.3390/dairy3020023
50. Zayed MS, Szumacher-Strabel M, El-Fattah DAA, Madkour MA, Gogulski M, Stropfova V, Cieslak A, El-Bordeny N. Evaluation of cellulolytic exogenous enzyme-containing microbial inoculants as feed additives for ruminant rations composed of low-quality roughage. *The Journal of Agricultural Science*. 2020;158(4):326-338. doi: 10.1017/S0021859620000611
51. Zeuner B, Thomsen TB, Stringer MA, Krogh KBRM, Meyer AS, Holck J. Comparative characterization of *Aspergillus pectin* lyases by discriminative substrate degradation profiling. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:873. doi: 10.3389/fbioe.2020.00873

Информация об авторах:

Елена Андреевна Агафонова, магистрант 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, 29, тел.: 89619105051.

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.: 89228626402.

Ольга Вилориевна Кван, кандидат биологических наук, и.о. заведующего отделом 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, 29, тел.: 89225485657.

Information about the authors:

Elena A Agafonova, master student of the Department of Feeding Farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., 460000, Orenburg, tel.: 89619105051.

Elena V Sheida, Cand Sci. (Biology), Researcher at the Laboratory of Biological Testing and Expertise, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., 460000, Orenburg, tel.: 89228626402.

Olga V Kvan, Cand Sci. (Biology), Acting Head of the Department of Feeding farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 9 Yanvarya St., 460000, Orenburg, phone: 89225485657.

Статья поступила в редакцию 08.02.2023; одобрена после рецензирования 21.02.2023; принята к публикации 20.03.2023.

The article was submitted 08.02.2023; approved after reviewing 21.02.2023; accepted for publication 20.03.2023.