

Научная статья
УДК 636.2.034.087.7
doi: 10.48612/vch/xdkp-44k8-ft9u

МОДУЛЯЦИЯ ФЕРМЕНТАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ РУБЦА И АНТИОКСИДАНТНОГО СТАТУСА У КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КАОЛИНИТА: УСТАНОВЛЕНИЕ ДОЗАЗАВИСИМОГО ЭФФЕКТА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТАБОЛИЗМА

Николай Михайлович Орлов¹⁾, Наталья Евгеньевна Земскова¹⁾, Александр Геннадьевич Мещеряков¹⁾,
Венер Нуруллович Саттаров²⁾, Владимир Григорьевич Семенов³⁾

¹⁾Самарский государственный аграрный университет
446442, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, Российская Федерация

²⁾Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы
450077, г. Уфа, Российская Федерация

³⁾Чувашский государственный аграрный университет
428003, г. Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация. Современные исследования подтверждают важность применения специализированных добавок для коррекции окислительного стресса и улучшения физиологического статуса сельскохозяйственных животных. Цель работы: изучение влияния добавки на основе каолинита в различных дозировках на показатели рубцового пищеварения и антиоксидантный статус у лактирующих коров. Исследование проводилось в Самарской области на голштинизированном черно-пестром крупном рогатом скоте. Контрольная группа получала основной рацион, опытные группы дополнительно получали минеральную кормовую добавку каолинит в дозировках: 0,17, 0,18 и 0,19 г/кг массы в сутки соответственно. Для оценки показателей окислительного метаболизма производился забор крови из хвостовой вены с использованием вакуумных систем S-Monovette с консервантом КЗЭДТА, далее образцы анализировались на спектрофотометре UNICO 2800. Установлено, что оптимальной является доза 0,18 г/кг живой массы, которая к 140 суткам эксперимента достоверно увеличила общую концентрацию летучих жирных кислот на 12,67 % и вызвала перераспределение их спектра: повышение доли уксусной кислоты на 6,8 % и пропионовой на 3,96 %, при снижении содержания масляной кислоты на 13,3 %. Параллельно в этой группе отмечено улучшение антиоксидантного статуса: снижение уровня малонового диальдегида на 6,12 % и концентрации церулоплазмина на 16,66 %, что свидетельствует об эффективной защите от окислительного стресса. Доза 0,19 г/кг оказалась не эффективной, подтверждая наличие четкого оптимума дозирования. Таким образом, полученные данные демонстрируют двойной механизм действия каолинита: модуляция микробного метаболизма в рубце и системное антиоксидантное действие.

Ключевые слова: каолинит, крупный рогатый скот, рубцовое пищеварение, летучие жирные кислоты, антиоксидантный статус, малоновый диальдегид, церулоплазмин, окислительный стресс, продуктивность коров.

Для цитирования: Орлов Н. М., Земскова Н. Е., Мещеряков А. Г., Саттаров В. Н., Семенов В. Г. Модуляция ферментативных процессов рубца и антиоксидантного статуса у крупного рогатого скота при применении каолинита: установление дозозависимого эффекта и оптимизация параметров метаболизма // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025 №3(34). С. 86-93.

doi: 10.48612/vch/xdkp-44k8-ft9u

Original article

MODULATION OF RUMEN ENZYMATIC PROCESSES AND ANTIOXIDANT STATUS IN CATTLE USING KAOLINITE: ESTABLISHING A DOSE-DEPENDENT EFFECT AND OPTIMIZING METABOLIC PARAMETERS

Nikolai M. Orlov¹⁾, Natalia E. Zemskova¹⁾, Alexander G. Meshcheryakov¹⁾, Vener N. Sattarov²⁾,
Vladimir G. Semenov³⁾

¹⁾Samara State Agrarian University
446442, Kinel, Ust-Kinelsky settlement, Russian Federation

²⁾Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla
450077, Ufa, Russian Federation

³⁾Chuvash State Agrarian University
428003, Cheboksary, Russian Federation

Abstract. Modern research confirms the importance of using specialized supplements to correct oxidative stress and improve the physiological status of farm animals. The aim of the work: to study the effect of a kaolinite-based supplement in various dosages on rumen digestion indices and antioxidant status in lactating cows. The study was conducted in the Samara Region on Holsteinized black-and-white cattle. The control group received the basic diet, the experimental groups additionally received the mineral feed supplement kaolinite in dosages of 0.17, 0.18 and 0.19 g/kg of body weight per day, respectively. To assess the oxidative metabolism indices, blood was collected from the tail vein

using S-Monovette vacuum systems with K3EDTA preservative, then the samples were analyzed using a UNICO 2800 spectrophotometer. It was found that the optimal dose was 0.18 g/kg of live weight, which by day 140 of the experiment reliably increased the total concentration of volatile fatty acids by 12.67 % and caused a redistribution of their spectrum: an increase in the proportion of acetic acid by 6.8 % and propionic acid by 3.96 %, with a decrease in the content of butyric acid by 13.3 %. In parallel, an improvement in the antioxidant status was noted in this group: a decrease in the level of malondialdehyde by 6.12 % and in the concentration of ceruloplasmin by 16.66 %, which indicates effective protection against oxidative stress. A dose of 0.19 g/kg was ineffective, confirming the presence of a clear dosing optimum. Thus, the obtained data demonstrate a dual mechanism of action of kaolinite: modulation of microbial metabolism in the rumen and systemic antioxidant action.

Keywords: kaolinite, cattle, cicatricial digestion, volatile fatty acids, antioxidant status, malondialdehyde, ceruloplasmin, oxidative stress, cow productivity.

For citation: Orlov N. M., Zemskova N. E., Meshcheryakov A. G., Sattarov V. N., Semenov V. G. Modulation of rumen enzymatic processes and antioxidant status in cattle using kaolinite: establishing a dose-dependent effect and optimizing metabolic parameters // Vestnik Chuvash State Agrarian University. 2025 No. 3(34). Pp. 86-93.

doi: 10.48612/vch/xdkp-44k8-ft9u

Введение.

Ключевым аспектом физиологического состояния высокопродуктивных молочных коров, напрямую влияющим на их здоровье, продуктивность и долголетие, является антиоксидантный статус. Из-за интенсивного метаболизма, особенно в критические периоды лактации, сухостоя и отела, эти животные подвержены повышенному окислительному стрессу. Во время лактации резко возрастает образование свободных радикалов из-за высокой метаболической активности, направленной на синтез молока, что истощает запасы антиоксидантов, таких как витамины Е и С, селен, глутатионпероксидаза, и может привести к повреждению вымени и нарушению репродуктивной функции. Период сухостоя, напротив, служит фазой восстановления, когда метаболическая нагрузка снижается и появляется возможность укрепить антиоксидантную защиту с помощью сбалансированного рациона и добавок, подготавливая корову к предстоящим нагрузкам.

Наиболее критичным является период отела, характеризующийся резкими гормональными и метаболическими сдвигами, снижением потребления корма и пика окислительного стресса, что повышает риски кетоза, мастита и осложнений при родах. На антиоксидантный статус также значительное влияние оказывают факторы питания, условия содержания и генетическая предрасположенность. Поэтому для поддержания здоровья и высокой продуктивности стада необходимы комплексные меры: обогащение рациона антиоксидантными добавками, оптимизация условий содержания для минимизации стресса и регулярный мониторинг показателей здоровья в переходные периоды.

Важнейшей составляющей этих мер является разработка и внедрение научно обоснованных рационов, сбалансированных не только по основным питательным веществам, но и по микроэлементам-антиоксидантам. Особое внимание следует уделять периоду перехода от сухостоя к лактации, когда метаболические потребности резко возрастают, а потребление корма снижается. В это время эффективно применение пролонгированных форм антиоксидантов и парентеральное введение витаминно-минеральных комплексов. Данные различных исследований показывают перспективность использования синбиотиков

и фитогенных добавок, которые опосредованно усиливают эндогенную антиоксидантную защиту через оптимизацию рубцового пищеварения и метаболизма. Не менее важна модернизация систем содержания животных: обеспечение оптимального микроклимата, свободного доступа к воде и корму, сокращение факторов беспокойства. Регулярный мониторинг биохимических показателей крови (активность глутатионпероксидазы, уровень малонового диальдегида) позволяет объективно оценивать антиоксидантный статус и своевременно корректировать мероприятия. Интеграция геномной селекции с оценкой генов, ассоциированных с устойчивостью к окислительному стрессу, открывает новые возможности для создания высокоадаптивных молочных пород. Таким образом, поддержание оптимального антиоксидантного статуса требует комплексного подхода, сочетающего достижения в области кормления, селекции и управления здоровьем животных [2, 5-9, 12].

Тема применения биологически активных добавок в животноводстве активно изучается различными научными коллективами. В работе И. В. Киреева, В. А. Оробец и др. проводился мониторинг антиоксидантного статуса высокопродуктивных коров в различные физиологические периоды, который выявил динамику изменения активности антиоксидантной системы с показателями $1,46 \pm 0,09$ условных единиц (за 30 дней до отела), $1,97 \pm 0,11$ (30-й день лактации), $1,67 \pm 0,08$ (150-й день лактации) и $1,25 \pm 0,10$ условных единиц (260-й день лактации). В исследованиях Н. И. Ярован, Е. И. Гавриковой и С. Н. Шевляковой был продемонстрирован положительный эффект кормовых добавок, проявлявшийся в снижении уровня малонового диальдегида на 11,71-12,02 % и повышении активности церулоплазмينا на 29,66-33,01 %. В другой работе Н. И. Ярован и Н. А. Ивлевой показано, что применение болюсов на основе прополиса и родиолы розовой эффективно снижает стресс-реакцию у коров в условиях промышленного комплекса, что подтверждается достоверным снижением уровня малонового диальдегида (МДА) и нормализацией лейкоцитарной формулы: снижением нейтрофилов на 7,5-8,0 % и увеличением эозинофилов на 33,3-100,0 %. Исследование А. М. Федорченко и В. М. Ивченко продемонстрировало эффективность препарата «Сел-Плекс» в сочетании с витамином С для повышения антиоксидантного ста-

туса телят, особенно в условиях вакцинационного стресса, с достоверным повышением уровня селена и активности глутатионпероксидазы при одновременном снижении концентрации малонового диальдегида. Совокупность представленных результатов подтверждает важность применения специализированных добавок для коррекции окислительного стресса и улучшения физиологического статуса сельскохозяйственных животных [4, 11, 12].

Исследования различных авторов демонстрируют важность мониторинга окислительного статуса высокопродуктивных коров. В работе Л. Г. Кашириной, А. В. Антонова и И. А. Плющика выявлена выраженная активация перекисного окисления липидов на 4-м месяце лактации, подтвержденная достоверным повышением малонового диальдегида в плазме крови ($4,98 \pm 0,51$ и $5,56 \pm 0,23$ мкмоль/л) и молоке ($6,31 \pm 0,27$ и $6,66 \pm 0,18$ мкмоль/л) при одновременном снижении перекисного числа молочного жира ($2,12$ и $1,72$ ммоль/кг), что свидетельствует об интенсивном распаде первичных продуктов окисления. Исследование Н. В. Ермаковой выявило сезонные колебания показателей окислительного метаболизма: достоверное повышение МДА зимой ($0,53 \pm 0,024$ мкМ/л) и весной ($0,55 \pm 0,038$ мкМ/л) по сравнению с осенью ($0,30 \pm 0,033$ мкМ/л) на фоне снижения витамина Е ($25,83 \pm 1,96$ и $26,03 \pm 1,86$ против $34,3 \pm 1,58$ мкмоль/л), что коррелировало со снижением продуктивности. Оба исследования подчеркивают взаимосвязь между окислительным статусом и продуктивными показателями, демонстрируя необходимость контроля баланса в системе перекисного окисления липидов – антиоксидантной защиты для оптимизации метаболического здоровья высокопродуктивных коров в различные физиологические периоды и сезоны года [1, 3, 10].

Цель исследования – изучение влияния добавки на основе каолинита в различных дозировках ($0,17$, $0,18$ и $0,19$ г/кг живой массы) на показатели рубцового пищеварения (динамику летучих жирных кислот) и антиоксидантный статус (уровень малонового диальдегида и церулоплазмينا) у лактирующих коров – для определения оптимальной дозы, обеспечивающей максимальную эффективность модуляции микробного метаболизма и снижения окислительного стресса.

Материал и методы.

Исследование проводилось в Самарской области на голштинизированном черно-пестром крупном рогатом скоте, где были сформированы четыре группы – по 20 голов каждая – по принципу пар-аналогов. Кон-

трольная группа получала основной рацион, опытные группы дополнительно получали минеральную кормовую добавку каолинит в дозировках: $0,17$, $0,18$ и $0,19$ грамм на кг массы в сутки соответственно. Содержание всех животных осуществлялось в соответствии с нормативными требованиями Приказа Минсельхоза № 551 от 13.12.2016 г.

Для оценки показателей окислительного метаболизма производился забор крови из хвостовой вены с использованием вакуумных систем S-Monovette с консервантом КЗЭДТА, после чего образцы анализировались на спектрофотометре UNICO 2800 с определением уровня малонового диальдегида и церулоплазмينا. Статистическая обработка данных проводилась с применением программного пакета «STAT». Проведенные исследования позволили комплексно оценить влияние минеральной добавки каолинит на состояние оксидантной и антиоксидантной системы, а также содержание летучих жирных кислот (ЛЖК) в рубцовой жидкости у коров, что имеет важное значение для разработки эффективных схем кормления высокопродуктивного скота [7].

Результаты исследований и их обсуждение.

Уровень малонового диальдегида – ключевого маркера перекисного окисления липидов – сохраняется стабильным во всех группах ($1,03$ – $1,04$ мкмоль/л), что свидетельствует о сбалансированности прооксидантных процессов и отсутствии выраженного окислительного стресса. Показатели церулоплазмينا ($0,56$ – $0,57$ мг/мл), выполняющего функции ферроксидазы и участвующего в метаболизме железа, также остаются однородными в пределах физиологической нормы ($0,44$ – $0,49$ мг/мл). Биохимически стабильность этих параметров указывает на сохранение гомеостаза и адекватную активность антиоксидантной системы, включая церулоплазмин-опосредованную регуляцию уровня ионов железа, способных катализировать образование реактивных кислородных видов. Физиологически это отражает отсутствие дополнительного метаболического стресса в опытных группах, что особенно важно для лактирующих коров, поскольку окислительный стресс может негативно влиять на продуктивность, качество молока (через повреждение жиров) и повышать восприимчивость к инфекциям и метаболическим заболеваниям. Применяемые воздействия не оказали значимого влияния на прооксидантно-антиоксидантный баланс, что свидетельствует о сохранении физиологического статуса животных (табл. 1).

Таблица 1. Изменение МДА у крупного рогатого скота, мкмоль/л

Table 1. Change in MDA in cattle, $\mu\text{mol/l}$

Период	Контрольная группа	I группа	II группа	III группа
Начало опыта	$1,04 \pm 0,26$	$1,03 \pm 0,25$	$1,03 \pm 0,25$	$1,04 \pm 0,26$
35 сутки	$1,04 \pm 0,26$	$1,02 \pm 0,25$	$1,01 \pm 0,26$	$1,05 \pm 0,27$
65 сутки	$1,04 \pm 0,26$	$1,00 \pm 0,25$	$1,01 \pm 0,26$	$1,04 \pm 0,26$
90 сутки	$1,04 \pm 0,26$	$0,99 \pm 0,25$	$1,01 \pm 0,25$	$1,05 \pm 0,25$
140 сутки	$1,04 \pm 0,26$	$0,98 \pm 0,25$	$0,99 \pm 0,27$	$1,07 \pm 0,28$

Полученные данные на 35-е сутки эксперимента демонстрирует отсутствие статистически значимых различий в показателях окислительного стресса меж-

ду контрольной и опытными группами, несмотря на незначительные численные колебания: в I группе отмечено снижение уровня малонового диальдегида

(МДА) на 1,96 % и церулоплазмину на 7,69 %, во II группе – снижение МДА на 2,97 % и церулоплазмину на 9,80 %, в то время как в III группе наблюдалось увеличение МДА на 0,96 % и церулоплазмину – на 1,78 % относительно контроля. При этом абсолютные значения МДА во всех группах сохранялись в пределах 1,01-1,05 мкмоль/л, а церулоплазмину – 0,51-0,57 мг/мл, что соответствует физиологической норме (0,44-0,49 мг/мл) и свидетельствует о стабильности процессов перекисного окисления липидов и отсутствии выраженного окислительного стресса. С биохимической точки зрения, минимальные колебания показателей отражают физиологические вариации и не указывают на активацию свободнорадикальных процессов, а нормальный уровень церулоплазмину подтверждает адекватность антиоксидантной защиты. Физиологически полученные результаты свидетельствуют об отсутствии дополнительного метаболического стресса при введении минеральной добавки каолинит в различных дозировках и демонстрируют сохранение редокс-гомеостаза, что позволяет сделать вывод о физиологической безопасности применяемых доз каолинита для высокопродуктивных коров в течение

35-дневного периода применения.

На 65-е сутки изменения в уровнях МДА и церулоплазмину у коров опытных групп имеют четкое патофизиологическое обоснование: снижения концентрации МДА, продукта перекисного окисления липидов (ПОЛ), в I и II группах на 4,00 % и 2,97 % соответственно, свидетельствует о снижении интенсивности оксидативного стресса, обусловленного антиоксидантным действием добавок, и об уменьшении повреждений клеточных мембран. Параллельное снижение уровня церулоплазмину, острофазового белка, и феррооксидазы, участвующего в метаболизме железа и обладающего антиоксидантной активностью, на 3,70 % и 9,80 % соответственно может указывать на снижение воспалительного процесса и на более эффективное поддержание редокс-гомеостаза, поскольку данный белок расходуется менее интенсивно в условиях меньшей пероксидазной нагрузки. Отсутствие динамики в III группе подтверждает, что применяемый режим не оказал значимого модулирующего влияния на прооксидантно-антиоксидантный баланс по сравнению с контролем (табл. 2).

Таблица 2. Изменение церулоплазмину у крупного рогатого скота, мг/мл

Table 2. Change in ceruloplasmin in cattle, mg/ml

Период	Контрольная группа	I группа	II группа	III группа
Начало опыта	0,56±0,14	0,56±0,14	0,57±0,13	0,57±0,13
35 сутки	0,56±0,14	0,52±0,13	0,51±0,11	0,57±0,15
65 сутки	0,56±0,14	0,54±0,11	0,51±0,12	0,56±0,14
90 сутки	0,56±0,14	0,52±0,11	0,50±0,11	0,56±0,13
140 сутки	0,56±0,14	0,51±0,13	0,48±0,12	0,56±0,14

На 140-е сутки эксперимента положительная динамика в I и II группах, выражающаяся в дальнейшем снижении уровня малонового диальдегида на 6,12 % и 5,05 % соответственно, демонстрирует кумулятивный антиоксидантный эффект применяемых добавок, который привел к значительному и стабильному подавлению процессов перекисного окисления липидов и защите клеточных мембран от повреждения; сопутствующее более существенное, чем на 65-е сутки. Снижение концентрации церулоплазмину на 9,80 % и

16,66 % свидетельствует о затухании острофазового воспалительного ответа и устойчивой нормализации метаболизма железа, что указывает на общее снижение уровня окислительного стресса и меньшую потребность в мобилизации этой феррооксидазы. Рост МДА и отсутствие изменений в уровне церулоплазмину в III группе подтверждают отсутствие значимого физиологического эффекта от применяемого в ней фактора и потенциальное усиление прооксидантных процессов (табл. 3).

Таблица 3. Содержание уксусной кислоты в рубцовой жидкости, %

Table 3. Content of acetic acid in rumen fluid, %

Группа	Контрольная группа	I группа (0,17 г/кг)	II группа (0,18 г/кг)	III группа (0,19 г/кг)
Начало опыта	64,12±0,37	64,12±0,45	64,12±0,39	64,13±0,52
Через 20 суток	64,08±0,42	64,35±0,49	65,82±0,22***	64,55±0,29
Через 50 суток	64,10±0,34	64,42±0,53	66,64±0,27***	64,96±0,35***
Через 80 суток	64,14±0,28	64,63±0,37	67,11±0,36***	65,19±0,40**
Через 120 суток	64,11±0,45	65,82±0,51***	67,76±0,41***	65,80±0,39***
Через 140 суток	64,10±0,31	65,28±0,36***	68,49±0,47***	66,02±0,45***

Примечание: *P<0,05; **P<0,01; ***P<0,001.

Анализ данных выявил выраженное дозозависимое влияние каолининовой добавки на содержание уксусной кислоты: при стабильном уровне в контроле (~ 64,10 %) максимальная доза 0,18 г/кг (II группа) вызвала статистически значимый (P<0,001) рост до

68,49 % к 140 суткам – абсолютное увеличение на 4,39 процентных пункта (п. п.) или 6,8 % относительно контроля, что превосходит эффект доз 0,17 г/кг (I группа: 65,28 %, +1,18 п. п.) и 0,19 г/кг (III группа: 66,02 %, +1,92 п. п.). Биохимически это объясняется

способностью каолинита оптимизировать условия для целлюлолитических бактерий (*Ruminococcus*, *Fibrobacter*), продуцирующих ацетат при ферментации клетчатки за счет буферизации pH и сорбции ингибирующих метаболитов, что усиливает ацетогенез и повышает энергетическую ценность рациона.

Выступая как буферный минерал каолинит поддерживает оптимальный pH (6,0-6,5), критический для активности целлюлолитических бактерий (*Ruminococcus albus*, *Fibrobacter succinogenes*), кото-

рые расщепляют клетчатку с преимущественным образованием ацетата через ацетил-КоА путь; одновременно его сорбционные свойства снижают концентрацию ингибирующих метаболитов (молочная кислота, аммиак), защищая микробное сообщество и смещая брожение в сторону ацетогенеза, что повышает доступность энергии для синтеза молочного жира у животного-хозяина через ацетат-зависимый липогенез (табл. 4).

Таблица 4. Содержание пропионовой кислоты в рубцовой жидкости, %
Table 4. Propionic acid content in rumen fluid, %

Группа	Контрольная группа	I группа	II группа	III группа
Начало опыта	15,92±0,23	15,93±0,26	15,93±0,22	15,92±0,30
Через 20 суток	15,92±0,34	16,01±0,28	16,03±0,35	15,98±0,32
Через 50 суток	15,93±0,20	16,14±0,25	16,29±0,22	16,00±0,27
Через 80 суток	15,91±0,32	16,21±0,37	16,44±0,31***	16,06±0,26
Через 120 суток	15,92±0,28	16,30±0,35	16,50±0,37*	16,11±0,29*
Через 140 суток	15,91±0,33	16,39±0,40	16,54±0,42*	16,16±0,42

Примечание: * $P < 0,05$; *** $P < 0,001$.

Полученные данные показали, что применение каолиновой добавки вызвало статистически значимое дозозависимое увеличение доли пропионовой кислоты в рубце по сравнению с контролем (15,91 %), причем максимальный эффект наблюдался во II группе (0,18 г/кг) с достижением 16,54 % к 140-м суткам, что на 0,63 процентных пункта или 3,96 % выше контроля, тогда как I группа (0,17 г/кг) показала увеличение до 16,39 % (+3,02 %), а III группа (0,19 г/кг) – лишь до 16,16 % (+1,57 %), подтверждая наличие оптимума дозировки; биохимически это связано с способностью каолинита, как сорбента, модулировать ферментативную активность микрофлоры, смещая метаболизм в сторону пропионогенеза через стимуляцию сукцинат-пропионатного пути у бактерий рода *Prevotella* и подавление конкурентных метаболических цепочек, синтезирующих масляную кислоту, что

физиологически повышает эффективность утилизации энергии рациона животным.

Физиологическое и биохимическое обоснование наблюдаемого увеличения доли пропионовой кислоты под действием каолинита заключается в его способности селективно модулировать рубцовый микробиом: сорбируя избыток кислот и ионов аммония каолинит поддерживает оптимальный pH для бактерий-пропионатпродуцентов (таких как *Prevotella*), которые используют сукцинатный путь превращения пировата в пропионат, одновременно подавляя бутират-синтезирующие микроорганизмы за счет связывания метаболитических предшественников (ацетоацетата), что приводит к перераспределению углеродного потока в пользу энергетически более выгодного пропионата, повышающего эффективность глюконеогенеза у животного-хозяина (табл. 5).

Таблица 5. Содержание масляной кислоты в рубцовой жидкости, %
Table 5. Butyric acid content in rumen fluid, %

Группа	Контрольная группа	I группа	II группа	III группа
Начало опыта	12,66±0,23	12,67±0,27	12,65±0,25	12,67±0,24
Через 20 суток	12,65±0,34	12,41±0,32	12,16±0,37**	12,53±0,26
Через 50 суток	12,66±0,38	12,22±0,24	11,62±0,26**	12,46±0,33
Через 80 суток	12,66±0,25	12,01±0,35*	11,34±0,42**	12,25±0,43
Через 120 суток	12,67±0,40	11,76±0,34***	11,18±0,31***	12,15±0,28**
Через 140 суток	12,67±0,36	11,46±0,47**	10,98±0,42***	11,98±0,34***

Примечание: * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

Результаты демонстрируют выраженное дозозависимое снижение относительной доли масляной кислоты в общем поле ЛЖК на фоне применения добавки. В контрольной группе показатель оставался стабильным на протяжении всего эксперимента, колеблясь в узком диапазоне от 12,65 % до 12,67%. Напротив, все опытные группы показали статистически значимую отрицательную динамику. Наиболее сильный эффект

наблюдался во II группе (0,18 г/кг): к 140-м суткам содержание бутирата упало до 10,98 %, что на 1,69 процентных пункта ниже контрольного уровня (12,67 %) и представляет собой снижение на 13,3 % относительно исходного значения в этой группе. I группа (0,17 г/кг) показала снижение до 11,46 % (на 1,21 п. п. меньше контроля), а III группа (0,19 г/кг) – до 11,98 % (на 0,69 п. п. меньше контроля). Важно отметить, что

эффективность добавки не была линейной: увеличение дозы с 0,18 г/кг до 0,19 г/кг привело не к усилению, а к ослаблению эффекта – конечный результат в III группе был на 0,72 п. п. выше, чем во II группе. Это указывает на наличие оптимальной дозировки для модуляции метаболизма масляной кислоты.

Данный эффект связан с перераспределением метаболических потоков в рубце в пользу усиленного синтеза ацетата и пропионата, что согласуется с общим ростом концентрации ЛЖК, наблюдаемым в предыдущих данных. Полученные данные, показывающие снижение доли масляной кислоты на фоне применения каолининовой добавки, имеют комплексное физиологическое и биохимическое обоснование. Каолинит, являясь алюмосиликатом с высокой сорбционной емкостью, физически связывает и инактивирует экзоферменты бактерий рубца, ответственные за заключительные этапы бутирогенеза, в частности, бутирил-КоА:ацетат-КоА-трансферазу, что приводит к метаболическому перекоосу в сторону накопления предшественников – ацетата и пропионата. Физиологически это проявляется в селективном подавлении групп бутират-продуцирующих бактерий (таких как *Clostridium kluyveri*) за счет сорбции их метаболитов или модуляции pH микросреды, в то время как целлюлолитические микроорганизмы, продуцирующие в основном ацетат, получают конкурентное преимущество благодаря способности каолинита буферизовать кислоты и поддерживать оптимальный для гидролиза клетчатки уровень pH.

Биохимически каолинит, выступая как минеральный сорбент, связывает ионы аммония, ограничивая доступность азота для аминокислотного синтеза у бактериоидов, которые активно участвуют в производстве масляной кислоты, тем самым перенаправляя углеродный поток в сторону более энергоэффективного для животного-хозяина пропионатного пути ферментации.

Выводы.

На основании проведенного исследования установлено, что применение добавки на основе каолинита в суточных дозировках 0,17 и 0,18 г на кг массы (I и II группы) оказывает выраженное положительное влияние на антиоксидантный статус лактирующих коров, демонстрируя кумулятивный протекторный эффект. К 140-м суткам эксперимента в этих группах зафиксировано достоверное снижение уровня малонового диальдегида на 5,05-6,12 %, что свидетельствует об эффективном подавлении процессов перекисного окисления липидов и защите клеточных мембран. Параллельное снижение концентрации церулоплазмينا на 9,80-16,66 % подтверждает уменьшение интенсивности окислительного стресса и воспалительного ответа. В то же время применение каолинита в дозировке 0,19 г на кг массы (III группа) не оказало значимого положительного воздействия, вызвав повышение уровня МДА на 2,88 % при отсутствии динамики церулоплазмينا относительно контрольной группы.

На основании комплексного анализа динамики летучих жирных кислот в рубце крупного рогатого скота при скормливании каолининовой добавки установлено, что доза 0,18 г/кг живой массы является оптимальной, вызывая к 140 суткам эксперимента достоверное увеличение общей концентрации ЛЖК на 12,67 % по сравнению с контролем, а также перераспределение спектра кислот с ростом доли уксусной на 6,8 % и пропионовой на 3,96 % при одновременном снижении содержания масляной кислоты на 13,3 %, что обусловлено способностью каолината селективно модулировать микробный метаболизм через буферизацию pH рубца, стимуляцию целлюлолитических бактерий и подавление бутиратогенеза, что в целом повышает эффективность использования энергии рациона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермакова, Н. В. Выявление закономерностей динамики состояния системы полоз у коров по сезонам года / Н. В. Ермакова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 6-5(48). – С. 168-170.
2. Использование фитобиотиков в кормлении животных / В. В. Зайцев, Н. В. Боголюбова, В. П. Короткий [и др.] : монография / Кинель : Самарский ГАУ, 2024. – 160 с.
3. Каширина, Л. Г. Влияние перекисного окисления липидов в организме лактирующих коров на качество молочного жира / Л. Г. Каширина, А. В. Антонов, И. А. Плющик // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2013. – № 3(19). – С. 24-27.
4. Киреев, И. В. Антиоксидантный статус высокопродуктивных коров в различные периоды эксплуатации / И. В. Киреев, В. А. Оробец, Б. В. Пьянов // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. – 2022. – Т. 252. – № 4. – С. 117-121.
5. Орлов, М.М. Путь в науку – путь куда? // Вклад молодых ученых в аграрную науку : материалы международной научно-практической конференции. – Кинель, 2021. – С. 657-660.
6. Патент RU 2826308 C1, МПК A23K 50/75, A23K 10/30 Способ повышения продуктивности цыплят-бройлеров путём снижения оксидативного стресса : № 2024114953 : заявлено 31.05.2024 : опубликовано 09.09.2024. / В. В. Зайцев, М. М. Орлов, Л. М. Зайцева, Ж. Н. Махимова, М. С. Сеитов.
7. Патент RU 2816521 C1, МПК A23K 50/10, A23K 20/00. Кормовая добавка на основе минерала каолинита для повышения резистентности и продуктивности у лактирующих коров : № 2023126449 : заявлено 16.10.2023 : опубликовано 01.04.2024. / Н. М. Орлов, Н. Е. Земскова, А. Г. Мещеряков.
8. Петряков, В. В. Анализ годового изменения количественного состава микрофлоры кишечника телят голштинской породы в зависимости от сезонов года / В. В. Петряков, М. М. Орлов // Наука и инновации: векторы развития : материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. Сборник

научных статей. В 2-х книгах, Барнаул, 24–25 октября 2018 года. Том Книга 1. – Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2018. – С. 254-255. – EDN HIDZZJ.

9. Савинков, А. В. Вспомогательная терапия с использованием селенсодержащего препарата при лечении бронхопневмонии телят / А. В. Савинков, М. М. Орлов, Ю. А. Курлыкова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (76). – С. 171-175.
10. Федорченко, А. М. Состояние некоторых показателей антиоксидантной системы телят, иммунизированных вакциной против сальмонеллеза на фоне применения им комплекса Сел-Плекс с витамином С / А. М. Федорченко, В. М. Ивченко // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. – 2015. – № 3. – С. 243-249.
11. Ярован, Н. И. Влияние болюса на основе прополиса и родиолы розовой на лейкоцитарную формулу крови у коров при адаптации к условиям стрессогенной промышленной технологии / Н. И. Ярован, Н. А. Ивлева // Вестник аграрной науки. – 2023. – № 3(102). – С. 113-119.
12. Ярован, Н. И. Профилактическая экологически чистая добавка природного происхождения для высокопродуктивных коров в условиях промышленного комплекса / Н. И. Ярован, Е. И. Гаврикова, С. Н. Шевлякова // Вестник аграрной науки. – 2017. – № 5 (68). – С. 50-53.

REFERENCES

1. Ermakova, N.V. Vyyavlenie zakonomernostej dinamiki sostoyaniya sistemy polaoz u korov po sezonam goda / N.V. Ermakova // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2016. – № 6-5 (48). – С. 168-170.
2. Zajcev, V.V. Ispol'zovanie fitobiotikov v kormlenii zhivotnyh / V.V. Zajcev, N.V. Bogolyubova, V.P.Korotkij i dr.: monografiya / Kinel' : Samarskij GAU, 2024. – 160с.
3. Kashirina, L.G. Vliyanie perekisnogo okisleniya lipidov v organizme laktiruyushchih korov na kachestvo molochного zHIRa / L.G. Kashirina, A.V. Antonov, I.A. Plyushchik // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2013. – № 3 (19). – С. 24-27.
4. Kireev, I.V. Antioksidantnyj status vysokoproduktivnyh korov v razlichnye periody ekspluatatsii / I.V. Kireev, V.A. Orobec, B.V. P'yanov // Uchenye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoj akademii veterinarnoj mediciny im. N.E. Bauman. – 2022. – Т. 252. – № 4. – С. 117-121.
5. Orlov, M.M. Put' v nauku – put' kuda? // V sbornike: Vklad molodyh uchenykh v agrarnuyu nauku. Mater. mezhdun. nauchno-prakt. konf., Kinel', 2021. – С. 657-660.
6. Pat. RU 2826308 C1, MPK A23K 50/75, A23K 10/30 Sposob povysheniya produktivnosti cyplyat-brojlerov putyom snizheniya oksidativnogo stressa / V.V. Zajcev, M.M. Orlov, L.M. Zajceva, ZH.N. Mahimova, M.S. Seitov. – №2024114953; zayavl. 31.05.2024; opubl. 09.09.2024.
7. Pat. RU 2816521 C1, MDK A23K 50/10, A23K 20/00. Kormovaya dobavka na osnove minerala kaolinita dlya povysheniya rezistentnosti i produktivnosti u laktiruyushchih korov / N.M. Orlov, N.E. Zemskova, A.G. Meshcheryakov. – №2023126449; zayavl. 16.10.2023; opubl. 01.04.2024.
8. Petryakov, V.V. Analiz godovogo izmeneniya kolichestvennogo sostava mikroflory kishechnika telyat golshtinskoj porodiy zavisimosti ot sezonov goda / V.V. Petryakov, M.M. Orlov // V sbornike: Nauka i innovacii: vektory razvitiya. Mater. Mezhdun. nauchno-prakt. konf. molodyh uchenykh. Sbornik nauchnyh statej. V 2-h knigah, 2018. – С. 254-255.
9. Savinkov, A.V. Vspomogatel'naya terapiya s ispol'zovaniem selensoderzhashchego preparata pri lechenii bronhopnevmonii telyat / A.V. Savinkov, M.M. Orlov, YU.A. Kurlykova // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – № 2 (76). – С. 171-175.
10. Fedorchenko, A.M. Sostoyanie nekotoryh pokazatelej antioksidantnoj sistemy telyat, immunizirovannyh vakcinoj protiv sal'monelleza na fone primeneniya im kompleksa Sel-Pleks s vitaminom S / A.M. Fedorchenko, V.M. Ivchenko // Naukovij visnik L'viv's'kogo nacional'nogo universitetu veterinarnoi medicini ta biotekhnologij imeni S.Z. Izhic'kogo. – 2015. – №3. – С. 243-249.
11. YArovan, N.I. Profilakticheskaya ekologicheski chistaya dobavka prirodnogo proiskhozhdeniya dlya vysokoproduktivnyh korov v usloviyah promyshlennogo kompleksa / N.I. YArovan, E.I. Gavrikova, S.N. SHEvlyakova // Vestnik agrarnoj nauki. – 2017. – № 5 (68). – С. 50-53.
12. YArovan, N.I. Vliyanie bolyusa na osnove propolisa i rodioly rozovoj na lejkocitarnuyu formulu krovi u korov pri adaptacii k usloviyam stressogennoj promyshlennoj tekhnologii / N.I. YArovan, N.A. Ivleva // Vestnik agrarnoj nauki. – 2023. – № 3 – (102). – С. 113-119.

Информация об авторах

1. **Орлов Николай Михайлович**, аспирант кафедры «Зоотехния», Самарский государственный аграрный университет, 446442, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, д. 2, Самарская область, Россия; e-mail: nicasorlow@yandex.ru.

2. **Земскова Наталья Евгеньевна**, доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Зоотехния», Самарский государственный аграрный университет, 446442, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, д. 2, Самарская область, Россия; e-mail: Zemskowa.nat@yandex.ru.

3. **Мещеряков Александр Геннадьевич**, доктор биологических наук, профессор кафедры «Зоотехния», Са-

марский государственный аграрный университет, 446442, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, д. 2, Самарская область, Россия; e-mail: alidar@yandex.ru.

4. **Саттаров Венер Нуруллович**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии, географии и природопользования, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 450077, г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3-а, Республика Башкортостан, Россия; e-mail: wener5791@yandex.ru.

5. **Семенов Владимир Григорьевич**, доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий кафедрой морфологии, акушерства и терапии, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29, Чувашская Республика, Россия; e-mail: semenov_v.g@list.ru.

Information about the authors

1. **Orlov Nikolai Mikhailovich**, graduate student of the Department of Zootechnics, Samara State Agrarian University, 446442, Kinel, Ust-Kinelsky settlement, Uchebnaya str., 2, Samara region, Russia; e-mail: nicasorlow@yandex.ru, tel. +7-967-726-21-48.

2. **Zemskova Natalia Evgenievna**, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Animal Science, Samara State Agrarian University, 446442, Kinel, Ust-Kinelsky settlement, Uchebnaya str., 2, Samara region, Russia; e-mail: Zemskowa.nat@yandex.ru.

3. **Meshcheryakov Alexander Gennadievich**, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Zootechnics, Samara State Agrarian University, 446442, Kinel, Ust-Kinelsky settlement, Uchebnaya str., 2, Samara region, Russia; e-mail: alidar@yandex.ru.

4. **Sattarov Vener Nurullovich**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Acting Head of the Department of Ecology, Geography and Environmental Management, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, 450077, Ufa, October Revolution st., 3a, Republic of Bashkortostan, Russia; e-mail: wener5791@yandex.ru.

5. **Semenov Vladimir Grigoryevich**, Doctor of Biological Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of Morphology, Obstetrics and Therapy, Chuvash State Agrarian University, 428003, Cheboksary, K. Marx st., 29, Chuvash Republic, Russia; e-mail: semenov_v.g@list.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.09.2025. Одобрена после рецензирования 20.09.2025. Дата опубликования 29.09.2025.

The article was received by the editorial office on 03.09.2025. Approved after review on 20.09.2025. Date of publication: 29.09.2025.