

АДАПТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ВВЕДЕНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА В ЖИРОВЫЕ РАЦИОНЫ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА*

Е.В. ШЕЙДА^{1, 2} ✉, С.В. ЛЕБЕДЕВ², С.А. МИРОШНИКОВ^{1, 2},
В.В. ГРЕЧКИНА^{2, 3}, О.В. ШОШИНА²

Жиры как кормовое средство служат концентрированными источниками энергии. Включение жировых компонентов в рационы сельскохозяйственных животных экономически целесообразно и эффективно. Однако некоторые исследования указывают на снижение переваримости питательных веществ рационов в присутствии жиров. Для повышения доступности питательных веществ рационов необходимо включение в комбикорма дополнительных компонентов, в частности ультрадисперсных частиц. В настоящей работе мы впервые установили влияние ультрадисперсного препарата железа на панкреатическую секрецию при дополнительном включении в рацион телят подсолнечного и соевого масел. Отмечено повышение ферментативной активности поджелудочного сока, а также переваримости питательных компонентов корма. Цель исследования — оценить возможность использования ультрадисперсных частиц железа в качестве модуляторов активности обменных процессов при введении растительных жиров (подсолнечное и соевое масла) в рацион телят. Опыты *in vivo* проводили с октября 2019 года по октябрь 2020 года в ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН на телятах (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы (по 4 гол. в группе, возраст 8 мес, средняя живая масса 120-130 кг). Применяли метод латинского квадрата 4×4, повторность эксперимента 5-кратная. Телята контрольной группы получали стандартный рацион (СР). В СР животных I группы дополнительно вводили ультрадисперсные частицы (УДЧ) Fe, II группы — подсолнечное масло, III группы — подсолнечное масло + УДЧ Fe, IV группы — соевое масло, V группы — соевое масло + УДЧ Fe. Масла вводили в расчете 3 % от сухого вещества рациона посредством замены на них концентратной части рациона. УДЧ (d = 90 нм, Z-потенциал 7,7±0,5 мВ) содержали 99,8 % Fe. Перед включением в рацион их диспергировали в физиологическом растворе, после чего замешивали с концентрированной смесью рациона в дозе 2,2 мг/гол. Для изучения внешнесекреторной функции поджелудочной железы проводили операцию по наложению дуоденального анастомоза. Панкреатический сок и химус собирали в течение 8 ч с интервалом 60 мин. Определяли активность амилазы, протеаз, липазы. Учитывали содержание NO-метаболитов в плазме крови, а также активность трипсина. Переваримость корма оценивали в течении 7 сут в балансовых опытах по количеству потребленного животными корма, несъеденных остатков и выделенного кала. Коэффициент переваримости (КП) рассчитывали, как отношение количества переваренных питательных веществ к поступившим в организм. В кале и кормах анализировали содержание питательных веществ: сухого вещества, сырого протеина, жира и золы. Кровь для оценки морфологических и биохимических показателей брали утром натощак на 7-е сут эксперимента. Включение в жировые рационы телят УДЧ Fe способствовало достоверному (p ≤ 0,05) увеличению переваримости сырого жира, органического вещества и безазотистых экстрактивных веществ, тогда как переваримость сырой клетчатки и сырого протеина снижалась. Дополнительное обогащение рационов УДЧ Fe и жировыми компонентами оказывало стимулирующее влияние на панкреатическую секрецию, приводя к увеличению количества продуцируемого сока. Под влиянием УДЧ Fe избирательно изменялась активность пищеварительных ферментов поджелудочной железы. При включении в контрольный рацион УДЧ Fe наблюдалось повышение активности липазы на 35,7 %, кишечных протеаз — на 43,1 % на фоне уменьшения амилотической активности на 28,8 %. Введение УДЧ Fe в рационы, включающие подсолнечное и соевое масла, снижало ферментативную активность поджелудочной железы относительно контроля: в III группе усилилась активность липазы и кишечных протеаз соответственно на 12,1 и 16,7 % (p ≤ 0,05), в V группе — на 133,2 и 38,4 % (p ≤ 0,05). Дополнительное введение в рацион телят жировых компонентов самостоятельно и в комплексе с УДЧ привело к повышению содержания NO-метаболитов во всех опытных группах относительно контрольного показателя. При замене контрольного рациона на жировые отмечали повышение содержания трипсина во II группе на 106,6 % (p ≤ 0,05), в IV группе — на 130,9 % (p ≤ 0,05), введение УДЧ Fe способствовало снижению этого показателя. При морфологическом анализе было зафиксировано статистически значимое (p ≤ 0,05) повышение содержания гемоглобина в крови телят из опытных групп: в I группе — на 9,7 %, во II — на 31,2 %, в III — на 41,9 %, в IV — на 28,0 %, в V — на 30,1 %. Биохимический анализ крови показал, что все изучаемые параметры находились в пределах допустимых физиологических норм, однако следует отметить, что УДЧ Fe оказывали стимулирующее воздействие на белковый, жировой и угле-

* Исследования выполнены при поддержке РНФ (проект № 20-16-00088).

водный обмена в организме. Отмечено достоверное повышение коэффициента де Ритиса в группах, получавших УДЧ Fe на фоне жировых рационов: в III группе он составил 3,98, в V группе — 4,1 ($p \leq 0,05$). Билирубиновый индекс относительно контроля повышался на 17,8 % ($p \leq 0,05$) в I группе и на 5,5 % ($p \leq 0,05$) — в IV группе, во всех других группах значения БИ были ниже, чем в контроле.

Ключевые слова: ультрадисперсные частицы, железо, морфология крови, биохимия крови, поджелудочная железа, ферменты, панкреатический сок, химус, крупный рогатый скот, жиры, подсолнечное масло, соевое масло.

В настоящее время при производстве высококачественной говядины жир превратился из простой добавки в ценный высокоэнергетический заменитель злаков, источник энергии и модификатор клеточного метаболизма (1). Жиры как кормовое средство служат концентрированными источниками энергии, содержат и транспортируют жирорастворимые витамины, обеспечивают организм незаменимыми жирными кислотами, а также придают корму определенные ароматические, вкусовые качества и структуру. Добавление жировых компонентов в состав полнокомпонентных рационов для сельскохозяйственных животных экономически целесообразно и эффективно (2, 3).

Включение растительных масел (кокосовое, пальмовое, соевое, подсолнечное, льняное и масло канолы) в рационы жвачных снижало продукцию кишечного метана *in vitro* на 40,55-48,58 %. При этом оно не влияло на pH рубца, количество микробного белка, усвояемость сухого и органического вещества (4). Добавление в рацион крупного рогатого скота (КРС) подсолнечного масла привело к снижению численности простейших, уменьшению метаногенеза и концентрации аммиачного азота, улучшению производства микробной биомассы и пропионовой кислоты в рубце (5). Однако некоторые исследователи указывают на снижение переваримости питательных веществ в присутствии жиров (6, 7). Отмечено снижение перевариваемости нейтрально-детергентных волокон в рубце из-за добавления жира, при этом эффективность синтеза микробного белка увеличивалась, а обилие простейших имело тенденцию к уменьшению (8). Жировые добавки приводили к статистически значимому ($p \leq 0,01$) снижению переваримости органического вещества и нейтрально-детергентной клетчатки в кишечнике молодняка КРС на откорме (9).

Для повышения эффективности кормовых средств рассматриваются и изучаются такие компоненты рационов, как добавки минеральных веществ, в частности нанопорошки металлов (10-12). В настоящее время достаточно активно изучается влияние ультрадисперсных частиц металлов как самостоятельных добавок, а также в комплексе с другими компонентами корма на обменные процессы в желудочно-кишечном тракте, ферментативную активность пищеварительных желез и состав микробиома. Показано эффективное использование таких добавок для уменьшения побочных эффектов, улучшения биодоступности питательных веществ и увеличения продуктивных качеств (13-15).

В представленной работе мы впервые установили влияние ультрадисперсного препарата железа на панкреатическую секрецию при дополнительном включении в рацион телят подсолнечного и соевого масел. Отмечено повышение ферментативной активности поджелудочного сока, а также переваримости питательных компонентов корма.

Цель исследования — оценить возможность использования ультрадисперсных частиц железа в качестве модуляторов активности обменных процессов при введении растительных жиров (подсолнечное и соевое масла) в рацион телят.

Методика. Опыты *in vivo* проводили с октября 2019 года по октябрь 2020 года в ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН на телятах (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы. Формировали группы по четыре животных (возраст 8 мес, средняя живая массой 120-130 кг). Эксперимент выполняли по схеме латинского квадрата 4×4 в пяти повторностях.

Обслуживание животных и исследования проводили в соответствии с инструкциями и рекомендациями Russian Regulations, 1987 (Order No. 755 on 12.08.1977 the USSR Ministry of Health) и The Guide for Care and Use of Laboratory Animals (National Academy Press Washington, D.C. 1996). Были предприняты все меры, чтобы свести к минимуму страдания животных и сократить число отбираемых образцов. Животные содержались в отдельных метаболических клетках (1,0×2,2 м) в помещении с оптимальной температурой и влажностью (в течение эксперимента температура окружающей среды поддерживалась между 23 и 25 °С), доступ к воде был свободным.

Телята контрольной группы получали стандартный рацион (СР), включавший сено разнотравное (2 кг), смесь концентратов (1,5 кг), силос кукурузный (5 кг), солому пшеничную (1 кг), патоку кормовую (0,1 кг), соль поваренную (0,04 кг), витаминно-минеральный премикс. В стандартный рацион животных I группы дополнительно вводили ультрадисперсные частицы (УДЧ) Fe, II группы — подсолнечное масло, III группы — подсолнечное масло + УДЧ Fe, IV группы — соевое масло, V группы — соевое масло + УДЧ Fe. Масла вводили в расчете 3 % от сухого вещества рациона посредством замены концентратной части рациона. Животных кормили два раза в сутки (утром и вечером) в равных долях. Рационы были сформированы по потребности в питательных веществах и энергии, но различались по жирнокислотному составу вводимых растительных жиров (16, 17).

Ультрадисперсные частицы железа были получены методом электрического взрыва проводника в атмосфере аргона («Передовые порошковые технологии», Россия). УДЧ ($d = 90$ нм, Z -потенциал $7,7 \pm 0,5$ мВ) содержали 99,8 % Fe. Перед включением в рацион их диспергировали в физиологическом растворе с помощью УЗДН-2Т («НПП Академприбор», Россия) (35 кГц, 300 Вт, 10 мкА, 30 мин). Животные получали УДЧ Fe после замешивания с концентрированной смесью рациона в дозе 2,2 мг/гол.

Для изучения внешнесекреторной функции поджелудочной железы выполняли операцию по наложению дуоденального анастомоза (18).

Исследования проводили после 16-часовой выдержки натощак. Панкреатический сок и химус собирали в течение 8 ч с интервалом 60 мин. После взятия первой пробы животных кормили и продолжали собирать сок и химус, количество сока и ферментативную активность сока и химуса определяли *in situ*.

Активность амилазы измеряли по Smith-Roe в модификации для высоких значений показателя (19), протеаз — по гидролизу казеина, очищенного по Гаммерстену, при калориметрическом контроле ($\lambda = 450$ нм) (20), активность липазы, концентрацию общего белка, фосфора, кальция и α -амилазы — на автоматическом биохимическом анализаторе CS-T240 («DIRUI Industrial Co., Ltd», Китай) с использованием коммерческих биохимических наборов для ветеринарии (ЗАО «ДИАКОН-ДС», Россия) (21).

Содержание NO-метаболитов в плазме крови определяли спектрофотометрическим методом с реактивом Грисса, используя микропланшетный анализатор Infinite PRO F200 («Tecan Austria GmbH», Австрия) (при $\lambda = 540$ нм) (22).

Активность трипсина в плазме крови определяли на автоматическом биохимическом анализаторе CS-T240 («DIRUI Industrial Co., Ltd», Китай),

в качестве субстрата использовали гидрохлорид натрий-бензоил-DL-аргинин-4(р)-нитроанилида (БАПНА).

Переваримость корма оценивали в течение 7 сут в балансовых опытах, учитывали количество потребленного животными корма, несъеденные остатки, количество выделенного кала. Коэффициент переваримости (КП) рассчитывали, как отношение переваренных питательных веществ к принятым. В кале и кормах после замораживания, высушивания и гомогенизации анализировали содержание сухого вещества, органического вещества, сырого протеина, сырого жира, безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) и золы в соответствии с рекомендациями Association of Official Agricultural Chemists (23). Переваримость оценивали по S. Hashemi с соавт. (24).

Кровь для оценки морфологических и биохимических показателей брали утром натощак на 7-е сут эксперимента из яремной вены в вакуумные пробирки с активатором свертывания (тромбин). Исследования проводили на автоматическом анализаторе CS-T240 («DIRUI Industrial Co., Ltd», Китай) с использованием коммерческих наборов для ветеринарии («ДиаВет-Тест», Россия).

Статистический анализ выполняли с использованием методик ANOVA в программном пакете Statistica 10.0 («StatSoft, Inc.», США) и программе Microsoft Excel. Представлены средние значения (M) и стандартные ошибки средних ($\pm SEM$). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t -критерию Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты. Состав и показатели качества рационов, которые скармливали подопытным телятам, представлены в таблице 1. Разница по содержанию сырого жира, сырого протеина и обменной энергии была достаточно значимой — соответственно 45,5; 8,3 и 12,9 %.

1. Состав и показатели качества рационов телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы в эксперименте (ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019-2020 годы)

Показатель	Рацион		
	стандартный	с подсолнечным маслом	с соевым маслом
Состав рациона			
Сено разнотравное, кг	7,0	7,0	7,0
Концентраты, кг	2,0	2,0	2,0
Масло подсолнечное, кг		0,3	
Масло соевое, кг			0,3
Патока кормовая, кг	0,6	0,6	0,6
Премикс ПК-60, кг	0,06	0,06	0,06
Соль, кг	0,02	0,02	0,2
УДЧ Fe, мг		2,2	2,2
Питательность рациона			
Сухое вещество, кг	8,42	8,42	8,42
Сырая клетчатка, кг	2,56	2,56	2,56
Сырой жир, кг	0,244	0,355	0,355
Сырой протеин, кг	0,72	0,66	0,66
БЭВ, кг	5,4	5,0	5,0
Кальций, г	42,2	42,6	43,2
Фосфор, г	30,0	29,8	30,4
ОЭ, МДж	63,0	71,1	71,1

Примечание. БЭВ — безазотистые экстрактивные вещества, ОЭ — обменная энергия. Состав витаминно-минерального премикса (на 1 кг концентрата): Mn — 48 мг, Zn — 36 мг, Fe — 60 мг, Cu — 10 мг, Se — 0,24 мг, Co — 0,12 мг; витамин А — 2640 МЕ, витамин Д — 302 МЕ; витамин Е — 17 мг.

Основная задача при производстве высококачественной говядины — обеспечение животных необходимыми питательными веществами для удовлетворения метаболических потребностей и повышения продуктивности. Однако зерновые культуры, традиционные для рационов КРС, отрицательно влияют на содержание сухого вещества и подавляют переваривание клетчатки (25, 26). Использование жиров в рационах имеет важное значение

в кормлении сельскохозяйственных животных. Недостаток жиров приводит к задержке роста, нарушению воспроизводительной функции, снижению продуктивности и ухудшению качества продукции. При этом наличие в рационах большого количества жиров создает нагрузку на систему пищеварения в целом, особенно у КРС. При насыщении рационов жирами изменяется активность пищеварительных ферментов, в результате чего сложные компоненты пищи недостаточно хорошо расщепляются и, как следствие, плохо усваиваются (27). Пищевой жир, который не поддается биолизу и биогидрированию с участием микроорганизмов рубца, но переваривается в нижних отделах пищеварительного тракта, известен как обходной жир, или жир, защищенный рубцом (инертный жир) (28). Введение жиров в рацион КРС, выпасаемого на пастбищах, увеличивает производство мясной и молочной продукции. Однако повышение количества жиров и жирных кислот тормозит процесс переваривания клетчатки в рубце и снижает переваривание органических веществ в передней части желудка (29).

В нашей работе при введении в рационы подсолнечного и соевого масла переваримость сырого жира снижалась соответственно на 38,2 и 10,9 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля (табл. 2). Включение в контрольный рацион телят УДЧ Fe способствовало повышению переваримости органического вещества на 9,6 % ($p \leq 0,05$), сырого жира на 2,2 % ($p \leq 0,05$), безазотистых экстрактивных веществ — на 9 % ($p \leq 0,05$). Z. Khan с соавт. (30) установили, что при кормлении телят рационом с высоким содержанием железа снижались среднесуточный прирост живой массы, потребление сухого вещества и переваримость питательных веществ корма.

2. Коэффициенты переваримости питательных веществ (%) у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при скармливании рационов с растительными жирами и ультрадисперсными частицами железа ($n = 4$, $M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019–2020 годы)

Показатель	Группа					
	контроль	I	II	III	IV	V
Сухое вещество	74,3±0,04	70,8±0,03*	76,1±0,01*	72,1±0,02*	60,9±1,05	68,4±0,03*
Органическое вещество	87,8±0,30	96,2±0,40*	83,83±0,21*	98,7±0,42	59,4±0,03*	95,8±0,05*
Сырой протеин	76,3±3,60	71,0±4,10	81,4±2,30*	74,5±2,82	72,8±1,02	70,4±2,4
Сырой жир	72,7±1,23	74,3±1,40*	44,9±1,88*	62,7±1,54*	64,8±0,75*	76,4±1,23*
Сырая клетчатка	37,4±0,18	36,6±0,20	45,5±0,08*	37,5±0,12	43,7±0,45*	36,2±1,12
БЭВ	80,3±0,90	88,2±0,70*	82,3±1,10	91,8±0,93*	75,6±0,38*	84,3±0,24*

Примечание. БЭВ — безазотистые экстрактивные вещества. Описание групп см. в разделе «Методика».

* Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

Присутствие в рационах УДЧ Fe способствовало статистически значимому увеличению переваримости сырого жира: в III группе относительно II — на 39,6 % ($p \leq 0,05$), в V группе относительно IV — на 17,9 % ($p \leq 0,05$). Похожая тенденция наблюдалась и в отношении переваримости органического вещества и БЭВ. Также следует отметить, что включение УДЧ Fe снижало переваримость сырой клетчатки и сырого протеина в I, III и V группах.

Дополнительное обогащение рационов минеральными компонентами и изменение количественного и качественного состава корма существенно влияют на панкреатическую секрецию и активность пищеварительных ферментов (31–34). Структура и состав рациона, а также объем и кратность кормления оказывают регулирующее воздействие на пищеварительные функции, что обеспечивается рефлекторно и гуморально.

В первый час до кормления животных панкреатическая секреция во всех группах была значительно ниже, чем после кормления. Секреция увеличивалась в рефлекторную и желудочную фазы, а затем снижалась в кишечную фазу, в период 360–480 мин после начала измерений.

При замене контрольного комбикорма на опытные образцы с УДЧ Fe увеличивалось количество продуцируемого поджелудочного сока, что свидетельствует о повышении нагрузки на поджелудочную железу при таких рационах (табл. 3). Так, при использовании контрольного рациона с УДЧ Fe количество панкреатического сока за все время опыта увеличивалось на 40,1 % ($p \leq 0,05$). При добавлении к рациону подсолнечного масла продукция панкреатического сока уменьшалась на 19,8 % ($p \leq 0,05$), соевого масла — на 8,8 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля. Включение в жировые рационы УДЧ Fe стимулировало секрецию сока поджелудочной железы в III группе на 149,0 % относительно показателя во II, а в V группе — на 127,6 % относительно IV ($p \leq 0,05$).

3. Количество панкреатического сока (мл), выделявшегося у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при скармливании рационов с растительными жирами и ультрадисперсными частицами железа ($n = 4, M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019-2020 годы)

Продолжительность эксперимента, мин	Группа					
	контроль	I	II	III	IV	V
0-60	32,0±2,81	48,0±3,24	28,0±1,72	109,0±19,02	18,0±2,43	88,0±12,23
60-120	66,0±3,42	76,0±3,61*	48,0±3,51	138,0±6,52	78,0±6,72*	141,0±5,64*
120-180	67,0±5,32	80,0±5,12	58,0±4,62*	228,0±4,11*	72,0±7,12	218,5±14,64
180-240	59,0±4,71	84,0±6,04	50,0±5,03	156,5±1,93*	62,0±5,83	184,5±3,83
240-300	55,5±5,20	88,0±4,22	48,0±3,72	142,5±9,92	5,0±4,31	168,5±11,31*
300-360	59,5±4,11	91,0±2,81	47,0±3,30*	77,0±5,02	48,0±5,31	81,5±18,04
360-420	67,0±6,31	90,0±4,52	38,0±5,43	23,0±6,23	46,0±3,82	39,0±6,40
420-480	51,5±4,70	84,0±3,02*	50,0±5,22	40,0±2,90	42,0±3,22	28,0±3,91
0-480	457,5±37,83	641,0±32,40*	367,0±55,42*	914,0±55,53*	417,0±45,22*	949,0±75,81*

Примечание. В первый час эксперимента показатели фиксировали натощак. Описание групп см. в разделе «Методика».

* Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

4. Активность ферментов панкреатического сока у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при введении в рационы растительных жиров и ультрадисперсных частиц железа ($n = 4, M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019-2020 годы)

Показатель	Группа					
	контроль	I	II	III	IV	V
Липаза, Ед/л	90,9±18,2	123,4±19,4*	773,0±14,8*	101,9±12,7*	667,0±37,0*	212,0±11,3*
Амилаза, мг · мл ⁻¹ · мин ⁻¹	5137,5±450,0	3337,5±330,0	2537,0±400,0	1698,4±330,0	1931,0±69,0	1456,0±34,0
Протеазы, мг · мл ⁻¹ · мин ⁻¹	133,5±24,3	191,0±22,6	249,0±21,1*	155,8±14,6*	200,0±12,6*	184,8±13,5*
Общий белок, г/л	0,46±0,12	0,48±0,16	0,18±0,01	0,38±0,01*	0,33±0,01	0,41±0,020
Фосфор, моль/л	0,14±0,02	0,12±0,03*	0,03±0,00	0,10±0,00	0,08±0,01	0,10±0,010*
Кальций, моль/л	2,33±0,12	2,46±0,15*	2,43±0,22*	2,26±0,18	2,39±0,10*	2,41±0,12
α -Амилаза, Ед/л	416,0±4,8	536,0±6,2	578,0±11,5	559,1±6,7	767,0±13,8	758,0±16,8

Примечание. Описание групп см. в разделе «Методика».

* Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

Введение дополнительных ингредиентов и изменение качественного состава рациона приводят к избирательному изменению активности пищеварительных ферментов (35-38). При включении в контрольный рацион УДЧ Fe наблюдали достоверное повышение активности липазы на 35,7 % ($p \leq 0,05$), кишечных протеаз — на 43,1 % на фоне снижения амилалитической активности на 35,0 % ($p \leq 0,05$). В I группе содержание фосфора в панкреатическом соке снижалось на 14,3 % ($p \leq 0,05$) при увеличении количества Са на 5,6 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля (табл. 4).

Жировые рационы способствовали стимуляции активности фермента липазы и кишечных протеаз во II группе соответственно в 8,5 ($p \leq 0,05$) и 1,9 раза ($p \leq 0,05$), в IV — в 7,3 и 1,5 раза ($p \leq 0,05$) относительно контроля.

В присутствии жировых компонентов в рационах активность фермента амилазы снижалась.

Дополнительное введение УДЧ Fe в рационы, включающие подсолнечное и соевое масла, снижало ферментативную активность поджелудочной железы, то есть нагрузка на нее уменьшалась. Относительно контрольных животных, находящихся на стандартном рационе, в III группе достоверно повысилась активность фермента липазы и протеаз соответственно на 12,1 и 16,7 % ($p \leq 0,05$), в V группе — на 133,2 и 38,4 % ($p \leq 0,05$). Присутствие в рационе жировых компонентов увеличивало секрецию липазы, но уменьшало секрецию амилазы. Очевидно, что увеличение количества любого питательного вещества приводит к повышению выработки в поджелудочной железе пищеварительных ферментов, предназначенных для его переваривания.

Введение в рационы УДЧ Fe значительно снижало активность амилазы панкреатического сока в составе дуоденального химуса: при включении в рацион подсолнечного масла — на 16,0 %, соевого масла — на 66,0 % ($p \leq 0,05$) (рис. 1).

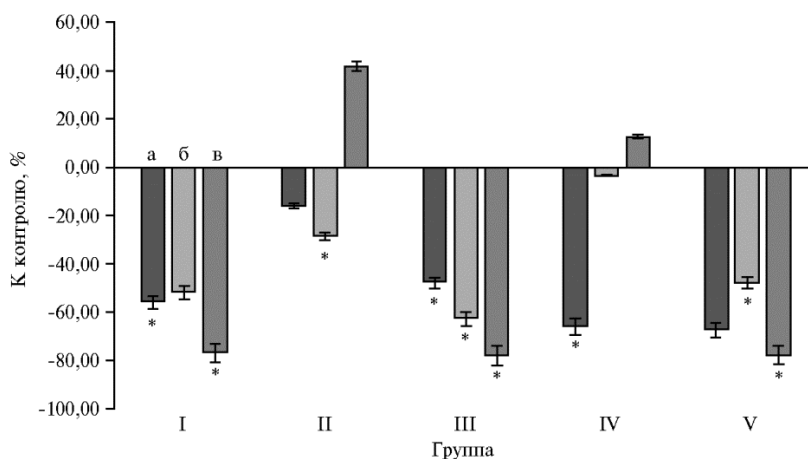


Рис. 1. Изменение активности пищеварительных ферментов панкреатического сока в составе дуоденального химуса у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы относительно контроля при введении в рационы растительных жиров и ультрадисперсных частиц железа: а — амилаза, б — протеазы, в — липаза ($n = 4$, $M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019-2020 годы). Описание групп см. в разделе «Методика».

Тенденция к снижению активности наблюдалась и в отношении кишечных протеаз. При введении УДЧ Fe на фоне контрольного рациона протеолитическая активность снижалась на 52,0 %, однако различия оказались недостоверными. Было отмечено статистически значимое снижение активности протеаз во II группе на 28,8 % ($p \leq 0,05$), в III — на 62,9 % ($p \leq 0,05$), в V — на 50,0 % ($p \leq 0,05$), в IV группе показатель снизился на 3,4 %. Активность липазы в дуоденальном химусе повышалась у животных, получавших жировые рационы, однако введение в них УДЧ Fe приводило к снижению показателя. Так, в I группе липолитическая активность снижалась в 4,3 раза ($p \leq 0,05$), в III — в 4,6 раз ($p \leq 0,05$), а в V — в 4,5 раза ($p \leq 0,05$).

Активность метаболитов оксида азота в сыворотке крови опосредует целый каскад физиологических процессов, в том числе регуляцию сосудистого тонуса, плазменного и тромбоцитарного звеньев гемостаза, нейротрансмиссию и формирование иммунного ответа, торможение пролиферации гладкомышечных клеток и оказывает значительное влияние на про-

цессы обмена в пищеварительном тракте (39). В нашем исследовании наблюдалось повышение содержания NO-метаболитов во всех опытных группах относительно контрольных значений (рис. 2).

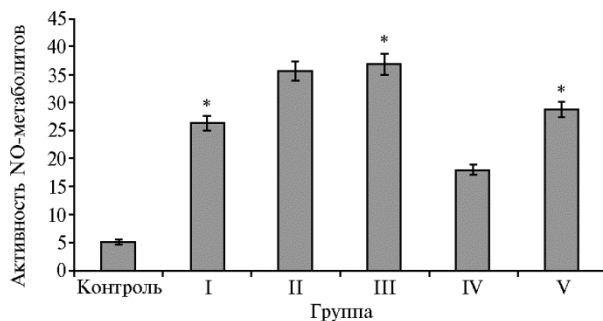


Рис. 2. Содержание NO-метаболитов в сыворотке крови у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при введении в рационы растительных жиров и ультрадисперсных частиц железа ($n = 4$, $M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019–2020 годы). Описание групп см. в разделе «Методика».

* Различия с контрольной группой статистически значимы при $p \leq 0,05$.

робный эффект при воспалении, может превратиться из звена адаптации в звено патогенеза и стать не менее опасным повреждающим фактором для организма, чем дефицит NO. Нарастание количества NO-метаболитов у телят в III опытной группе при включении в рацион УДЧ Fe свидетельствовало о компенсаторной реакции организма на изменяющийся липидный профиль рациона.

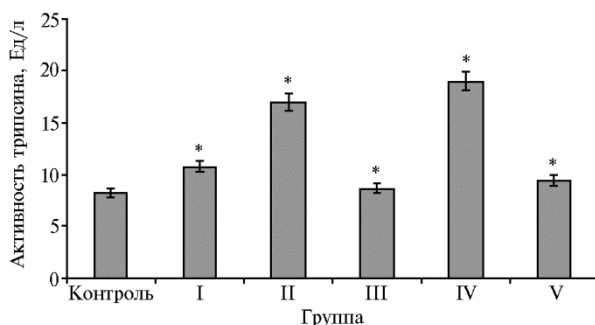


Рис. 3. Активность трипсина в сыворотке крови у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при введении в рационы растительных жиров и ультрадисперсных частиц железа ($n = 4$, $M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019–2020 годы).

* Различия с контрольной группой статистически значимы при $p \leq 0,05$.

что поступление трипсина в кровь уменьшает выход ферментов с панкреатическим соком, а введение ингибитора трипсина, напротив, сопровождается увеличением секреции ферментов (41).

В наших опытах при введении в рацион УДЧ Fe во всех опытных группах в сыворотке крови повышалась активность трипсина, который играет критическую роль в инициации каскада активации пищеварительных ферментов в кишечнике (рис. 3). При введении УДЧ Fe на фоне контрольного рациона активность трипсина увеличивалась на 31,2 % ($p \leq 0,05$). При

Дополнительное введение УДЧ Fe статистически значимо увеличивало содержание метаболитов оксида азота в I группе в 5,1 раза ($p \leq 0,05$), в III — в 7,2 раза ($p \leq 0,05$), в V — в 5,6 раза ($p \leq 0,05$). Недостаточная продукция NO у животных из контрольной группы сопряжена с развитием нарушений в сердечно-сосудистой и других системах организма. При этом S.V. Rama Rao с соавт. (40) установили, что избыточная продукция NO, за счет которой обеспечивается антими-

Показатели активности амилазы и липазы в сыворотке крови не всегда могут свидетельствовать о физиологическом напряжении функции поджелудочной железы при смене рационов, поскольку существует экстрапанкреатическая продукция этих ферментов. Трипсин — оптимальный маркер для выявления изменения в физиологическом состоянии поджелудочной железы, поскольку он специфичен для этого органа. Установлено,

замене контрольного рациона на жировые этот показатель повышался во II группе на 106,6 % ($p \leq 0,05$), в IV группе на 130,9 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля. При включении в жировые рационы УДЧ Fe активность трипсина снижалась на 48,8 % ($p \leq 0,05$) в III группе относительно II группы, в V группе — на 50,5 % ($p \leq 0,05$) относительно IV группы.

Активация трипсина при протеолитическом расщеплении трипсиногена в поджелудочной железе может привести к ряду событий, которые вызывают панкреатическое самовосприятие. Одно из последствий ауто-сомно-рецессивного заболевания муковисцидоза — недостаточный транспорт трипсина и других пищеварительных ферментов из поджелудочной железы (42).

В результате анализа морфологических показателей крови телят установлено, что при замене контрольного рациона на опытный с введением соевого масла число лейкоцитов статистически значимо повышалось на 57,3 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля, но включение УДЧ Fe приводило к снижению показателя на 30,5 % относительно IV группы ($p \leq 0,05$) (табл. 5).

Введение УДЧ Fe приводило к усилению всасывания железа из желудочно-кишечного тракта, улучшению синтеза железосодержащих метаболитов (в том числе гемоглобина), стимуляции эритропоэза (32). В экспериментах на 4-месячных телочках, получавших нанопорошок железа, число эритроцитов увеличилось на 19,6 %, а количество гемоглобина — на 17,1 % по отношению к контролю.

Мы установили, что включение как в контрольный, так и в жировые рационы УДЧ Fe снижало числа лимфоцитов и моноцитов. Число эритроцитов снижалось в I группе на 2,0 % относительно контроля, в III — на 9,0 % относительно II группы, в V группе — на 36,2 % ($p \leq 0,05$) относительно IV группы.

5. Морфологические показатели крови у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при введении в рационы растительных жиров и ультрадисперсных частиц железа ($n = 4$, $M \pm SEM$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019-2020 годы)

Показатель	Группа					
	контроль	I	II	III	IV	V
Лейкоциты, $\times 10^9/\text{л}$	7,5 \pm 1,32	7,1 \pm 1,20	7,2 \pm 1,63	6,9 \pm 1,32	11,8 \pm 2,22*	8,2 \pm 1,72*
Лимфоциты, $\times 10^9/\text{л}$	2,9 \pm 0,83	2,6 \pm 0,63	4,1 \pm 1,21	3,2 \pm 1,13	5,5 \pm 1,21	4,3 \pm 1,32
Моноциты, $\times 10^9/\text{л}$	1,3 \pm 0,32	1,2 \pm 0,25	1,5 \pm 0,31	1,2 \pm 0,22	2,5 \pm 0,42	1,6 \pm 0,33
ИСЛМ	2,21	2,13	2,72	2,61	2,22	2,50
Гранулоциты, $\times 10^9/\text{л}$	1,90 \pm 0,63	2,10 \pm 0,52	5,30 \pm 0,82*	4,30 \pm 0,62*	4,80 \pm 0,61	4,36 \pm 0,71
Эритроциты, $\times 10^{12}/\text{л}$	5,08 \pm 2,91	4,98 \pm 2,22	5,37 \pm 3,13	4,88 \pm 2,50	7,62 \pm 1,81*	4,86 \pm 1,61*
Гемоглобин, г/л	93,0 \pm 11,12	102,0 \pm 9,81*	122,0 \pm 13,80*	132,0 \pm 11,51*	119,0 \pm 14,70*	121,0 \pm 12,22*
Гематокрит, %	20,1 \pm 4,34	22,6 \pm 3,63	21,6 \pm 4,91	22,0 \pm 2,82	24,2 \pm 3,94	20,8 \pm 2,61
МСНС, г/л	349 \pm 26,92	324 \pm 28,63	440 \pm 26,42	388 \pm 36,53	424 \pm 27,72	368 \pm 34,23
Тромбоциты, $\times 10^9/\text{л}$	201 \pm 19,81	212 \pm 14,32	224 \pm 17,71	216 \pm 18,22	220 \pm 21,70	206 \pm 14,63

Примечание. ИСЛМ — индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов, МСНС — средняя концентрация гемоглобина в эритроците. Описание групп см. в разделе «Методика».

* Различия с контрольной группой статистически значимы при $p \leq 0,05$.

Непосредственно участие железа в образовании гемоглобина способствовало повышению содержания гемоглобина в опытных группах при включении УДЧ Fe в рацион. Количество гемоглобина в крови у животных опытных групп статистически значимо ($p \leq 0,05$) повышалось в I группе на 9,7 %, во II — на 31,2 %, в III — на 41,9 %, в IV — на 28,0 %, в V — на 30,1 % относительно показателя в контроле. Высокое содержание железа в геме делает гемоглобин идеальной молекулой для целевого извлечения железа во время эндогенного воздействия УДЧ. Значительное число эритроцитов и количества гемоглобина в крови животных свидетельствует о более

интенсивных окислительно-восстановительных процессах в организме и соответствует более высокому показателю продуктивности (43).

Наибольшее количество тромбоцитов отмечали во II опытной группе ($224 \times 10^9/\text{л}$), что оказалось выше контрольного показателя на 11,4 % ($p \leq 0,05$). Конкуренция за гемовое железо между клетками крови и пулом экзогенных бактерий на фоне напряжения эритропоэза, а также низкая всасываемость железа эндотелием и увеличение моторики желудочно-кишечного тракта могли стать причиной некоторого роста показателя.

Количество форменных элементов лейкоцитарного звена крови телят в контрольной и опытной группах находилось в пределах физиологической нормы. В структуре самой лейкограммы, отражающей процентное соотношение разных популяций лейкоцитов, отклонений от нормы не регистрировали. Индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ), который характеризует взаимоотношение афферентного и эффекторного звеньев иммунного ответа, показал, что ИСЛМ преобладал во II группе и далее уменьшался в ряду III группа > V группа > IV группа > контроль > I группа (см. табл. 5).

Значения морфологических показателей крови у телят из опытных групп соответствовали более высокой метаболической активности.

6. Биохимические показатели крови у телят (*Bos taurus taurus*) казахской белоголовой породы при введении в рационы растительных жиров и ультрадисперсных частиц железа ($n = 4$, $M \pm \text{SEM}$, ФНЦ биологических систем и агротехнологий РАН, 2019-2020 годы)

Показатель	Группа					
	контроль	I	II	III	IV	V
Общий белок, г/л	72,05±3,98	76,05±2,82*	86,85±4,51*	144,70±4,81*	99,43±6,98	154,50±4,54*
Альбумин, г/л	29,00±6,12	38,00±5,41	36,0±5,80*	38,00±4,72	42,00±5,33*	44,20±3,82
Глюкоза, ммоль/л	3,41±0,87	4,94±0,55*	3,52±0,63	4,94±0,46*	4,21±0,74*	5,22±0,41*
Триглицериды, ммоль/л	0,29±0,07	0,34±0,06*	0,37±0,03	0,09±0,01*	0,45±0,09*	0,07±0,01*
Холестерин, ммоль/л	2,67±0,19	1,08±0,05*	3,63±0,31*	0,92±0,03	4,99±0,81*	1,06±0,07
АЛАТ, Ед/л	23,80±4,31	22,50±3,81*	31,80±5,12	26,60±2,71*	28,80±5,11	26,30±2,91
АсАТ, Ед/л	44,20±5,93	42,20±2,92*	52,3±6,33	105,80±6,12*	54,90±5,82	108,60±4,82
Коэффициент де Ритиса (отношение АсАТ/АЛАТ)	1,86	1,87*	1,64	3,98*	1,91*	4,12*
Билирубин общий, мкмоль/л	2,43±0,07	2,61±0,08*	3,25±0,08*	2,16±0,12	3,67±0,09*	1,94±0,22
Билирубин прямой, мкмоль/л	1,11±0,13	1,01±0,11	1,72±0,18	1,05±0,02	1,59±0,16	1,84±0,06**
Биллирубиновый индекс	2,19	2,58*	1,91*	2,05*	2,31*	1,05
ЛДГ, Ед/л	3049±56,05	3856±62,21*	5272±64,31	3659±51,12*	4098±63,70*	3426±42,01*
α-Амилаза, Ед/л	415±23,11	712±30,22	471±63,12*	358±16,21	423±21,91	346±11,62
Липаза, Ед/л	17,30±3,42	18,00±2,20	16,80±1,21	8,00±0,63	28,40±3,91	8,60±0,52
Мочевина, ммоль/л	3,20±0,72	4,20±0,63	5,10±0,91*	5,00±0,91	4,60±0,92	4,40±0,55
Креатинин, мкмоль/л	74,50±6,31	81,20±5,11	88,70±7,23*	93,10±5,31	89,60±7,21	92,80±4,83
γ-ГТ, Ед/л	18,30±2,60	23,20±3,21	32,40±4,11	24,00±2,12	23,60±3,13	21,00±2,32
Мочевая кислота, мкмоль/л	15,50±3,22	16,00±2,82	18,90±4,32	21,20±3,82	16,10±3,92	19,80±3,61
Железо, мкмоль/л	19,20±3,81	22,70±4,61*	33,40±5,12*	49,30±4,41*	34,60±4,31	36,80±3,62*
Магний, ммоль/л	1,22±0,21	1,08±0,08	1,73±0,31	0,84±0,02	1,68±0,91	0,78±0,06
Кальций, ммоль/л	2,45±1,12	2,68±1,21	3,01±1,22	2,60±0,58	2,71±0,83	2,32±0,12
Фосфор, ммоль/л	1,54±0,04	2,04±0,08	2,03±0,06	1,97±0,09	1,68±0,62	1,44±0,23

Примечание. АЛАТ — аланинаминотрансфераза, АсАТ — аспаратаминотрансфераза, ЛДГ — лактат-дегидрогеназа, γ-ГТ — γ-глутамилтранспептидаза. Описание групп см. в разделе «Методика».

*, ** Различия с контрольной группой статистически значимы соответственно при $p \leq 0,05$ и $p \leq 0,01$.

Изменение биохимических показателей отражает адаптацию всех систем организма, в том числе пищеварения и общего гомеостаза, к смене условий кормления (43). В наших опытах введение в рацион телят УДЧ Fe стимулировало белковый обмен (табл. 6). Увеличение количества общего белка в сыворотке крови свидетельствовало о лучшем усвоении азота корма, чему способствовало и повышение ферментативной активности (29). При замене контрольного рациона на жировые этот показатель возрастал во II группе на 20,6 % ($p \leq 0,05$), в IV группе — на 38,0 %. Дополнительное введение УДЧ Fe повышало содержание общего белка в I группе на 5,6 %,

в III на 100,8 % и в V группе на 114,6 % относительно контроля.

Тенденция к повышению наблюдалась и в отношении альбумина (см. табл. 6). Его количество статистически значимо ($p \leq 0,05$) повышалось на 24,1 % во II и на 44,8 % в IV группе. Содержание мочевины в опытных группах превышало контроль на значения от 31,2 % (в I группе) до 59,4 % ($p \leq 0,05$) (во II группе).

Несвязанное железо также служит индуктором перекисного окисления липидов и перекисной деструкции белков. Металлы в микрочастицах имеют низкую степень высвобождения и скорость усвоения, тем самым исключают токсическое воздействие на организм и кишечную микрофлору (12). Изменение жирового обмена оценивали по содержанию триглицеридов и холестерина в сыворотке крови. При включении в рацион УДЧ Fe количество триглицеридов повышалось на 17,2 % ($p \leq 0,05$) (см. табл. 6).

Растительные масла в рационе животных оказывают значительное влияние на липидный профиль крови (45). В нашем опыте при замене контрольного рациона на жировые содержание триглицеридов повышалось во II группе на 27,6 %, в IV группе — на 55,2 % ($p \leq 0,05$). Дополнительное введение в жировые рационы УДЧ Fe способствовало достоверному снижению количества триглицеридов в сыворотке крови телят из III группы на 68,9 % ($p \leq 0,05$), в V группе на 75,9 % ($p \leq 0,05$) относительно контрольных значений. Аналогичную тенденцию отмечали и в отношении содержания холестерина (см. табл. 6).

Воздействие УДЧ Fe на углеводный обмен у животных оценивали по содержанию глюкозы в сыворотке крови. Показатель статистически значимо ($p \leq 0,05$) увеличивался в I и III группах на 44,9 %, в V — на 53,1 % относительно контроля (см. табл. 6).

Включение в рационы УДЧ Fe способствовало увеличению содержания железа ($p \leq 0,05$), однако количество магния, кальция и фосфора недостоверно снижалось, за исключением III группы. При замене контрольного рациона на жировые содержание P повышалось во II группе на 31,8 %, в IV — на 9,1 %, содержание Ca во II группе — на 22,9 %, в IV — на 10,6 %, содержание Mg во II группе — на 41,8 %, в IV — на 37,7 % относительно контроля.

Включение в контрольный и жировые рационы УДЧ Fe способствовало как стимуляции, так и торможению некоторых процессов. Увеличение соотношения АсАТ/АлАТ (коэффициент де Ритиса) могло свидетельствовать о хронических процессах, связанных с паренхиматозным поражением печени вследствие интоксикации организма тяжелыми металлами. В коэффициенте де Ритиса АсАТ отражает активность реакций центрального звена метаболизма, регулирует поступление субстратов в цикл Кребса с их последующим аэробным окислением, выполняет детоксицирующую функцию по отношению к аммиаку, включая его в цикл синтеза мочевины, а также обеспечивает восстановление в тканях содержания аспартата, снижающегося при дисбалансе аминокислот и гипоксии (43, 45). Чем выше содержание АлАТ, тем ниже коэффициент де Ритиса.

Содержание АлАТ повышалось в группах, получавших жировые рационы: во II группе — на 33,6 %, в IV — на 21,0 %, однако эти изменения не были статистически значимы. Дополнительное введение УДЧ Fe способствовало снижению количества АлАТ в I группе на 5,5 % ($p \leq 0,05$) относительно контроля, в III — на 16,4 % ($p \leq 0,05$) относительно II группы, находящейся на том же рационе, но без добавления железа. Коэффициент де Ритиса был достоверно ($p \leq 0,05$) выше в группах, получавших УДЧ Fe на фоне жировых рационов (см. табл. 6).

Также был рассчитан билирубиновый индекс (БИ) крови, который характеризует выделительную функцию печени и показывает степень токсичности УДЧ железа. БИ повышался на 17,8 % ($p \leq 0,05$) в I группе и на 5,5 % ($p \leq 0,05$) в IV группе относительно контроля, во всех других опытных группах значения БИ были ниже, чем в контроле.

Таким образом, включение в жировые рационы телят казахской белоголовой породы ультрадисперсных железа способствовало достоверному увеличению переваримости сырого жира, органического вещества и безазотистых экстрактивных веществ корма, тогда как переваримость сырой клетчатки и сырого протеина снижалась. Дополнительное обогащение рационов УДЧ Fe и жировыми компонентами оказывало стимулирующее влияние на панкреатическую секрецию, приводя к увеличению количества продуцируемого сока. Под влиянием УДЧ Fe избирательно изменялась активность пищеварительных ферментов поджелудочной железы. При включении в контрольный рацион УДЧ Fe наблюдалось повышение активности липазы на 35,7 %, кишечных протеаз — на 43,1 % на фоне снижения амилалитической активности на 28,8 %. Введение УДЧ Fe в жировые рационы снижало ферментативную активность поджелудочной железы относительно контрольной группы: в варианте с подсолнечным маслом активность липазы и кишечных протеаз усиливалась соответственно на 12,1 и 16,7 % ($p \leq 0,05$), с соевым маслом — на 133,2 и 38,4 % ($p \leq 0,05$). Дополнительное введение в рацион телят жировых компонентов отдельно и в комплексе с УДЧ приводило к повышению содержания NO-метаболитов во всех опытных группах относительно контрольного показателя. При добавлении к рационам подсолнечного и соевого масла отмечали повышение содержания трипсина соответственно на 106,6 % ($p \leq 0,05$) и 130,9 %, введение УДЧ Fe способствовало снижению этого показателя. При морфологическом анализе было выявлено статистически значимое повышение содержания гемоглобина в крови у животных опытных групп на 9,7-41,9 % ($p \leq 0,05$). Биохимический анализ крови показал, что все изучаемые параметры находились в пределах допустимых физиологических норм, однако УДЧ Fe оказывали стимулирующее воздействие на белковый, жировой и углеводный обмен. Было отмечено повышение коэффициента де Ритиса в группах, получавших УДЧ Fe на фоне рационов с подсолнечным и соевым маслом. Во всех других опытных группах значения билирубинового индекса были ниже, чем в контрольной группе, что указывает на достаточно низкую токсичность препарата ультрадисперсных частиц железа.

¹ФГБОУ ВО Оренбургский государственный университет,
460018 Россия, г. Оренбург, просп. Победы, 13,
e-mail: elena-shejjda@mail.ru ✉, sergey_ru01@mail.ru;

Поступила в редакцию
2 августа 2021 года

²ФГБНУ Федеральный научный центр
биологических систем и агротехнологий РАН,
460000 Россия, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29,
e-mail: lsv74@list.ru, oksana.shoshina.98@mail.ru;

³ФГБОУ ВО Оренбургский государственный аграрный
университет,
460014 Россия, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18,
e-mail: Viktoria1985too@mail.ru

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2022, V. 57, № 2, pp. 328-342

ADAPTIVE RESPONSES OF CATTLE DIGESTIVE SYSTEM AS INFLUENCED BY DIETARY ULTRAFINE IRON PARTICLES COMBINED WITH FAT DIETS

E.V. Sheida^{1, 2} ✉, *S.V. Lebedev*², *S.A. Miroshnikov*^{1, 2}, *V.V. Grechkina*^{2, 3}, *O.V. Shoshina*²

¹Orenburg State University, 13, prosp. Pobedy, Orenburg, 460018 Russia, e-mail elena-shejjda@mail.ru (✉ corresponding author), sergey_ru01@mail.ru;

²Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS, 29, ul. 9 Yanvarya, Orenburg, 460000 Russia, e-mail lsv74@list.ru, oksana.shoshina.98@mail.ru;

³Orenburg State Agrarian University, 18, ul. Chelyuskintsev, Orenburg, 460014 Russia, e-mail Viktoria198Stoo@mail.ru ORCID:

Sheida E.V. orcid.org/0000-0002-2586-613X

Lebedev S.V. orcid.org/0000-0001-9485-7010

Miroshnikov S.A. orcid.org/0000-0003-1173-1952

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially from the Russian Science Foundation (project No. 20-16-00088)

Received August 2, 2021

Grechkina V.V. orcid.org/0000-0002-1159-0531

Shoshina O.V. orcid.org/0000-0003-4104-3333

doi: 10.15389/agrobiologia.2022.2.328eng

Abstract

Fats are a concentrated source of energy; the fatty components in the diets of farm animals are economically feasible and efficient. The fatty supplements in the diet of cattle improves the palatability of the diets and reduces the rate of feed passage through the gastrointestinal tract, which increases the availability of nutrients and increases livestock productivity. However, some papers indicate a decrease in the digestibility of nutrients in the presence of dietary fat. To increase the availability of nutrients in rations, it is necessary to use additional components in the feed, in particular, ultrafine particles. They, unlike their counterparts in micro- and macro-form, have higher physical activity, chemical neutrality, and high bioavailability ensured by an increased surface area. The limited practical use of ultrafine particles (UFP) in animal husbandry is due to insufficient knowledge about their biological effects on metabolism. Here, for the first time, we evaluated the effect of an ultrafine iron preparation on pancreatic secretion, enzymatic activity of pancreatic juice, morphological and biochemical parameters of blood, and digestibility of feed enriched with sunflower and soybean oils. The aim of our research was to characterize ultrafine iron particles as modulators of metabolic activity when using vegetable fats in the diet of ruminants. The experiments were carried out on Kazakh white-headed calves aged 8 months with an average weight of 120-130 kg (a vivarium of Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS, October 2019–October 2020). A Latin square 4×4 design was applied in five replicates. Control group were fed a standard balanced basal diet (BD), group I – BD supplemented with UFP Fe, group II – BD added with sunflower oil, group III – BD added with sunflower oil + UFP Fe, group IV – BD added with soybean oil, and group V – BD added with soybean oil + UFP Fe. Oils replaced 3 % dry matter of feed concentrates. To produce UDP Fe, we used electric explosion of a conductor in an argon atmosphere (Advanced Powder Technologies, Tomsk). UFPs Fe ($d = 90$ nm, Z-potential 7.7 ± 0.5 mV) are 99.8 % Fe. Before use, ultrafine iron particles were dispersed in a physiological solution using UZDN-2T (NPP Akademprigor, Russia) (35 kHz, 300 W, 10 rA, 30 min) and added at a dosage of 2.2 mg per animal. To study the exocrine function of the pancreas, a duodenal anastomosis surgery technique was performed. Pancreatic juice and chyme samples were collected over 8 hours with a 60 min interval. The activity of amylase, proteases, and lipase was measured. The blood NO metabolites and trypsin activity were measured. Feed digestibility was assessed on day 7 in balance experiments based on the amount of the consumed feed, uneaten feed and excreted feces. The digestibility coefficient (DC) was calculated as the ratio of the digested nutrients to those entered the body. Dry matter, crude protein, fat and ash contents were measured. Blood for quantitative analysis of the morphological and biochemical parameters was sampled in the morning on an empty stomach on day 7 of the experiment. The research data indicate that dietary UFP Fe with the fat diets contributed to a significant ($p \leq 0.05$) increase in the digestibility of crude fat, organic matter and nitrogen-free extractive substances, while the digestibility of crude fiber and crude protein decreased. Enrichment with UFP Fe and fatty ingredients had a stimulating effect on pancreatic secretion, leading to an increased amount of pancreatic juice. The UFP Fe selectively changed the activity of the digestive pancreatic enzymes. UFP Fe added to BD, increased the activity of lipase by 35.7 %, intestinal proteases by 43.1 % while the amyolytic activity decreased by 28.8 %. Dietary UFP Fe combined with sunflower and soybean oils reduced the enzymatic activity of the pancreas compared to the control: in group III, the activity of lipase and intestinal proteases increased by 12.1 and 16.7%, respectively ($p \leq 0, 05$), in group V – by 133.2 and 38.4 %, respectively ($p \leq 0.05$). The BD supplementation with fatty ingredients, alone and in combination with UFP Fe, increased the level of NO-metabolites in all experimental groups compared to the control. When replacing BD with fat diets, the trypsin activity increased in group II by 106.6% ($p \leq 0.05$), in group IV by 130.9 % ($p \leq 0.05$). Added UFP Fe reduced the trypsin activity. Morphological analysis revealed a statistically significant ($p \leq 0.05$) increase in the hemoglobin content in calves of the experimental groups, in group I by 9.7 %, in group II by 31.2%, in group III by 41.9 %, in IV by 28.0 %, in V by 30.1 %. A biochemical blood test showed that all the studied parameters were within physiological norms, however, it should be noted that UFP Fe had a stimulating effect on protein, fat and carbohydrate metabolism in calves. A significant increase in the de Ritis ratio occurred in the groups that fed UFP Fe with fat diets, up to 3.98 in group III and 4.1 in group V ($p \leq 0.05$). As compared to the control, the bilirubin index (BI) increased by 17.8 % ($p \leq 0.05$) in group I and by 5.5% ($p \leq 0.05$)

in group IV, in all other groups the BI values were lower than in the control.

Keywords: ultrafine particles, iron, blood morphology, blood biochemical test, pancreas, enzymes, pancreatic juice, chyme, cattle, fats, sunflower oil, soybean oil.

REFERENCES

1. Zenova N.Yu., Nazarova A.A., Polishchuk S.D. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo*, 2010, 1: 30-32 (in Russ.).
2. Kalagina L.S. *Meditsinskii al'manakh*, 2010, 1: 281-283 (in Russ.).
3. Vertiprakhov V.G., Egorov I.A., Andrianova E.N., Grozina A.A. The physiological aspects of the supplementation of diets for broilers (*Gallus gallus* L.) with different vegetable oils. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2018, 53(4): 811-819 (doi: 10.15389/agrobiology.2020.6.1159eng).
4. Hartanto R., Cai L., Yu J., Zhang N., Sun L., Qi D. Effects of supplementation with monensin and vegetable oils on in vitro enteric methane production and rumen fermentability of goats. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 54(3): 693-698 (doi: 10.21162/PAKJAS/17.4347).
5. Santra A., Banerjee A., Das S.K. Effect of vegetable oils on ciliate protozoa, methane yield, enzyme profile and rumen fermentation in vitro. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 2013, 13(2): 181-193.
6. Oldick B.S., Firkins J.L. Effects of degree of fat saturation on fiber digestion and microbial protein synthesis when diets are fed twelve times daily. *Journal of Animal Science*, 2000, 78(9): 2412-2420 (doi: 10.2527/2000.7892412x).
7. Plascencia A., Mendoza G.D., Vásquez C., Zinn R.A. Relationship between body weight and level of fat supplementation on fatty acid digestion in feedlot cattle. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(11): 2653-2659 (doi: 10.2527/2003.81112653x).
8. Levakhin Yu.I., Nurzhanov B.S., Ryazanov V.A., Dzhulamanov E.B. *Agrarnyi vestnik Urala*, 2019, 192(1): 53-59 (doi: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-53-59) (in Russ.).
9. Kalashnikov A.P., Fisinin V.I., Shcheglov V.V., Kleimenov N.I. *Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh [Norms and diets for feeding farm animals: reference guide]*. Moscow, 2003 (in Russ.).
10. Sheida E.V., Rusakova E.A., Sipailova O.Yu., Cizova E.A., Lebedev S.V. Toxic effects of ultra-dispersed forms of metals (Mo and MoO₃) in the experiment in vivo. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2020, 55(6): 1171-1181 (doi: 10.15389/agrobiology.2020.6.1171eng).
11. Gülşen N., Umucallilar H.D., Inal F., Hayirli A. Impacts of calcium addition and different oil types and levels on in vitro rumen fermentation and digestibility. *Archives of Animal Nutrition*, 2006, 60(6): 443-453 (doi: 10.1080/17450390600973634).
12. Hassan S., Hassan F.U., Rehman M.S.U. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2020, 195(2): 591-612 (doi: 10.1007/s12011-019-01862-9).
13. Fisinin V.I., Vertiprakhov V.G., Titov V.Yu., Grozina A.A. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal imeni I.M. Sechenova*, 2018, 104(8): 976-983 (doi: 10.7868/S0869813918070080) (in Russ.).
14. Corring T. The adaptation of digestive to the diet: Its physiological significance. *Reprod. Nutr. Develop.*, 1980, 20(4B): 1217-1235 (doi: 10.1051/rnd:19800713).
15. Clary J., Mitchell Jr. G.E., Bradley N.W. Pancreatic amylase activity from ruminants fed different rations. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 1969, 47(2): 161-164 (doi: 10.1139/y69-027).
16. Duthie C.A., Troy S.M., Hyslop J.J., Ross D.W., Roehe R., Rooke J.A. The effect of dietary addition of nitrate or increase in lipid concentrations, alone or in combination, on performance and methane emissions of beef cattle. *Animal*, 2018, 12(2): 280-287 (doi: 10.1017/S175173111700146X).
17. Eastridge M.L. Major advances in applied dairy cattle nutrition. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(4): 1311-1323 (doi: 10.3168/jds.S0022-0302(06)72199-3).
18. Sineshchekov A.D. *Tezisy dokladov VIII Vsesoyuznogo s"ezda fiziologov, biokhimikov, farmakologov [Abstracts of the VIII All-Union Congress of physiologists, biochemists, pharmacologists]*. Moscow, 1955: 736 (in Russ.).
19. Batoev Ts.Zh. *Fiziologicheskii zhurnal SSSR imeni I.M. Sechenova*, 1972, 58 (11): 1771-1773 (in Russ.).
20. Batoev Ts.Zh. *Voprosy fiziologii i patologii zhivotnykh: Sbornik trudov Buryatskogo gosudarstvennogo sel'skokhozyaistvennogo instituta*, 1971, 25: 22-26 (in Russ.).
21. Batoev Ts.Zh. *Fiziologiya pishchevareniya ptits [Physiology of bird digestion]*. Ulan-Ude, 2001 (in Russ.).
22. Mazhitova M.V. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2011, 3 (in Russ.).
23. Association of Official Agricultural Chemists. *Official methods of analysis. 16th edition*. Association of Official Agricultural Chemists, Washington DC, 1995.
24. Hashemi S., Loh T., Foo H., Zulkifli I., Bejo M. Small intestine morphology, growth performance

- and nutrient digestibility of young broilers affected by different levels of dietary putrescine. *Journal of Animal and Poultry Sciences*, 2014, 3(3): 95-104.
25. Humer E., Kröger I., Neubauer V., Reisinger N., Zebeli Q. Supplementation of a clay mineral-based product modulates plasma metabolomic profile and liver enzymes in cattle fed grain-rich diets. *Animal*, 2019, 13(6): 1214-1223 (doi: 10.1017/S1751731118002665).
 26. Hansen S.L., Ashwell M.S., Moeser A.J., Fry R.S., Knutson M.D., Spears J.W. High dietary iron reduces transporters involved in iron and manganese metabolism and increases intestinal permeability in calves. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(2): 656-65 (doi: 10.3168/jds.2009-2341).
 27. Jampilek J., Kos J., Kralova K. Potential of nanomaterial applications in dietary supplements and foods for special medical purposes. *Nanomaterials*, 2019, 9(2): 296 (doi: 10.3390/nano9020296).
 28. Lebedev S.V., Sheida E., Vertiprakhov V., Gavrish I., Kvan O., Gubaidullina I., Ryazanov V., Miroshnikov I. A study of the exocrinous function of the cattle pancreas after the introduction of feed with a various protein source in rations. *Bioscience Research*, 2019, 16(3): 2553-2562.
 29. Lebedev S.V., Gavrish I.A., Shejda E.V., Miroshnikov I.S., Ryazanov V.A., Gubajdullina I.Z., Makaeva A.M. Effect of various fats on digestibility of nutrients in diet of calves. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 341: 012066 (doi: 10.1088/1755-1315/341/1/012066).
 30. Khan Z., Al-Thabaiti S.A. Green synthesis of zero-valent Fe-nanoparticles: catalytic degradation of rhodamine B, interactions with bovine serum albumin and their enhanced antimicrobial activities. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, 180: 259-267 (doi: 10.1016/j.jphoto-biol.2018.02.017).
 31. Vertiprakhov V.G., Grozina A.A., Fisinin V.I. The exocrine pancreatic function in chicken (*Gallus gallus* L.) fed diets supplemented with different vegetable oils. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2020, 55(4): 726-737 (doi: 10.15389/agrobiology.2020.4.726eng).
 32. Lieu P.T., Heiskala M., Peterson P.A., Yang Y. The roles of iron in health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 2001, 22(1-2): 1-87 (doi: 10.1016/s0098-2997(00)00006-6).
 33. Mody V.V., Siwale R., Singh A., Mody H.R. Introduction to metallic nanoparticles. *J. Pharm. Bioallied Sci.*, 2010, 2(4): 282-289 (doi: 10.4103/0975-7406.72127).
 34. Naik P.K. Bypass fat in dairy ration-a review. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 2013, 13: 147-163.
 35. Vertiprakhov V.G., Grozina A.A., Dolgorukova A.M. The activity of pancreatic enzymes on different stages of metabolism in broiler chicks. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2016, 4(51): 509-515 (doi: 10.15389/agrobiology.2016.4.509eng).
 36. Fisinin V.I., Egorov I.A., Vertiprakhov V.G., Grozina A.A., Lenkova T.N., Manukyan V.A., Egorova T.A. Activity of digestive enzymes in duodenal chymus and blood in broilers of parental lines and the meat cross depending on dietary bioactive additives. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2017, 6(52): 1226-1233 (doi: 10.15389/agrobiology.2017.6.1226eng).
 37. Palmquist D.L., Jenkins T.C. A 100-year review: fat feeding of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(12): 10061-10077 (doi: 10.3168/jds.2017-12924).
 38. Al-Qushawi A., Rassouli A., Atyabi F., Peighambari S. M., Esfandyari-Manesh M., Shams G., Yazdani A. Preparation and characterization of three tilmicosin-loaded lipid nanoparticles: physicochemical properties and in-vitro antibacterial activities. *Iran. J. Pharm. Res.*, 2016, 15(4): 663-676.
 39. Podoksenov Yu.K., Kamenshchikov N.O., Mandel' I.A. *Anesteziologiya i reanimatologiya*, 2019, 2: 34-47 (doi: 10.17116/anaesthesiology201902134) (in Russ.).
 40. Rama Rao S.V., Prakash B., Raju M.V.L.N., Panda A.K., Kumari R.K., Pradeep Kumar Reddy E. Effect of supplementing organic forms of zinc, selenium and chromium on performance, anti-oxidant and immune responses in broiler chicken reared in tropical summer. *Biological Trace Element Research*, 2016, 172(2): 511-520 (doi: 10.1007/s12011-015-0587-x).
 41. *Ekzokrinnaya nedostatochnost' podzheludochnoi zhelezy* /A.A. Nizhevich, O.A. Malievskii, A.Ya. Valiulina, L.V. Yakovleva, R.M. Faizullina (sost.) [Exocrine pancreatic insufficiency. A.A. Nizhevich, O.A. Malievskii, A.Ya. Valiulina, L.V. Yakovleva, R.M. Faizullina (compilers)]. Ufa, 2017 (in Russ.).
 42. Hirota M., Ohmuraya M., Baba H. The role of trypsin, trypsin inhibitor, and trypsin receptor in the onset and aggravation of pancreatitis. *J. Gastroenterol.*, 2006, 41(9): 832-836 (doi: 10.1007/s00535-006-1874-2)
 43. Snook J.T. Adaptive and nonadaptive changes in digestive enzyme capacity influencing digestive function. *Feder. Proc.*, 1974, 33(1): 88-93.
 44. Farouk S.N., Muhammad A., Aminu M.A. Application of nanomaterials as antimicrobial agents: a review. *Archives of Nanomedicine: Open Access Journal*, 2018, 1(3): 59-64 (doi: 10.32474/anoaj.2018.01.000114).