

Введение

Магний (Mg^{2+}) относится к эссенциальным элементам, без которых организм не способен осуществлять свою жизнедеятельность, по распространенности занимает второе место среди внутриклеточных катионов, а содержание его в живых клетках варьирует в пределах 0,02 - 0,03% в зависимости от их дифференциации. Выступает в качестве кофактора более 300 ферментов, что является абсолютным рекордом среди минеральных компонентов клеточного метаболизма. Он входит в качестве активного центра в состав: гексокиназ, дезоксирибонуклеаз, β -оксиплаз, транскетолаз, пентозомонофосфатаз, топоизомераз, хеликаз и циклаз (Ahmed and Mohammed, 2019). Участвует в энергетическом обмене в виде комплекса с аденазинтрифосфатом в митохондриях, регуляции проницаемости возбудимых мембран, поддерживает целостность рибосом и митохондрий, входит в состав хлорофилла растений. Магний также выполняет неферментативные функции: сворачивание рибонуклеотидных цепей путем связывания с фосфатными группами, тем самым формирует и поддерживает структуру хромосом. В животных клетках необходим для функционирования мышечных и костных систем, при этом зачастую выступает в качестве функционального антагониста кальция (Ca^{2+}), обеспечивая тем самым прецизионную балансировку в организме большинства макро- и микро- катионов. целостности.

Mg^{2+} играет важную роль в усвоении Ca^{2+} из кишечника и мобилизации его из костей, что необходимо для поддержания уровня Ca^{2+} в крови. Взаимосвязь между потреблением магния с пищей и хронической обструктивной болезнью легких, а также функцией легких, обнаруженная для человека (Lin at al., 2024; Tan at al., 2024) не изучалась на жвачных, но ее проявления могли остаться незамеченными на фоне других расстройств, поскольку установлено, что субклинический дефицит Mg^{2+} может вызывать выработку воспалительных цитокинов и свободных радикалов, индуцируя хроническое вялотекущее воспаление (Barbagallo at al., 2022).

Обнаружено влияние Mg^{2+} на различные процессы, участвующие в модуляции гемопоэза. Экспериментальные исследования показали, что тяжелый дефицит Mg^{2+} приводит к изменениям в костном мозге, а вне- и внутриклеточные концентрации Mg^{2+} критически важны для активации и пролиферации лимфоцитов, и что дефицит Mg^{2+} может влиять на функцию этих клеток в периферической крови, снижая выработку иммуноглобулинов и количество клеток, продуцирующих антитела. Дисбаланс Mg^{2+} может нарушить процесс гемопоэза, а также эффективную деятельность зрелых клеток крови. Дефицит Mg^{2+} наиболее сильно поражает нейтрофилы, но эозинофилы и тучные клетки также могут быть затронуты. Гипомагниемия вызывает увеличение количества эозинофилов в периферической крови, что приводит к увеличению числа тучных клеток в различных тканях и в костном мозге, нарушая их функцию (Lima and Fock, 2020).

Магний регулирует иммунологические функции, воздействуя на клетки врожденной и адаптивной иммунной системы. Дефицит магния активизирует фагоциты, усиливает окислительный взрыв гранулоцитов, активизирует эндотелиальные клетки и повышает уровень цитокинов, тем самым способствуя воспалению. Следовательно, низкий уровень магния, который часто остается недиагностированным, усиливает реактивность на различные иммунные воздействия и участвует в патофизиологии многих распространенных хронических заболеваний (Maier at al., 2021). Mg^{2+} способствует липогенезу в адипоцитах и через индукцию активности глицеральдегид-3-фосфатдегидрогеназы, ключевого фермента гликолиза, при низкой концентрации инсулина может противодействовать чрезмерной липомобилизации (Becker at al., 2021). Микроорганизмы рубца нуждаются в Mg для катализа многих из вышеперечисленных функций, и его дефицит заметно ухудшает целлюлолитическую активность в рубце.

Потребность. Обеспечение крупного рогатого скота достаточным количеством Mg^{2+} важно для поддержания его здоровья и предотвращения дефицита этого элемента. Для мясного и молочного крупного рогатого скота рекомендуется потребление Mg^{2+} в диапазоне от 1,2 до 3 граммов на килограмм сухого вещества в зависимости от продуктивности и физиологического состояния животного (Martens, 2018). Уровень Mg^{2+} в плазме крови у коров колеблется в пределах от 0,9 до 1,2 ммоль (Аринжанова, 2024), распределенного между двумя формами: одна прочно связана с белком (32%), другая свободна и ионизирована (68%). Содержание магния в плазме отражает равновесие, достигнутое между внеклеточным, внутриклеточным и скелетным пулами магния, и не регулируется гормонами (Schweigel, and Martens, 2000).

Суточная потребность организма в Mg^{2+} определяется динамическим равновесием между количеством всасываемого из пищеварительного тракта и расходами на метаболизм и потери с мочой, калом, через кожу и волосы. Как недостаточное, так и избыточное поступление Mg^{2+} в организм сопровождается расстройствами нервно-рефлекторной функции и другими осложнениями. При этом запасы в виде отложения в костях мало функциональны не столько по причине низкой скорости мобилизации, сколько ввиду высокой роли в поддержании структурной целостности, которая по некоторым оценкам даже выше, чем недостаток витамина D (Reddy and Edwards, 2019; Piuri, 2021). Снижение уровня Mg^{2+} в мышечной ткани также сопровождается функциональными расстройствами в виде судорог, мышечной слабости и тетании. Уровень Mg^{2+} в крови поддерживается организмом даже при существенных потерях организма (до 20%), что свидетельствует о его важной роли в водно-солевом балансе и поддержании электрического потенциала клеточных мембран (Piuri, 2021). Дефицит Mg^{2+} является, наиболее недооцененным электролитным дисбалансом, часто сопровождается метаболическим синдромом. Разовое введение дополнительных доз Mg^{2+} с кормом или внутривенно, улучшает состояние при метаболическом синдроме за счет снижения артериального давления, гипергликемии и гипертриглицеридемии. Это происходит как за счет модуляции экспрессии генов и протеомного профиля, так и за счет положительного влияния на состав кишечной микробиоты и метаболизм витаминов B1 и D (Reddy and Edwards, 2019; Piuri, 2021).

Уровень Mg^{2+} в плазме поддерживается в пределах нормы за счет динамического равновесия между процессами всасывания в желудочно-кишечном тракте и выведения почками. Нарушения баланса могут быть вызваны высоким содержанием сырого белка в рационе, что сопровождается пониженным всасыванием Mg^{2+} и гипомагниемией (Martens, 2018). Частой разбалансировке уровня Mg^{2+} способствует дисфункция толстого восходящего отдела почечных канальцев, поскольку 70% выведенного с мочой Mg^{2+} реабсорбируется именно в этом отделе (Flatman, 1991).

Крупный рогатый скот при дефиците магния демонстрируют быстрое снижение его уровня в плазме, пропорционально степени дефицита магния в рационе. При этом, уровень потерь магния с мочой снижается практически до нуля, а потери через секрецию в кишечник пропорциональны снижению уровня в плазме (Bell et al., 2006). Уровень магния в спинномозговой жидкости также снижается, но гораздо медленнее, что предполагает наличие механизма активного транспорта на гематоэнцефалическом барьере (Suttle, 2021).

Всасывание. Первичным и основным местом абсорбции Mg^{2+} у жвачных является рубец, где Mg^{2+} абсорбируется апикально как за счет потенциал-зависимых, так и потенциал-независимых механизмов поглощения, что отражает участие ионных каналов и электронейтральных транспортеров соответственно. Транспорт осуществляется вторично активным образом с помощью базолатерального Na^+ / Mg^{2+} обменника.

Транспорт магния через изолированный препарат эпителия рубца овец изучали с использованием различных солей магния: $MgCl_2$, аспартата магния, Mg-пидолата и Mg-ЭДТА. Измерения проводили в условиях короткого замыкания в камерах Уссинга. Полученные результаты показали, что скорость транспорта магния существенно не различалась между $MgCl_2$, аспартатом магния и Mg-пидолатом. Сделан вывод, что магний транспортируется как в свободном, так и в ионизированном виде. (Leonhard, 1990; Jittakhot, 2004)

На рубцовый транспорт Mg^{2+} существенно влияют различные факторы, такие как высокая концентрация K^+ , повышение концентрации аммиака, pH и содержание летучих жирных кислот. Нарушение абсорбции Mg^{2+} в рубце, как правило, не компенсируется увеличением транспорта в тонком или толстом кишечнике. Почечная экскреция может служить точной корректировкой концентрации в крови для компенсации избыточного поглощения Mg^{2+} . Дефицит же поступления Mg^{2+} из пищи не может быть компенсирован ни путем мобилизации Mg^{2+} из костной или мышечной ткани, ни путем усиления рубцовой абсорбции при постоянном содержании элемента в рационе. В таких ситуациях гипомagneзemia приводит, к снижению концентрации Mg^{2+} в спинномозговой жидкости и, как следствие, клиническим проявлениям тетании (Martens, 2018).

Ввиду антагонистических взаимодействий со щелочными и щелочноземельными элементами в процессе всасывания из пищеварительного тракта, содержание магния в пище должно быть сбалансированным как минимум относительно кальция, калия и цинка.

Установлено, что повышение концентрации K^+ в рубце тормозит поступление Mg^{2+} в кровь. Активный и трансцеллюлярный транспорт Mg^{2+} являются преобладающим путем его перехода из рубца в кровь. Увеличение концентрации K^+ имеет два механизма снижения поступления Mg^{2+} из пищи. С одной стороны, высокий уровень K^+ деполяризует разность потенциалов на апикальной мембране эпителия рубца, что снижает движущую силу электродиффузионного поглощения Mg^{2+} в эпителиальные клетки рубца, следовательно, уменьшает цитозольную и трансцеллюлярную составляющую абсорбции. С другой стороны, повышение концентрации K^+ увеличивает трансэпителиальную разность потенциалов, то есть, положительный потенциал со стороны крови и, следовательно, вызывает небольшой пассивный обратный поток Mg^{2+} по парацеллюлярному пути со стороны крови в просвет желудочно-кишечного тракта. Существует и электронезависимый механизм пассивного поглощения, который работает преимущественно при высокой концентрации Mg^{2+} в рубце, вследствие чего отрицательное воздействие K^+ может быть частично компенсировано этим нечувствительным к K^+ поглощением Mg^{2+} , только в случае, если в рубцовой жидкости присутствует высокая концентрация Mg^{2+} (Schweigel, and Martens, 2000)

Содержание в кормах. Содержание Mg^{2+} в растительных кормах, используемых для жвачных, варьирует как по видовому составу, так и в зависимости от агротехнологии, стадии вегетации способов заготовки и хранения. Наиболее богатые Mg^{2+} бобовые корма и жмых из семян масличных культур. Яровые травы, кукурузный силос и злаки имеют более низкое содержание Mg^{2+} , которого, тем не менее, достаточно для обеспечения потребностей диких и низкопродуктивных домашних животных (Аринжанова и соавт., 2024). В зависимости от конкретных условий достаточно часто возникает потребность его балансировки в рационе высокопродуктивных животных, что осуществляют, как правило, путем скармливания добавок с высоким содержанием Mg^{2+} (Colombo at al., 2022).

В природных источниках Mg^{2+} представлен в виде хлоридов (карналлит, бишофит), карбонатов (доломит, магнезит), сульфатов и оксидов (различные магнезии). В кормлении крупного рогатого скота используются все представленные соединения в разной степени очистки

от сопутствующих примесей. В последнее время все чаще стали применяться комплексные премиксы на основе хелатных соединений Mg^{2+} . Дополнительные источники Mg^{2+} различаются по биодоступности, и показатель растворимости является одним из определяющих факторов для ее оценки *in vitro* (Khiaosa-Ard et al., 2023), однако при этом могут оставаться не учтенными побочные эффекты влияния на пищеварение и метаболизм сопутствующих анионов и других примесей.

Оксид Mg^{2+} (жжёная магнезия) практически не растворяется в воде (растворимость $6,2 \times 10^{-4}$ г/100г при 20 °С). Получают обжигом минералов магнезита и доломита, а также бурсита. Вместо растворения он медленно взаимодействует с водой, образуя слабощелочной гидроксид. Легкая форма гигроскопична, но сильно прокаленный оксид воду почти не поглощает, зато легко растворяется в кислотах. В пищевой промышленности зарегистрирован в качестве пищевой добавки E530. Оксид Mg^{2+} обладает самой низкой биодоступностью из-за низкой растворимости и слабительного эффекта. Кроме источника Mg^{2+} может использоваться в качестве щелочного буфера в кормлении коров (Гречишников и соавт., 2023; Hassan et al., 2022).

Сравнение MgO и альтернативных источников ($CaMg(OH)_4$ и $CaMg(CO_3)_2$ в сочетании с щелочным буфером ($NaHCO_3$) показало, что оксид обладает наименее выраженным эффектом повышения продуктивности коров (Agustinho et al., 2022; Arce-Cordero et al., 2021). Замена MgO на $CaMg(CO_3)_2$ оказывало положительное влияние на рубцовую ферментацию независимо от наличия или отсутствия $NaHCO_3$ (Agustinho et al., 2022).

При использовании в качестве буферных растворов MgO , $CaMg(OH)_2$, $CaMgOH^+$ не установлено влияния добавок на состав рубцовой микробиоты, рубцовое брожение и усвояемость питательных веществ у лактирующих молочных коров, но использование оксида снижало потребление сухого вещества. Также у животных, получавших $CaMg(OH)_2$, наблюдалось снижение экскреции Mg^{2+} с фекалиями (Lobo et al., 2023a,b).

Скармливание бычкам на откорме смеси MgO (0,50%), с добавкой моненсина 25 мг/кг сухого вещества улучшило показатели продуктивности и характеристики туши при высокоэнергетических рационах для откорма и эффективность использования корма (Bethancourt-Garcia et al., 2024).

Соли $MgSO_4$ и $MgCl_2$ при использовании их в качестве дополнительного источника Mg^{2+} показали одинаково эффективное действие, однако выбор $MgCl_2$ представляется целесообразным из-за его более интересных клинических и фармакологических эффектов и меньшей тканевой токсичности по сравнению с $MgSO_4$ (Durlach et al., 2005).

Влияние на ферментацию в рубце различных источников Mg^{2+} . Использование оксида магния (MgO) в рационах откормочного скота с признаками подострого ацидоза в качестве нейтрализующего агента в дозах 0%, 0,25%, 0,50% или 0,75% от рациона, повышает pH рубца по мере увеличения добавки и смягчает симптоматику подострого ацидоза, однако улучшения показателей откорма и качества туши при этом, не наблюдалось (Colombo et al., 2022).

Замена MgO на карбонат кальция-магния показала, что $CaMg(CO_3)_2$ может быть жизнеспособным альтернативным источником Mg^{2+} в рационах молочных коров без влияния на растворимость минералов, pH рубца, усвояемость питательных веществ, общее содержание летучих жирных кислот и их соотношение. Несмотря на то, что указанные источники Mg^{2+} обладают ощелачивающим эффектом, дополнительное включение $NaHCO_3$ позволило повысить среднюю кислотность рубца, а также увеличить поток изобутирата и связанного азота (Agustinho et al., 2022). Использование $CaMg(OH)_2$ увеличивало концентрацию HCO_3^- в крови, общее содержание CO_2 и избыток оснований по сравнению с коровами, получавшими MgO . Различий в растворимости Ca и Mg в рубце, а также в экскреции Ca и Mg с молоком и

мочой не наблюдалось. У животных, получавших MgO, наблюдалась более высокая концентрация Mg в плазме по сравнению с коровами, получавшими CaMg(OH)₂, однако оба источника превышали пороговое значение, рекомендованное в литературе для молочных коров. Также у животных, получавших CaMg(OH)₂, наблюдалось снижение экскреции Mg²⁺ с фекалиями. В то же время, использование CaMg(OH)₂ может улучшить рубцовое брожение независимо от использования буфера, что указывает на возможность использования минеральной добавки в рационе для модуляции состава рубцовой микробиоты (Lobo et al., 2023a).

Эксперименты по оценке различных рубцовых буферов и их влияние на pH рубца и продукцию у молочных коров показали, что известковые морские водоросли (*Lithothamnion calcareum*) с добавлением MgO и NaHCO₃ повышали средний уровень pH рубца, потребление сухого вещества, увеличили выход молочного жира, белка и эффективность производства молока (Neville et al., 2019).

Для надежного прогнозирования доступности Mg²⁺ из различных источников используют тесты на растворимость *in vitro*. Результаты показали, что уксусный тест является лучшим методом благодаря своей надежности, простоте и воспроизводимости, а различия между большинством источников Mg²⁺ по доступности для организма параллельны данным по растворимости *in vitro*. Метаанализ результатов опубликованных исследований показал, что в среднем молочные коровы усваивают около 20% потребляемого Mg²⁺ (диапазон 10-40%), независимо от их лактационного статуса. Разработаны уравнения регрессии прогнозирования абсорбции Mg²⁺ относительно содержания калия в рационе. При содержании K⁺ в рационе ≤20 г/кг сухого вещества: истинная абсорбция Mg²⁺ (г/сут) = 0,3395 (±0,025, P < 0,001) × потребление Mg²⁺ (г/сут) - 1,9273 (±1,16, P = 0,11). При содержании K⁺ в рационе >20 г/кг сухого вещества: истинная абсорбция Mg²⁺ (г/сут) = 0,154 (±1,06, P = 0,05) + 0,209 (±0,026, P < 0,001) × потребление Mg²⁺ (г/сут). Уравнения позволяют прогнозировать абсорбцию при допустимой среднеквадратической ошибке (RMSE) 2,19. Эта стратегия повышает точность прогнозирования по сравнению с существующей стратегией (коэффициенты корреляции R² = 0,922 против R² = 0,845). Тем не менее, в отдельных исследованиях наблюдались завышенные или заниженные оценки, которые могли быть связаны с неучтенными факторами, особенно с качеством дополнительных источников Mg²⁺ (Khiaosa-Ard et al., 2023).

Анализ литературных данных показывает, что для балансировки рационов высокопродуктивных коров, особенно в начале и на пике лактации, необходимо наличие доступных и эффективных добавок Mg²⁺, обладающих минимальными побочными негативными эффектами. Разработка таких добавок ведется во всех ведущих сельскохозяйственных странах. Основой служат природные источники, а также побочные продукты производства промышленных и пищевых Mg²⁺-содержащих компонентов.

Цель работы состояла в сравнительной оценке Mg²⁺-содержащих препаратов предназначенных для кормления сельскохозяйственных животных при использовании их в качестве балансировки рационов: оксид магния и гидроокись магния.

Материалы и методы исследований

Экспериментальная часть работы проведена в условиях вивария института на коровах холмогорской породы 2-3 лактации на 7-8 месяце лактации. Содержание коров привязное, кормление из кормушек при постоянном доступе к кормам и воде.

Исследования проведены методом групп-периодов на 6-ти головах в 2 периода продолжительностью 28 дней каждый. Во время опыта коровы получали сено-силосно-

концентратный рацион согласно живой массе и уровню молочной продуктивности (табл.1). В конце каждого периода были проведены балансовые опыты для определения потребления и использования магния с кормом с учетом остатков кормов, а также выделения его с калом, мочой и молоком. В пробах кормов, кала, мочи и молока определяли концентрацию магния.

В первый период коровы получали основной рацион, а во второй период коровы были разделены на две группы (по 3 головы), каждая из которых дополнительно к рациону получала окись магния марки «МКМ» (1-ая группа) и гидроокиси магния марки «Агромаг®» (2-ая группа).

Долгое время усвояемость минеральных веществ из рациона принимали за постоянную величину. При этом, количество магния, необходимое животным и рассчитанное факториальным методом существенно (до 25%) различалось в различных системах нормированного кормления для коров. Последнее время, при расчете потребности в магнии учитывают уровень калия в рационе (Khiaosa-Ard et al., 2023).

В основном рационе (табл.1) в составе растительных кормов содержалось 16 г Mg^{2+} , что полностью обеспечивало все текущие потребности опытных животных в этом макроэлементе. Рекомендованные дозы Mg^{2+} , для профилактики тетании составляют 25–30 г оксида магния в день для взрослых молочных коров (Suttle, 2021). Исходя из этого, в опытный период животным скармливали ежедневно скармливали 30 г окиси магния марки (1-ая группа) и 40 г гидроокиси магния (2-ая группа), что повышало содержание Mg^{2+} в рационе до 27 г. Таким образом, суточная доза скармливаемого магния в период проведения исследований полностью удовлетворяла потребности животных и при этом не выходила за пределы существующих норм.

Видимая переваримость магния растительных кормов может варьироваться более чем в десять раз, что определяет ошибку в оценке потребности и риск развития расстройств (Suttle, 2021). Для того чтобы справиться с таким широким диапазоном вариаций, необходимо понимание метаболизма магния, причем не только в процессе его абсорбции из желудочно-кишечного тракта.

Чтобы оценить «истинную» переваримость магния кроме видимой разницы между потреблением с кормом и выделением с калом и мочой, необходимо учесть, так называемые, «эндогенные потери», которые складываются из суммарных потерь в процессе основного (голодного) обмена и затрат на продуктивность с учетом эффективности использования питательных веществ, всосавшихся из желудочно-кишечного тракта, в метаболических процессах. Условно динамический баланс магния можно представить в виде бака (организм животного) с отверстием для слива (эндогенные потери), в котором необходимо поддерживать определенный уровень путем наполнения через регулируемый вентиль (потребление с кормом). Проблема состоит в том, что организм активно регулирует как подачу – за счет изменения переваримости в желудочно-кишечном тракте в зависимости от количества в пище калия, кальция, анионов и аминокислот, так и сброс – при снижении поступления с кормом выведение через почки в мочу линейно снижается (Bell et al., 2006). Накопление запасов магния в организме происходит путем повышения его содержания в различных органах: крови, лимфе, мышечной и костной ткани. При этом пул магния распределяется по этим структурам неравномерно, например уровень магния в спинномозговой жидкости, при колебаниях в крови, поддерживается на одном уровне (Suttle, 2021). Таким образом, истинная абсорбция магния может оцениваться только косвенно, на основе данных баланса с учетом эндогенных потерь (Schweigel and Martens, 2000; Suttle, 2021).

Для оценки усвоения магния из изученных источников нами принято допущение, что переваримость магния основного рациона остается неизменной, как и эндогенные потери. На основе баланса магния на основном рационе и при использовании магниевых добавок проводили расчет усвояемости магния из изучаемых его источников дифференцированным методом.

Таблица 1. Рацион кормления коров в опыте

Показатели	Периоды опыта		
	Основной рацион	1-ая группа	2-ая группа
Сено, кг	2,0	2,0	2,0
Комбикорм, кг	4,3	4,3	4,3
Силос кукурузный, кг	17,5	17,5	17,5
Окись магния «МКМ», г	0	30	
Гидроокись магния «АгроМаг®», г	0	0	40

Достоверность различий между группами определяли с использованием критерия t-тест по методу парных сравнений.

Результаты исследований

Анализируя результаты опытов, следует отметить, что баланс изучаемого элемента во всех группах был положительным. Ввод источников магния в рацион не оказывал влияние на потребление основных кормов. Остатки были не существенными. Обеспеченность рационов магнием была выше во все периоды была несколько выше норм потребностей при данной продуктивности.

Из основного рациона магний усваивался достаточно хорошо (33,9%). (табл.2). Основное выделение магния происходило с калом и незначительная часть выделялась с молоком и мочой. Увеличение содержания магния в рационе за счет ввода дополнительных его источников, сопровождалось большими достоверными выделениями этого элемента с калом, но усвоение магния из рационов при этом повышалось до 41-42%, за счет, вероятно, лучшей усвояемости его из минеральных испытуемых источников по сравнению с основными кормами (сено, силос, комбикорм). Выделение магния с мочой и молоком, при этом, достоверно не изменялось. Ретенция магния в организме коров опытных групп была значительно выше, чем на основном рационе. Достоверных различий ни по одному из изученных показателей между опытными группами не обнаружено.

Таблица 2. Баланс магния в организме коров

	Основной рацион	1-ая группа	2-ая группа
Потреблено, г	15,81±0,57	26,46±0,55	26,64±0,53
Выделено, г:			
с калом	10,54±0,26	15,6±1,28*	15,4±0,29*
Усвоено магния из рациона, %	33,9±1,1	41,2±3,9*	42,1±0,61*
Выделено, г:			
мочой	1,06±0,072	1,21±0,064	0,88±0,078
молоком	0,92±0,003	0,86±0,015	0,75±0,015
отложено	3,54±0,2	9,56±1,41*	10,1±0,18*

*-достоверность различий с основным рационом при $p < 0.05$

Для сравнения истинного усвоения магния из разных источников провели расчет усвояемости магния из различных источников. Для этого применили дифференцированный метод. Для этого рассчитали исходные данные для расчета усвояемости магния из различных источников сравнением показателей распределения магния по группам исходя из балансовых опытов (табл.3).

Таблица 3. Исходные данные для расчета усвояемости магния из различных источников

Принято магния из смеси, г		11,32±0.01	11,5±0.01
Выделено с калом из рациона (расчетные данные)		10,0±0,36	10,0±0,36
Выделено с калом из источника		5,56±1,01	5,38±0,18
Усвояемость магния из источника, %		50,5±4,82	53,0±1,59

Расчет усвоения магния из оксида магния:

1. Принято магния с основным рационом в опыте с добавками $26,46 - 11,32 = 15,14$ г, с добавкой оксида магния 30 г.
2. В кале магний из основного рациона = $15,14 * 0,661 = 10,0$ г
3. В кале магний от добавки = $15,6 - 10,0 = 5,6$ г
4. Усвояемость магния добавки = $1 - 5,6 / 11,32 = 50,5\%$

Расчет усвоения магния из гидроокиси магния:

2. Принято магния с основным рационом в опыте с добавками $26,64 - 11,5 = 15,14$ г, с добавкой гидрооксида магния 30 г.
2. В кале магний из основного рациона = $15,14 * 0,661 = 10,0$ г
3. В кале магний от добавки = $15,4 - 10,0 = 5,4$ г
4. Усвояемость магния добавки = $1 - 5,4 / 11,5 = 50,5\%$

Заключение

Проведенные исследования позволили оценить усвояемость двух источников магния в кормлении коров на уровне 50,5% для оксида магния и 53,1% для гидрооксида магния в опытах на дойных коровах, что выше чем из кормов рациона в 1,47-1,57 раза.

Список литературы

1. Аринжанова М. С., Мирошников И. С., Рязанов В. А., Соболева Н. В. Применение магния в кормлении сельскохозяйственных животных и птиц (обзор). Известия НВ АУК. 2024. 6(78). 255-265. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-06-27.
2. Гречишников В., Панин А., Михальчук Е., Синин М., Яковцев Г., Фектистова Л. Научный подход к выбору буферов в кормлении молочных коров. Эффективное животноводство, 2023. №1 (183). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnyy-podhod-k-vyboru-buferov-v-kormlenii-molochnyh-korov>.

3. Agostinho, B. C., Ravelo, A., Vinyard, J. R., Lobo, R. R., Arce-Cordero, J. A., Monteiro, H. F., Sarmikasoglou, E., Bennett, S., Johnson, M. L., Vieira, E. R. Q., Stoffel, C., Stocks, S. E., & Faciola, A. P. (2022). Effects of replacing magnesium oxide with calcium-magnesium carbonate with or without sodium bicarbonate on ruminal fermentation and nutrient flow in vitro. *Journal of dairy science*, 105(4), 3090–3101. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20995>
4. Ahmed F, Mohammed A. Magnesium: The Forgotten Electrolyte-A Review on Hypomagnesemia. *Med Sci (Basel)*. 2019 Apr 4;7(4):56. doi: 10.3390/medsci7040056. PMID: 30987399; PMCID: PMC6524065.
5. Arce-Cordero, J. A., Ravelo, A., Vinyard, J. R., Monteiro, H. F., Agostinho, B. C., Sarmikasoglou, E., Bennet, S. L., & Faciola, A. P. Effects of supplemental source of magnesium and inclusion of buffer on ruminal microbial fermentation in continuous culture. *Journal of dairy science*, 2021. 104(7), 7820–7829. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-20020>
6. Barbagallo M., Veronese N., Dominguez L. J. Magnesium in Type 2 Diabetes Mellitus, Obesity, and Metabolic Syndrome. *Nutrients*. 2022. V. 14. 714 p. <https://doi.org/10.3390/nu14030714>
7. Becker, S. K., Sponder, G., Sandhu, M. A., Trappe, S., Kolisek, M., & Aschenbach, J. R. The Combined Influence of Magnesium and Insulin on Central Metabolic Functions and Expression of Genes Involved in Magnesium Homeostasis of Cultured Bovine Adipocytes *Int. J. Mol. Sci.* 2021 , 22 (11), 5897; <https://doi.org/10.3390/ijms22115897>
8. Bell, S.T., McKinnon, A.E. and Sykes, A.R. Estimating the risk of hypomagnesaemic tetany in dairy herds. In: Kebreab, E., Dijkstra, J., Bannink, A., Gerrits, W.J.J. and France, J. (eds) *Nutrient Digestion and Utilization in Farm Animals: Modelling Approaches*. CAB International, Wallingford, UK, 2006., pp. 211–228. DOI:10.1079/9781845930059.0211
9. Bethancourt-Garcia, J. A., Ladeira, M. M., Nascimento, K. B., Ramirez-Zamudio, G. D., Meneses, J. A. M., Galvão, M. C., Bernardes, T. F., & Gionbelli, M. P. Effects of monensin and a blend of magnesium oxide on performance, feeding behavior, and rumen morphometrics of Zebu beef cattle fed high-starch diets. *Translational animal science*, 2024., 8, txae131. <https://doi.org/10.1093/tas/txae131>
10. Colombo EA, Cooke RF, Araújo ACR, Harvey KM, Pohler KG, Brandão AP. Supplementing a blend of magnesium oxide to feedlot cattle: effects on ruminal, physiological, and productive responses. *J Anim Sci*. 2022 Jan 1;100(1):skab375. doi: 10.1093/jas/skab375. PMID: 34951640; PMCID: PMC8919815.
11. Durlach, J., Guiet-Bara, A., Pagès, N., Bac, P., & Bara, M. Magnesium chloride or magnesium sulfate: a genuine question. *Magnesium research*, 2005., 18(3), 187–192.
12. Flatman P. W. Mechanisms of magnesium transport. *Annual review of physiology*, 1991., 53, 259–271. <https://doi.org/10.1146/annurev.ph.53.030191.001355>
13. Hassan M. A. S., Karsh M. A. The effects of some feed additives in nutrition of ruminant animals. *International Journal of Veterinary and Animal Research (IJVAR)*. 2022. V. 5. Pp. 107-112. IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.72846. <https://www.intechopen.com/chapters/58507> .
14. Jittakhot, S., Schonewille, J. T., Wouterse, H. S., Yuangklang, C., & Beynen, A. C. The relationships between potassium intakes, transmural potential difference of the rumen epithelium and magnesium absorption in wethers. *The British journal of nutrition*, 2004., 91(2), 183–189. <https://doi.org/10.1079/BJN20031045>
15. Khiaosa-Ard, R., Ottoboni, M., Verstringe, S., Gruber, T., Hartinger, T., Humer, E., Bruggeman, G., & Zebeli, Q. Magnesium in dairy cattle nutrition: A meta-analysis on magnesium absorption in dairy cattle and assessment of simple solubility tests to predict magnesium availability from supplemental sources. *Journal of dairy science*, 2023., 106(12), 8758–8773. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23560>
16. Leonhard, S., Smith, E., Martens, H., Gäbel, G., & Ganzoni, E. Transport of magnesium across an isolated preparation of sheep rumen: a comparison of MgCl₂, Mg aspartate, Mg pidolate, and Mg-EDTA. *Magnesium and trace elements*, 1990., 9(5), 265–271.

17. Lima Fd. S., Fock R. A. A review of the action of magnesium on several processes involved in the modulation of hematopoiesis. *Int. J. Mol. Sci.* 2020 , 21 (19), 7084; <https://doi.org/10.3390/ijms21197084>
18. Lin, Z. F., Lin, H. W., Liao, W. Z., Huang, Z. M., Liao, X. Y., Wang, Y. Y., & Guo, X. G. The Association Between Dietary Magnesium Intake with Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Lung Function in US Population: a Cross-sectional Study. *Biological trace element research*, 2024., 202(7), 3062–3072. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04073-z>
19. Lobo, R. R., Arce-Cordero, J. A., Agostinho, B. C., Ravelo, A. D., Vinyard, J. R., Johnson, M. L., Monteiro, H. F., Sarmikasoglou, E., Roesch, L. F. W., Jeong, K. C. C., & Faciola, A. P. Can dietary magnesium sources and buffer change the ruminal microbiota composition and fermentation of lactating dairy cows?. *Journal of animal science*, 2023., 101, skad211. <https://doi.org/10.1093/jas/skad211>
20. Lobo, R. R., Arce-Cordero, J. A., So, S., Soltis, M., Nehme Marinho, M., Agostinho, B. C., Ravelo, A. D., Vinyard, J. R., Johnson, M. L., Monteiro, H. F., Sarmikasoglou, E., & Faciola, A. P. Production, physiological response, and calcium and magnesium balance of lactating Holstein cows fed different sources of supplemental magnesium with or without ruminal buffer. *Journal of dairy science*, 2023., 106(2), 990–1001. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22583>
21. Maier J. A., Castiglioni S., Locatelli L., Zocchi M., Mazur A. Magnesium and inflammation: advances and perspectives. *Semin Cell Dev Biol.* 2021. V. 115. Pp. 37-44. DOI:10.1016/j.semcdb.2020.11.002
22. Martens, H., Leonhard-Marek, S., Röntgen, M., & Stumpff, F. Magnesium homeostasis in cattle: absorption and excretion. *Nutrition research reviews*, 2018, 31(1), 114–130. <https://doi.org/10.1017/S0954422417000257>
23. Neville, E. W., Fahey, A. G., Gath, V. P., Molloy, B. P., Taylor, S. J., & Mulligan, F. J. The effect of calcareous marine algae, with or without marine magnesium oxide, and sodium bicarbonate on rumen pH and milk production in mid-lactation dairy cows. *Journal of dairy science*, 2019, 102(9), 8027–8039. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16244>
24. Piuri, G., Zocchi, M., Della Porta, M., Ficara, V., Manoni, M., Zuccotti, G. V., Pinotti, L., Maier, J. A., & Cazzola, R. Magnesium in Obesity, Metabolic Syndrome, and Type 2 Diabetes. *Nutrients*, 2021., 13(2), 320. <https://doi.org/10.3390/nu13020320>
25. Reddy P, Edwards LR. Magnesium Supplementation in Vitamin D Deficiency. *Am J Ther.* 2019;26(1):e124-e132. doi:10.1097/MJT.0000000000000538
26. Schweigel, M., & Martens, H. Elektrophysiologische Veränderungen des Pansenepithels und deren Auswirkungen auf den Magnesiumtransport--eine Übersicht [Electrophysiologic changes in rumen epithelium in their effect on magnesium transport--a review]. *Berliner und Munchener tierärztliche Wochenschrift*, 2000., 113(3), 97–102.
27. Suttle, N. F. *Mineral nutrition of livestock*. 5th edition. Boston, CAB International, 2021, -598 P. <https://lccn.loc.gov/2021018862>
28. Tan, M. Y., Wang, J. T., Wang, G. P., Zhu, S. X., & Zhai, X. L. The Association Between Dietary Magnesium Intake and Pulmonary Function: Recent Findings from NHANES 2007-2012. *Biological trace element research*, 2024., 202(11), 4893–4902. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04061-3>

References (for publications in Russian)

1. Arinzhanova M. S., Miroshnikov I. S., Ryazanov V. A., Soboleva N. V. Primenenie magniya v kormlenii sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh i ptic (obzor). *Izvestiya NV AUK.* 2024. 6(78). 255-265. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-06-27 (In Russian)
2. Grechishnikov V., Panin A., Mihal'chuk E., Sinin M., Yakovcev G., Fektistova L. Nauchnyj podhod k vyboru buferov v kormlenii molochnyh korov. *Ehffektivnoe zhivotnovodstvo*, 2023. №1 (183.) (In Russian)

DOI: 636.2.084.11

Comparative evaluation of magnesium oxide-based and hydroxide-based feed preparations for dairy cows

Vasilevskiy N.V., Kharitonov E.L.

*Institute of Animal Physiology, Biochemistry and Nutrition,
branch of the Federal Research Center of Animal Husbandry, Ernst VIZh,
Borovsk, Kaluga oblast, Russian Federation*

ABSTRACT. A comparative evaluation of Mg²⁺-containing preparations intended for balancing feed rations for farm animals was conducted. The study was conducted using the group-period method on 6 dairy cows in two 28-day periods on a hay-silage-concentrate diet. During the first period, the cows received the basal ration, and during the second period, the cows were divided into two groups (3 animals each), each of which additionally received MKM magnesium oxide (Group 1) and Agromag® magnesium hydroxide (Group 2). At the end of each period, balance experiments were conducted to determine Mg²⁺ intake and utilization with feed, taking into account feed residues, as well as its excretion in feces, urine, and milk. Mg²⁺ concentrations were determined in feed, feces, urine, and milk samples. To assess Mg²⁺ absorption from the studied sources, it was assumed that Mg²⁺ digestibility in the basal diet remained unchanged, as did endogenous losses. Based on the Mg²⁺ balance in the basal diet and with magnesium supplements, magnesium digestibility from the studied sources was calculated using a differentiated method. The experimental results showed that the Mg²⁺ balance was positive in all groups. The addition of Mg²⁺ sources to the diet had no effect on the consumption of the main feeds. Residues were insignificant. The Mg²⁺ content of the diet was higher in all periods, slightly exceeding the required levels for a given performance level. Mg²⁺ was adequately absorbed by 33.9% of the basal diet, with the majority of excretion occurring in feces and a small portion excreted in milk and urine. Increasing the Mg²⁺ content in the diet by introducing additional sources resulted in significantly higher fecal excretion of this element, but its absorption from the diet increased to 41-42%. Mg²⁺ excretion in urine and milk, however, did not change significantly. Mg²⁺ retention in cows in the experimental groups was significantly higher than in those on the basic diet. No significant differences were found in any of the studied parameters between the experimental groups, which allows us to recommend MKM magnesium oxide and Agromag® magnesium hydroxide for supplementing the diets of dairy cows with Mg²⁺ to prevent hypomagnesia.

Keywords: magnesium oxide, magnesium hydroxides, hypomagnesia, dairy cow diet

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh – Problems of Productive Animal Biology, 2026.2: 74-85

Поступило в редакцию: 12.04.2026

Получено после доработки: 26.05.2026

Василевский Николай Владимирович, к.б.н., с.н.с., тел: 7(926)063-41-74,

e-mail: vasilevskii.n@mail.ru, orcid. 0000-0002-7437-2910;

Харитонов Евгений Леонидович, д.б.н., г.н.с., тел: (84838)43016,

e-mail: evgenijkharito@yandex.ru, orcid: 0000-0001-9654-7710