

УДК: 636.2.034.085.25.087.7:612.322.664

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2024.1.70-92

**ВЛИЯНИЕ ЖИРОВЫХ ДОБАВОК НА ПОТРЕБЛЕНИЕ
И ПЕРЕВАРИМОСТЬ КОМПОНЕНТОВ КОРМА, ПРОФИЛЬ ЛЖК
В РУБЦЕ И СОСТАВ ЛИПИДОВ МОЛОКА У КОРОВ**

¹Овчаренко Э.В., ²Мещеряков В.П.

^{1,2} *Калужский филиал РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Калуга,
Российская Федерация*

Влияние жировых добавок на потребление корма, переваримость питательных веществ, показатели рубцового пищеварения, молочную продуктивность и состав липидов молока изучали методом групп-периодов в серии опытов, проведенных на коровах холмогорской породы средней продуктивности (5 тыс. кг за 305 дней лактации) на спаде лактации (пятый-шестой месяцы лактации к началу опыта) при использовании рационов с разным соотношением химических компонентов корма. В каждой группе $n=3-4$, в гр. 1 три периода по 30 дней, в гр. 2 два периода по 60 дней. Состав рационов в основном опыте по двум группам (гр) и трём периодам (пр): **гр 1:** пр 1, основной рацион (ОР.1) со сбалансированным соотношением грубых и концентрированных кормов; пр 2: ОР.1 с добавкой свиного кормового жира (ОР.1+Ж); пр 3: жир-депрессирующий рацион с повышенным содержанием крахмалистых веществ (ЖдпР); **гр 2:** пр 1: (ОР.2); пр 2: рацион с низким содержанием сырого жира и добавкой сухого свекловичного жома (НСЖ); пр 3: НСЖ с добавкой свиного кормового жира (НСЖ+Ж). В двух дополнительных опытах проводили анализ жирнокислотного состава разных жировых добавок и оценивали длительность адаптации при применении добавок жира. В конце каждого периода проводили отбор проб крови, рубцовой жидкости и определение переваримости питательных веществ. Потребление сырого жира и его переваримость на ОР.1+Ж были выше ($P<0,05$), а переваримость клетчатки ниже ($P<0,05$) чем на ОР.1. Потребление и переваримость сырого жира, сухого вещества и клетчатки на НСЖ были ниже, чем на ОР.2 ($P<0,05$). Выявлена отрицательная корреляция между уровнем в рубцовой жидкости пропионовой кислоты и массовой долей жира в молоке ($r=0,45$, $P<0,01$). Суммарное содержание в молоке жирных кислот C18 было выше ($P<0,05$) при скармливании жировых добавок по сравнению с контролем. Выявлена положительная корреляция между содержанием в молочном жире кислот C18:0+C18:1 и массовой долей жира в молоке ($r=0,56$, $P<0,01$). Полученные данные свидетельствуют о регуляторной роли соотношения продуктов ферментации в рубце и о возможности повышать жирность молока и улучшать жирнокислотный состав молочного жира за счёт применения добавок кормового жира.

Ключевые слова: дойные коровы, жировые добавки, потребление корма, переваримость питательных веществ, ЛЖК в рубце, жирнокислотный состав липидов молока.

Проблемы биологии продуктивных животных. 2024. 1: 70-92.

Введение

Повышение продуктивности коров вынуждает (в связи с ограничениями способности к потреблению и перевариванию растительных кормов) использовать возможности удовлетворения потребностей в энергии за счёт введения в рацион кормовых средств с высокой концентрацией усвояемой энергии: крахмалистых (зерновых злаков – «концентратов») или с высоким содержанием жира (жировых добавок). Однако, эти компоненты корма, наряду с мощным потенциалом повышения концентрации обменной энергии в сухом веществе рациона, не лишены и отрицательных свойств; например, высокое потребление крахмала чревато не только нежелательным перераспределением энергии в пользу жировой ткани на фоне снижения жирномолочности, но и нарушениями рубцового метаболизма, тогда как при высоком содержании жира в рационе нередко снижается переваримость клетчатки, сухого вещества кормов (Huhtanen et al., 2009) и повышается риск развития гипофагии (Allen, 2000; NRC, 2001).

Неадекватное соотношение химических компонентов корма чревато различными нарушениями; так, при дефиците незаменимых жирных кислот наблюдается ряд негативных отклонений, в том числе : а) замедление роста; б) повышенная проницаемость тканей для воды; в) более высокая подверженность к инфекционным заболеваниям; г) стерильность; д) потеря стабильности биомембран; е) повреждения почек, гематурия и гипертония; ж) ослабление зрения; з) ослабление силы сердечных сокращений; и) снижение синтеза АТФ в печени и сердечной мышце; к) пониженная ретенция азота (McDonald et al., 2010)

Незаменимыми жирными кислотами считают линолевую и линоленовую кислоты. Подобно другим непредельным (ненасыщенным) кислотам, они участвуют в построении мембран, служат предшественниками в синтезе эйкозаноидов, включая простагландины, тромбобласты, лейкотриены, а также гормоноподобные вещества, регулирующие многие физиологические функции, включая свертывание крови, кровяное давление, сокращение гладкой мускулатуры и иммунные реакции.

Использование жировых добавок является важным элементом оптимизации питания коров с целью повышения концентрации энергии в сухом веществе рационов, достижения высокой молочной продуктивности и сохранения здоровья коров (Palmquist, Jenkins, 2017). Жировые добавки нередко оценивают с позиций их влияния на жирнокислотный состав липидов молока, с целью повышения качества питания и здоровья человека (Rafiec-Yarandi et al., 2016). Показано, что подкормки, содержащие незаменимые жирные кислоты, могут стимулировать иммунные и репродуктивные функции (Moallem, 2018).

Основной реакцией в процессе катаболизма жирных кислот является бета-окисление, которое происходит в митохондриях и пероксисомах. Прежде чем попасть в митохондрию, свободная жирная кислота с ацил-коэнзима А связывается с карнитином; продукт этой реакции, ацилкарнитин проникает через митохондриальную мембрану под действием карнитин-ацилкарнитин-транслоказы (Longo et al., 2006). После удаления карнитина из ацилкарнитина, карнитинацилкарнитин-транслоказа возвращает карнитин в цитоплазму, где может начаться очередной цикл. В цитозоле ацил-КоА окисляется с образованием ацетил-КоА, который поступает в митохондрии и расходуется, в процессе окислительного фосфорилирования, а при неполном окислении участвует в процессах кетогенеза в печени (Longo et al., 2016). В отличие от среднецепочечных жирных кислот, жирные кислоты с длинной углеродной цепью (22 или более атомов углерода) не могут проникнуть в митохондрии. Вместо этого, они с участием переносчиков перемещаются к пероксисомам, где подвергаются неполному окислению, конъюгируются с карнитином под действием карнитин-О-октаноилтрансферазы и переносятся в митохондрии для завершения окисления (Longo et al., 2006).

Хотя в определённых пределах печень способна снижать содержание в ней триацилглицеролов путём образования и секреции липопротеинов очень низкой плотности, при высоком содержании НЭЖК в крови у коров в переходный период инициируется дисбаланс между поглощением (печенью) и секрецией жирных кислот, что повышает риск развития жировой дистрофии печени (Hocquette, Bauchart, 1999; Vernon, 2005). При значительном накоплении триацилглицеролов в печени (более 10% от сухого вещества) функционирование её нарушается (Bobe et al., 2004), что провоцирует нарушения метаболизма, отрицательно влияющие на воспроизводство и иммунитет (Angeli et al., 2019; Zerbe et al., 2000). Особенно сильно это проявляется у коров, перекормленных в сухостойный период.

Хотя рационы коров при традиционном кормлении содержат относительно мало липидов (McDonald et al., 2010), однако соответствующим набором кормов можно варьировать содержание сырого жира в рационе в довольно широких пределах. При нормировании рационов по содержанию жира необходимо учитывать, что оценка содержания жира в кормах методом Сокслета даёт завышенные показатели вследствие того, что органические растворители (диэтиловый эфир, петролейный эфир) извлекают из образцов не только липиды, но и пигменты, витамины и др. Доля жирных кислот в сыром жире достигает 80% для концентратов и только 50% - для грубых кормов (Palmquist, Jenkins, 2003). При этом линолевая кислота (18:2; цис-9, цис-12) преобладает в зерне злаков и семенах, тогда как линоленовая (18:3; цис-9, цис-12, цис-15) – в грубых кормах (Palmquist, Jenkins, 2003).

Применение добавок липидов с высокой долей полиненасыщенных жирных кислот оказывает негативное влияние на переваримость органического вещества; при этом происходит сдвиг ферментации в рубце в направлении снижения продукции ацетата и повышения пропионата (Bayat et al., 2018). Снижение переваримости питательных веществ рациона из зерновых злаков было выявлено при скармливании льняного масла в количестве 37-55 г/кг сухого вещества, тогда как на рационе из бобовых или из злаковых трав этого не наблюдалось, что, по предположению авторов, явилось следствием различий в соотношении клетчатка/крахмал в рационе (Benchaa et al., 2015). Подтверждением этому служат результаты исследования, в котором было сделано заключение, что решающее влияние на потребление сухого вещества оказывает длина углеродной цепи, а не степень ненасыщенности жирных кислот (Bayat et al., 2018).

Метаболизм липидов в рубце. Основные процессы преобразования липидов в рубце – гидрогенизация и липолиз. Липиды, содержащиеся в кормах, в небольшой мере гидролизуются (уже в процессе уборки) липазами, содержащимися в растениях, а в результате пережёвывания и поступления корма в рубец подвергаются гидролизу под действием микробиальных липаз. Не так давно обнаружены липазы высокой активности у отдельных видов растений (Buccioni et al., 2012). Гидролиз липидов происходит экстрацеллюлярно. Большая часть гидролиза приходится на липазы, выделяемые рубцовыми бактериями *Anaerovibrio lipolytica*, разлагающими, в основном, триацилглицеролы, и *Butirvibrio spp*, разлагающими, в основном, фосфо- и галактолипиды. Установлено, что гидролиз сложных липидов (фосфолипидов, галактолипидов) происходит гораздо медленнее, чем гидролиз ТГ (Elliott et al., 1999). Эта особенность способствует сбережению полиненасыщенных кислот, которые преобладают с большим перевесом в полярных липидах. Степень гидролиза, обычно превышающая 85%, отрицательно связана с уровнем жира в рационе; скорость гидролиза снижается при низком рН рубцового содержимого. Важно учитывать, что двойные связи в природных непредельных жирных кислотах почти исключительно находятся в цис-конфигурации: в грубых кормах преобладает линоленовая (18:3; цис-9, цис-12, цис-15), а в семенах злаковых и семенах масличных культур – большей

частью присутствует линолевая (18:2; цис-9, цис-12). В то же время, при гидрогенизации происходит образование довольно широкого спектра изомеров, как полезных, так и вредных для здоровья животных (Bauman et al., 2003).

Биогидрогенизация свободных жирных кислот происходит под действием бактериальных изомераз и редуктаз. Прикрепление жирных кислот к частицам корма в рубце усиливает биогидрогенизацию, тогда как прикрепление к частицам бактерий её ослабляет; бактерии накапливают непредельные жирные кислоты и защищают их от биогидрогенизации. На скорость биогидрогенизации влияют многие факторы; поскольку биогидрогенизации в рубце подвергаются только свободные жирные кислоты, скорость биогидрогенизации зависит от скорости липолиза в рубце. Скорость биогидрогенизации повышается с увеличением степени ненасыщенности кислот; линолевая и линоленовая кислоты гидрогенизуются на 70-95 и на 85-100%, соответственно. Уровень (степень) гидрогенизации снижается на рационах с высокой долей концентратов, что может быть следствием торможения липолиза при низком pH рубцовой жидкости. Избыток незащищённых непредельных жирных кислот в рубце также угнетает биогидрогенизацию (Allen, 2000). Другие факторы, которые снижают липолиз и биогидрогенизацию, играют важную роль в усвоении и использовании жирных кислот в организме коров. Сюда можно отнести и старение растений, и степень измельчения грубых кормов (Buccioni et al., 2012).

Более 60% свободных жирных кислот, присутствующих в рубце, абсорбируется на поверхности частиц корма. Простейшие также накапливают непредельные жирные кислоты, в т.ч. промежуточные продукты биогидрогенизации, такие как конъюгированная линолевая кислота и вакценовая кислота. Новейшие исследования показали, что полиненасыщенные жирные кислоты в составе сложных липидов, таких как фосфолипиды и эфиры холестерина, которыми богаты грубые корма, менее подвержены биогидрогенизации, по сравнению с жирными кислотами, входящими в состав триглицеролов семян и масел, получаемых из них (Lashkari et al., 2020).

Около 20% липидов, покидающих рубец, это липиды микробного происхождения; они составляют около 15 г/кг органического вещества у животных, не получавших жировые добавки (Jenkins, 1993); из них около 70% – это нейтральные липиды, синтезированные микроорганизмами. Ацетат и глюкоза используются в синтезе жирных кислот с чётным числом углеродных атомов, главным образом, C16:0 и C18:0, в соотношении 1:2; пропионат используется в синтезе жирных кислот с нечётным числом атомов углерода в молекуле (C13:0, C15:0 и C17:0). Свободные жирные кислоты также могут быть результатом гидролиза галактолипидов и фосфолипидов, катализируемого несколькими бактериальными галактозидазами и фосфолипазами (Jenkins, 1993).

Жировые добавки и потребление корма. Этот вопрос в литературе исследован наиболее широко, особенно из-за того, что на потребление влияют многие факторы, а сам уровень потребления кормов влияет на продуктивность животных. Наиболее обстоятельно эта тема освещена в обзоре (Allen, 2000). Установлено и подтверждено многими исследованиями положительное влияние жиров, добавляемых к рационам с низким содержанием липидов (Allen, 2000; NRC, 2001). Показано, что повышение содержания жира в рационе до 3% в сухом веществе стимулирует потребление корма, тогда как дальнейшее повышение тормозит потребление (NRC, 2001). Чаще всего снижение потребления корма связывают со снижением переваримости сухого вещества. Наибольшее влияние на потребление, и переваримость оказывает введение в рацион непредельных жирных кислот, причём депрессия потребления и переваримости в опытах была тем сильнее, чем больше потребляли животные непредельных липидов и чем сильнее была степень ненасыщенности кислот.

Влияние липидных подкормок на потребление корма зависит от стадии лактации (Weisbjerg et al., 2008), структуры рациона (Ueda et al., 2008; Weiss, Pinos-Rodrigues, 2009) и уровня продуктивности (Sears et al., 2024). Влияние жировых добавок на потребление при различной структуре рациона показано в опытах, в которых добавки рыбьего жира и подсолнечного масла приводили к снижению потребления сухого вещества и суточных удоев только при высокой доле концентратов в рационе (Bernard et al., 2017). Установлено, что триглицеролы гидролизуются быстрее сложных липидов, причем ТГ, содержащие непредельные жирные кислоты, гидролизуются быстрее ТГ, содержащих насыщенные ЖК. По мере гидролиза, свободные непредельные жирные кислоты подвергаются биогидрогенизации путём присоединения водорода по месту двойных связей в углеродной цепи.

Другие факторы. Жировые добавки оказывают положительное влияние на продуктивность молочных коров, что наблюдали при использовании непредельных жирных кислот, защищённых от воздействия микроорганизмов в рубце (Palmquist, Jenkins, 2017; Loften et al., 2014). В зависимости от состава основного рациона, скармливание подкормок может происходить на фоне как избытка, так и дефицита незаменимых (полиеновых) жирных кислот. Особенно негативные последствия, как для организма коровы в целом, так и для микробиоты рубца, могут наблюдаться при дефиците жирных кислот в рационе (McDonald et al., 2010).

В практических рекомендациях по использованию жировых добавок отмечен ряд особенностей физиологического действия индивидуальных жирных кислот (Kirkland, 2018).

Пальмитиновая (C16:0, содержится в пальмовом масле, животных жирах). Индуцирует проявление синдрома резистентности к инсулину и перераспределение метаболических потоков на биосинтез молока в период с середины до поздних стадий лактации, стимулирует продукцию молочного жира.

Стеариновая (C18:0) наиболее распространена в животных жирах и молоке. Снижает переваримость жирных кислот. В рационы вводят в сочетании с пальмитиновой кислотой (в меньших пропорциях).

Олеиновая кислота (C18:1). Одна из главных в количественном отношении жирная кислота в животных жирах и молочном жире. Повышает переваримость общего жира рациона. Стимулирует секрецию инсулина, распределяет питательные вещества и энергию в организме в сторону повышения упитанности, стимулирует функцию воспроизводства.

Линолевая кислота (C18:2 (омега-6)). Индуцирует отёл, хотя при высоком уровне может ослаблять плодовитость путём стимуляции образования простагландина (PGF_{2a}). Содержится в относительно больших количествах в грубых кормах и во многих добавках; потребности коров в линолевой кислоте относительно невелики. Разрушается при хранении.

Линоленовая кислота (C18:3, омега-3). Снижает образование простагландина (PGF_{2a}) для поддержания жёлтого тела в яичнике и синтез прогестерона, повышения жизнеспособности плода и стимуляции плодовитости. Часто содержится в недостаточных количествах в рационах коров, особенно в рационах с низкой долей зелёных кормов. Особенно полезны, эффективны и желательны добавки в ранние стадии лактации и стельности для поддержания жизнеспособности и развития эмбриона.

Цель данного исследования - изучить влияние жировых добавок различного происхождения, в т.ч. защищённых от воздействия рубцовых микроорганизмов, на потребление и переваримость кормов, показатели метаболизма в рубце, удои, продукцию и жирнокислотный состав молочного жира.

Материал и методы

Влияние жировых добавок на потребление корма, переваримость питательных веществ, показатели рубцового пищеварения, молочную продуктивность и состав липидов молока изучали методом групп-периодов в серии опытов, проведенных на коровах холмогорской породы средней продуктивности (5 тыс. кг за 305 дней лактации) при использовании рационов с разным соотношением химических компонентов корма. Основной опыт (опыт 1) проведен на спаде лактации (пятый-шестой месяцы лактации к началу опыта) на двух группах (гр) нестельных коров (гр 1.1 и гр 1.2, $n=3$), получавших рационы с разным соотношением химических компонентов рациона по трём периодам (пр) продолжительностью 30 дней (табл. 1): **гр 1.1:** пр 1: основной рацион (ОР.1, К 1) со сбалансированным соотношением грубых, концентрированных кормов и липидов; пр 2: ОР.1. с добавкой свиного кормового жира (ОР.1+Ж); пр 3: жир-депрессирующий рацион с повышенным содержанием крахмалистых кормов (ЖдпР); **гр 1.2:** пр 1: (ОР.2, К2); пр 2: рацион с низким содержанием сырого жира, с добавкой сухого свекловичного жома (НСЖ); пр 3: НСЖ с добавкой свиного кормового жира (НСЖ+Ж). Коров приучали к потреблению жира в течение двух недель (начиная со 100 г в сутки и до 370 г на голову в сутки). Жир скармливали в смеси с концентратами, с той же кратностью, что и концентраты). Данные по источнику жира и его жирнокислотному составу приведены в табл 7.

Содержание питательных веществ в рационах, за исключением липидов и сырой клетчатки, (табл. 1) соответствовало рекомендуемому по нормам (Калашников и др. 2003). В последнюю неделю каждого периода проводили отбор проб крови, рубцового содержимого и определение переваримости питательных веществ. Химический состав кормов определяли общепринятыми методами по схеме зооанализа (Косолапов и др. Методы анализа кормов. М., 2011, 2011).

Таблица 1. Состав и питательность рационов по группам коров и периодам в опыте 1.

Корма, кг	Группа 1 (n=3)			Группа 2 (n=3)		
	Рационы, по периодам опыта, все корма в натуральном весе, кг					
	ОР.1, К1	ОР.1+Ж	ЖдпР	ОР.2, К2	НСЖ	НСЖ+Ж
Суточный удой, кг	18,0	18,0	16,0*	14,0	14,0	14,0
Силос горохо-овсяный	21,0	21,0	-	20,0	2,0	-
Силос кукурузный	-	-	5,0	-	-	4,0
Сено злаковых трав	4,4	4,5	1,0	3,5	6,0	6,0
Свекла кормовая	11,0	11,0	2,5	10,0	6,0	3,5
Дерть пшеничная	3,0	2,6	6,8	2,6	2,8	2,8
Дерть ячменная	1,9	1,9	3,8	1,6	-	-
Шрот подсолнечный	0,8	0,8	-	0,8	1,3	1,2
Жом свекольный	-	-	-	-	5,0	5,0
Жир свиной, кормовой	-	0,3	-	-	-	0,45
Витаминно-минер. добавки	0,1	0,1		0,1	0,1	0,1
В рационе содержится						
Обменная энергия, МДж	149	156	129	132	142	152
Сухое вещество, кг	15,2	15,2	11	13,4	14,2	14,7
Сырой протеина, г	2107	2054	1571	1890	1890	1857
Сырая клетчатка, г	3215	3208	942	2859	2797	2991
Сырой жир, г	439	730	308	398	249	734

Примечания: ОР - основной рацион, контроль; ОР+Ж – контрольный рацион с добавкой жира; Ждп – жир-депрессирующий рацион; НСЖ – рацион с низким содержанием сырого жира * Здесь и далее в таблицах: $P<0.05$ по t -критерию при сравнении с контролем (К).

Опыт 2 был проведен на двух группах коров средней продуктивности ($n=4$, табл. 2), начиная с первого месяца лактации. Опыт состоял из трёх периодов, одного установочного и двух учётных, длительностью по 30 дней каждый (табл. 3). Коров приучали к потреблению добавки говяжьего жира (370 г на голову в сутки) в течение двух недель (начиная со 100 г в сутки и до 370 г на голову в сутки). Добавку жира скармливали в смеси с концентратами, с той же кратностью, что и концентраты. Данные по составу и питательности рационов в опыте 2 приведены в табл. 4. Используемый в этом опыте говяжий жир был представлен, преимущественно, насыщенными и моноеновыми кислотами C18 и C16.

Таблица 2. Характеристика групп коров в опыте 2*.

Группы ($n=4$)	Возраст, № лактации	Продуктивность за 305 дней предшествующей лактации		Живая масса к началу опыта, кг
		Удой, кг	Жир, кг	
2.1	6,8±0,5	5426±432	208±17	596±16
2.2	4,8±1,1	4909±226	188±10	550±38

Примечание: * в этом и в последующих опытах межгрупповые различия по продуктивности, живой массе и возрасту в лактациях статистически незначимые ($P>0,5$).

Таблица 3. Схема опыта 2.

Группы	Периоды опыта		
	Установочный	Учётный Рационы	Учётный*
2.1 $n=4$	ОР	ОР	ОР
2.2 ($n=4$)	ОР	ОР+Ж	ОР+Ж

Примечание: *второй учётный период введен для оценки времени, необходимого для адаптации к отмене введения добавки жира (Овсянников, 1976).

Таблица 4. Состав и питательность рациона в опыте 2.

Корма, в натуральном виде	При суточном удое 20 кг
Силос кукурузный, кг	15,5
Сенаж злаковых трав, кг	8,7
Свекла кормовая, кг	16,5
Картофель, кг	3,2
Дерть зерносмеси, кг	4,8
Шрот подсолнечный, кг	1,3
Витамины и микроэлементы, кг	0,1
Показатели питательности	В рационе содержится
Обменная энергия, МДж	159,3
Сухое вещество, кг	17,1
Сырая клетчатка, г	3019
Сырой протеин, г	2034
Крахмал, г	3187
Сахар, г	1116
Сырой жир основного рациона, г	550

Опыт 3 был проведен в условиях хозяйства на трёх группах коров ($n=6$) с продуктивностью 4800-5200 кг за предшествующую лактацию, подобранных по принципу парных аналогов (табл. 5). В опыте регистрировали показатели продуктивности при

скармливании жировой добавки в виде смеси с казеинатом натрия, обработанной формальдегидом для защиты от воздействия микроорганизмов в рубце (табл. 6).

Во всех трёх опытах в последнюю неделю каждого периода на животных проводили взятие проб крови и рубцового содержимого и определяли переваримость питательных веществ по схеме зооанализа (Косолапов и др., 2011). Образцы молока отбирали еженедельно, а во время балансовых опытов – в каждое доение. Содержимое рубца, полученное через фистулу рубца или с помощью зонда, фильтровали через 8 слоёв марли, центрифугировали в течение 40 мин при 2500 g, консервировали одной каплей хлороформом и ставили на лёд для остановки процессов брожения, после чего в центрифужную пробирку отмеривали 5 мл фильтрата, вносили в него 1 мл свежеприготовленного 25 % раствора метафосфорной кислоты, 0,1 мл муравьиной кислоты, перемешивали, центрифугировали при том же режиме, отбирали аликвоту 2 мл надосадочной жидкости, добавляли к ней 0,2-0,3 мл раствора бутанола (концентрация 3 г/л) в качестве внутреннего стандарта.

Таблица 5. Характеристика групп коров в опыте 3.

Группы	n	Возраст (№ лактации)	Продуктивность за 305 дней предыдущей лактации, кг		Живая масса, кг	Упитан- ность к отёлу, балл
			Удой	Жир		
3.1	6	4,0±0,4	4931±412	178±15	555±9	3,7±0,2
3.2	6	4,1±0,4	4772±118	178±11	563±11	3,9±0,2
3.3	6	3,7±0,3	5190±199	205±11	590±34	3,9±0,4

Таблица 6. Состав и питательность рационов по группам в опыте 3.

Корма	Группы		
	3.1	3.2	3.3
Корма, натуральный вес, кг			
Силос кукурузный	18,0	18,0	18,0
Сенаж злаковых трав	8,0	8,0	8,0
Сено или сенная резка злаковых трав	3,0	3,0	3,0
Свекла кормовая	15,0	15,0	15,0
Патока	1,5	1,5	1,5
Комбикорм*	10,0	9,3	8,5
Жмых подсолнечный	-	1,7	0,7
Жир-казеинатная смесь**	-	-	3,5
Витаминно-минеральная смесь	0,1	0,1	0,1
В рационе содержится:			
Обменной энергии, МДж	209	209	229
Сухого вещества, кг	20,2	20,2	20,5
Переваримого протеина, г	2010	2277	2300
Доступного белка, г***	1478	1565	1642
Сырой клетчатки, г	3970	4100	4060
Сырого жира, г	584	662	1270
Витаминов и минеральных веществ	В пределах нормы		

Примечания: *состав комбикорма (в % по массе): 28 – шрот подсолнечный, 35 – зерно кукурузы, 24 – ячменя, 20 – отруб пшеничные, 2 – премикс МК-3, 1 – соль поваренная; **жир-казеинатная смесь, в 1 кг: 200 г костного говяжьего жира, 100 г казеината натрия и 1,5 г формальдегида; ***рассчитано по: (Курилов и др., 1989).

Полученную пробу в количестве 2-10 мкл вводили в хроматограф с колонкой из нержавеющей стали или стекла, длиной 180-250 см, внутренним диаметром 3,0-3,5 мм, заполненной полидиэтиленгликоль-янтаратом на хроматоне N-AW в соотношении (10-15)/90-85) между жидкой и твердой фазами, с добавлением 1-1,5 % ортофосфорной кислоты. Температура колонки – в пределах 110-115°C. Калибровку проводили по смеси растворов химически чистых летучих жирных кислот и бутанола.

Во всех опытах проводили анализ жирнокислотного состава липидов молока. После экстрагирования липидов по (Folch et al., 1951) проводили переэтерификацию по (Christopherson, Glass, 1969). Метилвые эфиры жирных кислот разделяли на хроматографе чешского производства «Хром-5», снабжённом стеклянной колонкой внутренним диаметром 3,0 мм, длиной 400 см, заполненной полидиэтиленгликоль-янтаратом на хроматоне N-AW 80-100 меш (соотношение по массе между жидкой и твердой фазами от 8:92 до 12:88). Температура колонки – 180°C, камеры ввода проб – на 20-30 °C выше. Детектор – пламенно-ионизационный. Отношение масс отдельных жирных кислот рассчитывали, исходя из площади соответствующих пиков по (Shehata et al., 1970); площади пиков рассчитывали по высоте и времени удерживания (Берчфилд, Сторрс, 1964). Жирные кислоты идентифицировали по относительному времени удерживания или с помощью предложенного нами устройства (Овчаренко Э.В., Симоненко П.Н., авт. св. № 1453319, СССР, 1988).

Результаты и обсуждение

В табл. 7 приведены результаты хроматографического анализа состава жировых добавок. Полученные результаты, в основном, согласуются с данными других авторов (Архипов, 2007; Рудаков и др., 2005). Различия между свиным и говяжьим жиром по жирнокислотному составу оказались сравнительно небольшими, однако, содержание миристиновой кислоты (C14:0) в говяьем жире было в три раза больше по сравнению со свиным, и в два раза больше по сравнению с говяжьим костным жиром. Наиболее высокая доля олеиновой кислоты (18:1) содержалась в говяьем костном жире. Миристиновая кислота оказывает существенное влияние на метаболизм в рубце (см. ниже). Не меньшее влияние на рубцовое пищеварение и на липидный обмен во всём организме оказывают непредельные жирные кислоты; данные по их содержанию в жировых подкормках и в рационе приведены в табл. 7 и 8. Важно, что непредельные жирные кислоты оказались в количественном отношении доминирующими, составляя около двух третей от общего содержания жирных кислот, а различия между свиным и говяжьим жиром были сравнительно небольшими.

По сравнению с моногастричными, жвачные животные получают с кормами относительно небольшое количество липидов. В условиях практики рационы высокопродуктивных коров содержат до 6% липидов (в расчёте на сухое вещество), из которых около 3% приходится на грубые корма и концентраты, а остальные – на кормовые добавки. Кроме того, следует учитывать, что липиды грубых кормов – это, в основном, гликолипиды и фосфолипиды, в которых содержание жирных кислот относительно низкое (около 50% от суммы липидов), тогда как липиды концентратов, в основном, состоят из триглицеролов (до 80-90% ТГ представлены жирными кислотами) (Palmquist a. Jenkins, 2017). Самая высокая доля непредельных жирных кислот в сумме жирных кислот рациона имела место в рационе с низким содержанием сырого жира, а самая низкая – в контрольном рационе группы 1 (табл. 8). Сила и направленность влияния жировых добавок на потребление сухого вещества зависят и от стадии лактации. Снижение потребления сухого вещества под влиянием жировых подкормок менее выражено в ранние стадии лактации и в длительных опытах, по сравнению с данными, получаемыми на пике лактации и в кратковременных опытах (Chilliard, 1993).

Важно учитывать, что степень влияния на процессы питания и на метаболизм зависит не только от содержания жирных кислот в рационе, но и от эффективности их усвоения (переваривания), а также от состава и степени гидрогенизации кислот. По данным многих авторов, их переваримость находится в параболической зависимости от массы добавок: при увеличении добавок с 0 до 3% переваримость повышается, а при дальнейшем повышении переваримость снижается (NRC, 2001).

Таблица 7. Жирнокислотный состав жировых добавок, % к суммарному содержанию жирных кислот (по массе).

№№ опытов	Источник жира	Коды жирных кислот						
		14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	Прочие*
1	Свиной	1,05	27,30	21,90	34,20	5,11	3,33	7,11
2	Говяжий	3,15	26,20	22,60	35,82	4,33	2,51	5,39
3	Костный говяжий	1,52	21,65	10,81	48,90	8,82	1,94	6,36

* Отдельные кислоты и группы минорных кислот: пальмитоолеиновая, кислоты с нечётным числом углеродных атомов и с разветвлённой углеродной цепью.

Эффективность усвоения жирных кислот в опыте 1 зависела от их содержания в рационе; наиболее высокая переваримость имела место при повышенном содержании ЖК в рационе, что, возможно, было следствием снижения доли их эндогенных потерь с калом (NRC, 2001). В литературе есть указания, что ТГ (из которых, в основном, и состояли добавки), перевариваются у коров более эффективно, по сравнению со сложными (полярные) липидами (глицолипиды, эфиры холестерина, фосфолипиды) (Bionaz, et al., 2020; Lashkari et al., 2020). Добавка животных жиров не оказала существенного влияния на соотношение предельными и непредельными кислот, и практически две трети жирных кислот оказались непредельными во всех рационах, хотя содержание полиеновых кислот в добавках было небольшим (табл. 7),

Было изучено влияние подкормок на потребление и переваримость сухого вещества рациона (табл. 9). В этом исследовании была поставлена задача изучить влияние на потребление и переваримость питательных веществ эффектов последствия 30-дневного скормливания жировых добавок (гр. 2.1) за счёт удлинения времени адаптации к повышенному содержанию сырого жира в рационе группы 2.2). Поэтому опыт в гр. 2. был представлен двумя периодами по 60 дней.

Таблица 8. Содержание в рационах сырого жира, ненасыщенных и насыщенных жирных кислот, их потребление (г/сут) и переваримость (%) сырого жира в опыте 1.

Группы, периоды	Рационы	Жирные кислоты, г			Потреблено, г	Сырой жир	
		Непредельные	Предельные	Всего		Переварилось, г	Переваримость, %
1. 1	ОР.1, К1	190	108	298	372	244	68,0
1.2	ОР.1+Ж	347*	199*	546*	631*	533*	84,0*
1.3	ЖдпР	145	75	220	201*	146*	72,6
2. 1	ОР.2, К2	171	94	267	337	231	68,5
2. 2	НСЖ	121	57	178	214	123	58,1
2. 3	НСЖ +Ж	365	196	561	637	471	73,8

Обозначения: К – контроль, Ждп – жир депрессирующий рацион, НСЖ – рацион с низким содержанием сырого жира, Ж – добавка жира.

В группе 1.1 наблюдалась тенденция к снижению потребления и переваримости сухого вещества (СВ), и в большей мере – потребления и переваримости сырой клетчатки (переваримость сырой клетчатки снизилась на 14% ($P<0,05$) при переводе коров с контрольного на рацион с добавками жира. При содержании на жир-депрессирующем рационе потребление СВ снизилось по сравнению с контролем на 24%. Хотя переваримость сухого вещества жир-депрессирующего рациона была выше, чем в контроле ($P<0,05$, что объясняется повышенным содержанием концентратов в рационе; потребление клетчатки снизилось по той же причине.

В группе 1.2 перевод коров со стандартного (контрольного) на рацион с низким содержанием сырого жира (НСЖ) показатели потребления и переваримости сухого вещества почти не изменились (исключение составило снижение потребления и переваримости сырого жира, $P<0,05$), тогда как добавка жира к низколипидному рациону сопровождалась незначительным снижением потребления корма на фоне более выраженного повышения переваримости сырого жира ($P<0,05$) и клетчатки ($P<0,05$) (табл. 9).

Переваримость сырого жира находилась положительно коррелировала с количеством и химическим составом потребляемого жира. Так, самые высокие показатели переваримости были на рационе (ОР.1+Ж) и на рационе (НСЖ+Ж) (табл. 9). По литературным данным, переваримость добавленных жирных кислот в составе ТГ. как правило, выше, чем липидов в составе грубого корма (Bionaz et al., 2020; Lashkari et al., 2020).

Таблица 9. Потребление (кг/сутки) и переваримость (%) сухого вещества, сырого жира и клетчатки в опытах 1 и 2.

Группы, периоды	Рационы	Сухое вещество		Сырой жир		Сырая клетчатка	
		Потребление, кг	Переваримость, %	Потребление, кг	Переваримость, %	Потребление, кг	Переваримость, %
1.1 (n=3)	ОР.1, К1	14,4	70,8	0,37	68,0	2,55	53,8
	ОР.1+Ж	13,8	70,4	0,63*	84,0*	2,14	46,4*
	ЖдпР	11,0	76,7	0,32	72,6	0,57*	–
1.2 (n=3)	ОР.2, К2	13,2	72,7	0,34	68,7	2,44	59,7
	НСЖ	13,5	71,9	0,21	58,1	2,59	59,2
	НСЖ +Ж	12,7	72,6	0,64*	73,8	2,10	62,5
2.1 (n=4)	ОР.2, К2	15,9	–	0,47	–	2,35	–
	ОР.2, К2+Ж	15,4	72,4	0,79	78,9	2,82	59,9
	НСЖ +Ж	15,7	74,7	0,58	87,5	2,51	63,9
2.2 (n=4)	ОР.2, К2	15,5	–	0,50	–	2,40	–
	ОР.2, К2+Ж	15,1	70,9	0,88	82,2	2,77	58,1
	ОР.2, К2+Ж	17,2	74,2	0,98	88,8	2,58	60,0
3.1(n=4)	К	19,9	70,6	0,58	69,1	3,40	59,7
3.2(n=4)	К+ЗЖ	20,3	70,9	1,27*	71,6	3,40	59,9

Примечания: «–» – не определяли. Обозначения: К – контрольный (стандартный) рацион; Ж – жир (СК – свиной кормовой; Г – говяжий); ЖдпР – жир-депрессирующий рацион, НСЖ – рацион с низким содержанием сырого жира, Ж – добавка жира, ЗЖ – жир, защищенный от действия микроорганизмов в рубце. * $P<0,05$, по t - критерию при сравнении с контролем для этого периода.

По данным (Allen, 2000), потребление сухого вещества снижается примерно на 2,5% на каждую процентную единицу добавляемых кальциевых солей жирных кислот выше контроля. Когда добавки не превышают 3% от сухого вещества рациона, насыщенные жиры не влияют на потребление СВ (NRC, 2001).

Использованные в проведенных опытах рационы (и с жировыми добавками, и без них) содержали относительно мало полиненасыщенных (полиеновых) кислот, но преобладали мононенасыщенные и, хотя полиеновых кислот в добавках было сравнительно мало, введение их в рацион в большинстве случаев сопровождалось снижением потребления и переваримости СВ и клетчатки. Об отрицательном влиянии жировых добавок на потребление корма у коров известно сравнительно давно (Chilliard, 1993; NRC, 2001). Считается, что гипофагическое действие жира обусловлено двумя причинными факторами: а) угнетение рубцовой ферментации клетчатки и б) стимулирование секреции кишечных гормонов (Allen, 2000; NRC, 2001).

В опыте 2 не наблюдалось существенных изменений по потреблению и переваримости сухого вещества и сырой клетчатки (в связи с включением в рацион и исключением жировой добавки по периодам опыта). В этом опыте коровы группы 2.2 потребляли рацион с добавками жира в течение двух месяцев. В конце второго месяца скормливания жировой добавки потребление сухого вещества было выше как по сравнению с первым (установочным, контрольным) месяцем ($P < 0,05$), так и по сравнению с первым месяцем потребления рациона с добавкой ($P < 0,05$). На основе результатов этого опыта, можно предполагать, что для более полной адаптации к рационам с жировыми добавками коровам требуется длительность периода наблюдения около двух месяцев.

Показатели рубцового брожения. Наиболее высокая концентрация ЛЖК в рубцовой жидкости имела место при скормливании контрольного рациона. Как очень высокое, так и низкое содержание липидов в рационе приводило к снижению образования ЛЖК (табл. 10). Тем не менее, при анализе полученных данных о различиях по содержанию ЛЖК между группами и периодами опыта выявлено, что самая высокая концентрация и самая высокая молярная доля ацетата имели место на контрольном рационе, тогда как при пониженном и повышенном содержании липидов в рационе наблюдалось снижение концентрации и молярной доли ацетата и повышение уровня пропионата.

Таблица 10. Концентрация и соотношение ЛЖК в рубцовой жидкости при разном содержании липидов и клетчатки в рационе

Группы, периоды	Рационы	Уксусная	Пропионовая	Изомасляная	Масляная	Изовалериановая	Валериановая	Всего
Концентрация, ммоль/100 мл								
1.1	ОР.1, К1	5,11	1,70	0,15	1,21	0,22	0,20	8,59
	ОР.1+Ж	3,47	1,32	0,12	1,00	0,20	0,20	6,31
	ЖдпР	4,67	4,06***	0,13	1,20	0,18	0,33	10,64
1.2	ОР.2, К2	5,09	1,75	0,15	1,19	0,22	0,20	8,60
	НСЖ	3,80	1,49	0,13	0,76*	0,17	0,16*	6,51
	НСЖ +Ж	4,68	1,70	0,10	1,10	0,04*	0,09	7,71
Молярный процент в сумме ЛЖК								
1.1	ОР.1, К1	59,4	19,6	1,8	14,2	2,7	2,3	100,0
	ОР.1+Ж	55,1	20,9	2,0	15,8	3,1	3,2	100,0
	ЖдпР	43,9	38,0/	1,3	12,2	1,6	3,0	100,0
1.2	ОР.2, К2	59,2	20,4	1,7	13,8	2,6	2,3	100,0
	НСЖ	58,2	22,8	2,1	12,9	2,5	2,5	100,0
	НСЖ +Ж	59,3	21,6	1,3	14,0	1,9	1,9	100,0

Примечание: * $P < 0,05$ и *** $P < 0,001$ по t - критерию при сравнении с контролем для этого периода.

Эту закономерность можно объяснять тем, что даже при низкой концентрации в рубцовой жидкости, отдельные жирные кислоты (особенно полиненасыщенные) могут снижать переваривание клетчатки (Palmquist, Jenkins, 2017), а это может отражаться на концентрации и соотношении летучих жирных кислот в рубце. В наших опытах добавки свиного жира к контрольному рациону снизили концентрацию и молярную долю ацетата в сумме ЛЖК; однако скормливание рациона НСЖ также отрицательно сказалось на продукции уксусной кислоты в рубце (табл. 10). Добавка же жира к рациону НСЖ (группа 1.2) восстанавливала продукцию ЛЖК, хотя и до уровня, несколько более низкого, чем это имело место на контрольном рационе. Практически во всех вариантах опытов жировые добавки снижали отношение ацетат/пропионат в рубцовой жидкости.

Наиболее выраженные изменения в показателях рубцового пищеварения наблюдались при скормливании жир-депрессорирующего рациона (табл. 10). Концентрация пропионата повысилась на 139% ($P < 0,001$), валериановой кислоты – на 65% ($P < 0,05$), концентрация уксусной кислоты снижалась незначительно. Взаимосвязь между концентрацией ацетата и массовой долей жира в молоке практически отсутствовала, тогда как корреляция между массовой долей жира в молоке и содержанием пропионата в рубцовой жидкости существенная отрицательная ($P < 0,01$, $n=69$).

Возможны два механизма влияния жировых подкормок на жирномолочность. Во-первых, они угнетают сбраживание углеводов, в особенности клетчатки, снижая образование уксусной кислоты – основного субстрата липогенеза в молочной железе; во-вторых, тормозят липогенез из низкомолекулярных предшественников (ацетата и бутирата). Примерно половина массы молочного жира коров в норме представлена длинноцепочечными жирными кислотами, поступающими из пищеварительного тракта. При положительном балансе энергии жировая ткань принимает весьма слабое участие в обеспечении молочной железы жирными кислотами для синтеза ТГ молочного жира. Поэтому львиная доля длинноцепочечных жирных кислот, включаемых в ТГ молочного жира, имеет кормовое происхождение. Главные в количественном отношении жирные кислоты в липидах молока – пальмитиновая, пальмитоолеиновая, стеариновая и олеиновая. Сумма стеариновой и олеиновой кислот положительно коррелирует с массовой долей жира в молоке ($r = 0,57$, $P < 0,01$, $n=170$).

Липиды, содержащиеся в кормах, в небольшой мере гидролизуются уже в процессе уборки под действием липаз, содержащихся в растениях, а в результате пережёвывания и поступления корма в рубец, они подвергаются гидролизу микробиальными липазами. Установлено, что гидролиз сложных липидов (фосфолипидов, гликолипидов, эфиров холестерина) происходит гораздо медленнее, чем гидролиз ТГ (Bionaz, et al., 2020; Lashkari et al., 2020). Эта особенность способствует сбережению полиненасыщенных кислот, которые преобладают с большим перевесом в полярных липидах. По мере гидролиза, свободные непредельные жирные кислоты подвергаются биогидрогенизации путём присоединения водорода по месту двойных связей в углеродной цепи.

В результате биогидрогенизации в качестве конечных продуктов образуются не только насыщенные кислоты (стеариновая и пальмитиновая), но и промежуточные продукты (главным образом, транс-изомеры моноеновых кислот, а также конъюгированные изомеры диеновых кислот); при этом степень гидрогенизации ненасыщенных защищённых жирных кислот (например, в виде кальциевых солей жирных кислот) составляет всего 30-40% (NRC, 2001). Часть полиеновых кислот (даже незащищённых) избегает гидрогенизации в рубце. Около 20% липидов, покидающих рубец, имеют микробное происхождение; микробный синтез липидов в рубце составляет около 15 г/кг органического вещества у животных, не получающих липидные добавки (Jenkins, 1993). Из них около 20% составляют нейтральные

липиды, главным образом, C16:0 и C18:0, в соотношении 1:2, а также небольшое количество насыщенных жирных кислот с нечётным числом углеродных атомов (продукты микробного синтеза в рубце), диеновые кислоты с конъюгированными двойными связями и транс-изомеры моноеновых кислот (промежуточные продукты биогидрогенизации (Bauman, Griinari 2003; Bionaz et al., 2020).

О негативном влиянии непредельных жирных кислот на микрофлору рубца известно давно более (Palmquist, Jenkins, 1980), однако лишь сравнительно недавно показано, что ингибирующее влияние возрастает с повышением степени ненасыщенности жирных кислот. Добавка к рациону коз льняного масла, содержащего большое количество полиеновых кислот, существенно снижает биоразнообразие микробиоты (Enjalbert et al., 2017). Учитывая отрицательное влияние непредельных жирных кислот на микрофлору рубца, было высказано предположение, что биогидрогенизация является главным средством снижения токсичности для микрофлоры рубца непредельных жирных кислот (Bionaz et al., 2020; Enjalbert et al., 2017).

Следует, однако, учитывать, что и насыщенные жирные кислоты могут быть токсичными для бактерий рубца. Например, было показано, что пальмитиновая и стеариновая кислоты токсичны, но только для *Prevotella ruminicola* и некоторых штаммов *Butyrivibrio fibrisolvens*, но токсичность их (этих кислот) ниже, чем олеиновой кислоты (Enjalbert et al., 2017). Учитывая широкое применение пальмового масла в качестве кормовой добавки, были проведены опыты с введением его в рационы как в виде смеси ТГ, так и в качестве источника незатерифицированных жирных кислот. Добавки кукурузного масла в возрастающих количествах (0,0; 0,7; 1,4 и 2,8% от сухого вещества) приводили к снижению потребления СВ, удоя, процентного содержания и продукции молочного жира (Boerman et al., 2014). Тем не менее, было показано, что добавки, содержащие пальмитиновую кислоту (при введении жира в умеренных дозах – не выше 3% от СВ), не только не снижают переваримость, но, наоборот, приводят к росту переваримости сухого и органического вещества и клетчатки (de Souza, Lock., 2019; Enjalbert et al., 2017; Piantoni et al., 2013). В недавних исследованиях *in vitro* (Sears et al., 2023) наблюдали ускорение роста культуры целлюлозолитических микроорганизмов при добавлении в среду пальмитиновой кислоты и замедление роста – при добавлении олеиновой. Известны и другие исследования свойств пальмового масла, в которых проявились ингибирующее действие среднецепочечных жирных кислот (как известно, пальмовое масло содержит значительное количество таких кислот) (Ghani et al., 2017)..

Уксусная кислота является главным продуктом ферментации углеводов в рубце и окисления в тканях организма (в цикле Кребса), источником энергии и главным источником атомов углерода в синтезе жирных кислот. В более ранних исследованиях показана зависимость скорости образования ацетата в рубце и содержания жира в молоке от концентрации ацетата в рубцовой жидкости (Sutton et al., 1988). Тем не менее, в более поздних исследованиях было выяснено, что дефицит ацетата в рубце не является главной причиной снижения жирномолочности (Bauman, Griinary, 2003).

В проведенных опытах не выявлено существенной взаимосвязи между концентрацией ацетата в рубцовом содержимом и концентрацией жира в молоке. В опыте 1 (табл. 10) при скармливании жир-депреиссирующих рационов концентрация уксусной кислоты в рубцовой жидкости незначительно снизилась, концентрация пропионата в рубцовом содержимом повысилась на 140% ($P < 0,01$), тогда как содержание жира в молоке снизилось в среднем на 34%. Таким образом, снижение жирномолочности вследствие дефицита ацетата в рубце, если и имело место, то весьма незначительное, по сравнению со снижением синтеза жирных кислот в молочной железе *de novo*. По современным воззрениям, главной причиной снижения жирномолочности при высококонцентратном кормлении

является угнетение синтеза жирных кислот в молочной железе под влиянием промежуточных продуктов гидрогенизации в рубце непредельных жирных кислот (Bauman, Griinari, 2003).

Феномен снижения жирномолочности можно рассматривать как следствие двух процессов. Во-первых, при высокой доле концентратов сбраживание углеводов в рубце происходит быстрее, что приводит к повышению концентрации ЛЖК в рубцовой жидкости, снижению pH и, как следствие, к ослаблению целлюлозолитической активности (Bauman, Griinari, 2003), снижению гидрогенизации непредельных жирных кислот, накоплению промежуточных продуктов гидрогенизации, тормозящих липогенез в молочной железе. Повышение скорости образования пропионата, являющегося главным предшественником глюкозы в организме коров, может стимулировать глюконеогенез и сопровождаться некоторым ростом удоев (за счёт повышенного синтеза лактозы). Помимо этого, пропионат может стимулировать липогенез в жировой ткани (пропионат стимулирует секрецию инсулина, а из глюкозы образуется глицерофосфат, лимитирующий липогенез в жировой ткани, для которой характерна низкая активность глицерокиназы). Поэтому пропионат следует рассматривать не только как субстрат для синтеза глюкозы, но и как регулятор, усиливающий секрецию инсулина и липогенез в жировой ткани.

Таблица 11. Жирнокислотный состав молочного жира при разном содержании сырого жира в рационе, %.

Группы, периоды	Рационы	Коды жирных кислот						
		C6-C15	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	Прочие
1.1	ОР.1, К1	35,2	30,9	9,5	19,0	1,5	1,2	2,7
	ОР.1+Ж	25,4	30,0	12,8	22,9	2,2	0,9	4,9
	ЖдпР	23,2	29,2	10,1	25,2	4,3	1,1	6,9
1.2	ОР.2, К2	35,5	28,1	8,9	18,9	2,2	1,4	5,0
	НСЖ	34,7	31,3	8,2	17,3	2,3	1,3	4,9
	НСЖ +Ж	21,1	29,9	10,4	29,4	1,9	1,0	6,3
2.1 и	К	26,2	36,6	6,6	22,2	2,2	0,6	5,6
2.2*	НСЖ+Ж	22,8	33,7	8,6	24,8	2,8	0,7	6,5
3.1	К	25,	27,8	14,8	24,4	4,2	0,5	3,0
3.2	К+ЗЖ	22,5	26,2	16,7	28,3	3,7	0,5	2,5

Обозначения: * две группы, по два периода; К – контрольный рацион; НСЖ –рацион с низким содержанием сырого жира; ЗЖ – жир, защищенный от действия микроорганизмов в рубце.

В проведенных опытах наблюдалась тенденция к снижению отношения ацетат/пропионат в рубце при введении жировых добавок в рационы. Если считать непредельные жирные кислоты ингибиторами рубцовой ферментации, то можно заключить, что при определённых условиях (например, при дефиците жира в рационе) они могут выступать и стимулятором (по меньшей мере, по отношению к целлюлозолитической микрофлоре). В опыте 2 введение жира в рацион сопровождалось тенденцией к снижению суммарной концентрации ЛЖК в рубцовом содержимом (на 3%), тогда как отношение ацетат/пропионат снижалось на 9% (табл. 10).

Ранее было показано, что, основным фактором, вызывающим снижение потребления сухого вещества, является, скорее, длина углеродной цепи жирных кислот, чем степень их ненасыщенности (Bayat et al., 2018). Снижение молочной продуктивности при введении жировых добавок обычно связывают со снижением потребления сухого вещества. Особенно часто это наблюдается при скормливании большого количества непредельных жирных

кислот (Vargas-Bello-Peerez et al., 2019). Однако, когда количество жидких жиров (масел) не превышало 3% от СВ рациона, отрицательных последствий не наблюдали, что авторы связывали с отсутствием снижения потребления СВ (Castro et al., 2019).

Соотношение грубых и концентрированных кормов в рационе может влиять на выраженность влияния добавок жира на удои у коров (Palmquist, Jenkins, 2017). Добавление льняного масла в рацион в количестве 3% от СВ рациона уменьшало удои только при низком соотношении грубых и концентрированных кормов (35:65), но не при высоком их соотношении (65:35) (Ueda et al., 2003).

Содержание кислот C16 в рационе может оказывать влияние на синтез *de novo* жирных кислот с длиной углеродной цепи менее 16 и на соотношение синтезированных кислот (Bauman, Griinagy, 2003). Применение добавки C16:O с целью повышения жирности молока приводило к повышению содержанию пальмитата в молоке без изменения содержания короткоцепочечных жирных кислот (Dorea, Armentano, 2017).

В недавнем исследовании авторы, на основании большого массива собственных и литературных данных, пришли к выводу, что массовую долю жира в молоке можно прогнозировать по относительному содержанию в липидах молока длинноцепочечных жирных кислот (Daley et al., 2022). При анализе результатов трёх опытов, проведенных в нашем исследовании, выявлена положительная корреляция между содержанием в липидах молока жирных кислот C18:0+C18:1 и массовой долей жира в молоке ($r=0,57$, $P<0,01$, $n=170$). На первый взгляд, это противоречит распространённому мнению о том, что преформированные жирные кислоты имеют, главным образом, растительное происхождение; при положительном балансе энергии вклад жировой ткани в синтез жира молока не превышает 10% (Bauman, Griinagy, 2003), однако, в основе выявленной корреляция может быть проявление разных факторов.

Во-первых, следует учитывать, что спектр жирных кислот, синтезируемых в молочной железе (синтез *de novo*) из низкомолекулярных предшественников (ацетата, C2 и бутирата, C4), представлен кислотами C4-C15 и (частично) - кислотами C16. Количество синтезируемых в молочной железе кислот зависит от доступности субстратов; в проведенном исследовании эта зависимость оказалась очень слабой, о чём свидетельствует низкий коэффициент корреляции между концентрацией ацетата в рубцовой жидкости и массовой долей жира в молоке подопытных коров ($r=0,1$, $P>0,1$, $n=69$). Следовательно, можно предположить, что доступность ацетата в наших опытах не лимитировала синтез жирных кислот (точнее, синтез триглицеролов) молочного жира. С другой стороны, длинноцепочечные жирные кислоты, имеющие преимущественно кормовое происхождение, и составляющие около половины массы молочного жира, вносят решающий вклад в синтез жира молока при положительном балансе энергии и достаточно высоком содержании жира в рационе. При этом длинноцепочечные жирные кислоты влияют на синтез молочного жира или непосредственно, входя в состав ТГ молочного жира в таком же соотношении, как и в липидах корма, или опосредованно – угнетая липогенез *de novo* путём снижения активности ферментов липогенеза. Это было показано ранее в опытах, в которых инфузия в сычуг транс-10, цис-12 изомера линолевой кислоты в количестве 0,016% от сухого вещества рациона приводила к снижению синтеза молочного жира на 25% (Baumgard et al., 2001). В последующих исследованиях (Baumgard et al., 2002) было показано, что изомер транс-10, цис-12 C18:2 уменьшает содержание жира в молоке за счёт снижения активности ключевых ферментов липогенеза в молочной железе.

С другой стороны, повышение продуктивности может быть следствием повышения потребления и переваримости питательных веществ кормов. В опыте 2 коровы группы 2.2 потребляли рацион с жировой добавкой в течение двух месяцев, потребление и переваримость питательных веществ во 2-м месяце были повышены, как по сравнению с

контрольной группой, так и по сравнению с предшествующим периодом (табл. 9). В опыте 3 коровы в течение 4-х месяцев получали рационы, составленные по нормам ВИЖ (Калашников и др., 2003); в гр. 3.1 - на 14%, в гр. 3.2 на 14% выше нормы по протеину, а в гр. 3.3 выше норм по протеину и энергии (за счёт добавки жира к рациону, более подробно см. раздел Материалы и методы). Для большей объективности, продуктивность в группах коров сравнивали с продуктивностью за соответствующий период предшествующей лактации (табл. 12).

Таблица 12. Суточные удои и продукция молочного жира коров в опыте 3.

Группы, периоды	Лактация	Суточный удой, кг			Суточная продукция молочного жира, г		
		Дни лактации			Дни лактации		
		1-60	61-120	121-200	1-60	61-120	121-200
3.1	Предшествующая	22,5	21,3	18,6	796	754	718
3.1	Текущая	22,4	23,4	18,6	926	858	700
3.1	Разница	-0,1	+2,1	0,0	+136	+104	-18
3.2	Предшествующая	21,6	20,6	17,8	738	740	642
3.2	Текущая	23,2	22,4	17,8	946	814	650
3.2	Разница	+1,6	+1,8	0,0	+208	+74	+8
3.3	Предшествующая	23,0	21,4	20,7	847	823	848
3.3	Текущая	25,1	25,1	19,6	1080	966	756
3,3	Разница	+2,1*	+3,7	-1,1	+233*	+143*	-92

Примечание: * $P < 0.05$ по t – критерию при сравнении с предшествующей лактацией.

Коровы всех трёх групп в период текущей лактации имели более высокие показатели продуктивности по сравнению с предшествующей лактацией, однако, существенные различия по сравнению с предшествующей лактацией имели место только в группе 3.3, при потреблении рациона с повышенным содержанием протеина и энергии за счёт добавки жира, защищённого от воздействия в рубце (суточные удои на 9 и 17% в первые два и последующие два месяца лактации, соответственно. Показатели продукции молочного жира за текущую лактацию (гр. 3.3) отличались от таковых в предшествующую лактацию более существенно (27 и 17%, $P < 0,02$ и $P < 0,05$ соответственно в первые два и последующие два месяца лактации. Однако, после прекращения скармливания жировой добавки (гр. 3.3) и протеиновой добавки (гр. 3.2), а также в контрольной группе (гр. 1) удои и продукция молочного жира изменялись по-разному. В контрольной группе и группе 3.2 удои по сравнению с соответствующим периодом лактации не изменились, в группе 3.3 снизились на 5,6%. Примерно такая же картина наблюдалась и в отношении суточной продукции молочного жира: в гр. 3.3; она снизилась на 11%.

Причины выявленного последствия могли быть разными. По свидетельству многих авторов (Chilliard, 1993; Palmquist, Jenkins, 2017), наиболее высокая эффективность от применения жировых добавок имеет место в первые недели лактации (при низком потреблении корма и гомеостатическом распределении субстратов в пользу молочной железы). Кроме того, показано, что при сравнении результатов долгосрочных и краткосрочных опытов, долгосрочные опыты оказываются более эффективными в отношении влияния жировых подкормок на молочную продуктивность, особенно - на продукцию молочного жира (Chilliard, 1993). В данной статье дважды акцентировалось внимание на необходимость удлинения сроков адаптации коров к жировым подкормкам (см. опыт 1 и опыт 2). В опыте 3 в наиболее выгодном положении оказался 60-дневный период после отёла: в первый месяц – из-за вероятного отрицательного баланса, во второй месяц – вследствие более глубокой адаптации к подкормке. Коровы гр. 3.3 в течение двух месяцев

адаптировались к рациону с подкормкой, а после лишения их подкормки они были вынуждены адаптироваться к рациону без подкормки, что отрицательно сказалось на продуктивности. Наши данные о влиянии подкормок жиром на продуктивность коров согласуются с данными, полученными другими авторами (Булгакова и др., 2022; Степанов и др., 2022; Головин, Царев, 2023; Бетин и др., 2021).

В проведенном исследовании наблюдалась положительная корреляция между массовой долей суммы жирных кислот C18:0+C8:1 в сумме жирных молочного жира, и массовой долей жира в молоке подопытных коров ($r=0,57$, $P<0,01$, $n=170$). Поскольку кислоты группы C18 практически полностью имеют кормовое происхождение, эту довольно тесную связь можно полностью отнести на счет добавок жира.

С другой стороны, уровень в рубцовой жидкости пропионовой кислоты, которая служит субстратом липогенеза лишь в малой степени (из неё синтезируются лишь жирные кислоты с нечётным числом атомов углерода, составляющие лишь малую долю жирных кислот молочного жира) отрицательно коррелировала с массовой долей жира в молоке ($r = -0,48$, $P<0,01$, $n=69$).

Известно, что жирные кислоты способствуют секреции инсулина у моногастричных животных (Poitout et al., 2006). Способность добавок насыщенных жирных кислот увеличивать концентрацию инсулина в крови наблюдали и у коров в период наивысших удоев (Harvatine et al., 2006). Однако, следует учитывать, что хронический избыток пальмитиновой кислоты снижает синтез и секрецию инсулина у человека за счёт опосредованного церамидами ингибирования экспрессии гена инсулина, а также снижения уровня апоптоза β -клеток (Maedler et al., 2003). С другой стороны, мононенасыщенные жирные кислоты (пальмитоолеиновая и олеиновая) противодействуют негативному воздействию пальмитиновой кислоты на функцию β -клеток поджелудочной железы у человека (Maedler et al., 2003). Скармливание коровам смеси пальмитиновой и олеиновой кислот в середине лактации приводило к повышению концентрации инсулина в крови, по сравнению с теми коровами, которые получали высокие дозы пальмитиновой кислоты или смесь пальмитиновой и стеариновой кислот (de Souza et al., 2018). В частности, жирные кислоты кормового происхождения или эндогенные, могут влиять на синтез инсулина, хотя это воздействие, вероятно, зависит от степени насыщенности жирной кислоты и длины её углеводной цепи (McFadden, 2020).

Изменение чувствительности к инсулину периферических тканей у коров под действием жирных кислот может влиять на липолиз и использование глюкозы в молочной железе. Внутривенное введение насыщенного жира вызывало у дойных коров синдром резистентности к инсулину (Pires et al., 2007). Данные, полученные в физиологических экспериментах, свидетельствуют о том, что пальмитиновая кислота способствует перенаправлению субстратов синтеза в молочную железу, тогда как олеиновая кислота переключает метаболические потоки с синтеза компонентов молока на накопление жира в организме (de Souza et al., 2018).

В опытах с инфузией в сычуг транс-10, цис-12 конъюгированной линолевой кислоты в дозе 13,6 г/сутки наблюдалось снижение концентрации жира в молоке на 42% и продукции молочного жира на 48%, что являлось следствием снижения экспрессии ферментов, участвующих во всасывании жирных кислот в ЖКТ, и синтеза ТГ в секреторных клетках молочной железы (Baumgard et al., 2002).

Содержание сырого жира в белковых добавках животного происхождения находится в диапазоне в среднем $6,4\pm 4,8\%$, в белковых добавках растительного происхождения – $3,9\pm 3,7\%$ в сыром жире, в энергетических кормах – от 0,6 до 7,2% в сухом веществе, в цельных растениях зерновых злаков, включая кукурузный силос – $2,9\pm 0,7$, в кормах из субпродуктов (маслоэкстракционной промышленности) – $6,9\pm 5,2\%$, в грубых кормах – $3,0\pm 0,8$, в семенах

масличных культур – 26 ± 11 % в сухом веществе (Daley et al., 2020). Классовый состав растительных липидов также ысоко вариабелен. Растительные липиды представлены двумя группами: 1) структурные липиды (гликолипидами и фосфолипидами), входящие в состав мембран в количестве 7% от массы листьев у высших растений, и 2) поверхностные липиды, назначение которых – защита растения от намокания и избыточного испарения воды. Поверхностные липиды представлены высокомолекулярными восками (McDonald et al., 2010). Сырой жир вегетативных частей растений (листьев) содержит, преимущественно, полярные липиды (фосфолипиды и гликолипиды), тогда как ТГ обычно накапливаются в семенах.

Гликолипиды и фосфолипиды содержатся, главным образом, в грубых кормах, преимущественно – в хлоропластах клеток тканей листьев, жирнокислотный состав злоропластов представлен, главным образом, полиненасыщенными жирными кислотами (C18:2 и C18:3; Harfoot, 1981), содержание которых варьирует под действием различных факторов, таких, как видовая принадлежность растения, стадия вегетации и метод уборки и заготовки, длительность и условия хранения, а также проявление и теневая сушка (Daley et al., 2020). Внесение азотных удобрений может привести к повышению суммарного содержания жирных кислот в грубых кормах и доли в нём C18:3 примерно на 24 и на 40 %, соответственно (Boufaied et al., 2003). Суммарное содержание жирных кислот и содержание C16:0, с 16:1, C18:2 и C18:3, по данным тех же авторов, снижается по мере старения растений, возможно, вследствие снижения в растениях доли листьев по мере старения.

Коэффициенты для пересчёта показателей сырого жира в содержание жирных кислот для животных белков, растительных белков, источников энергии, зерновых злаков, отходов кормов и семян масличных составляют в среднем 0,73; 0,98; 0,80; 0,61; 0,92 и 0,93 соответственно. (Daley et al., 2020). Коэффициенты для пересчёта показателей сырого жира в значения кажущейся переваримости липидов (т.е. оцененной по соотношению (корм – кал)/корм) составляют в среднем 0,70 – для масел, 0,61 – для смесей ТГ, 0,68 – для ТГ сала, 0,44 – для сильно насыщенных триглицеридов, 0,76 – для кальциевых солей жирных кислот пальмового масла, 0,69 – для обогащенных насыщенными жирными кислотами жирных кислот из сала, 0,73 – для пальмитиновой или стеариновой кислоты (Daley et al., 2022). В довольно обширном обзоре отмечено, что добавки жира снижали потребление сухого вещества корма в кратковременных опытах на пике лактации (Chilliard, 1993).

В целом, результаты опытов по изучению влияния жировых добавок на потребление корма, удои и состав молока очень разноречивы, что обусловлено действием большого количества факторов, влияющих на эти показатели. Вычленить наиболее важные факторы с учётом возможных взаимодействий (изменения роли одного фактора при изменении уровня другого) в такой сложной системе, повидимому, можно при организации большого рандомизированного исследования с применением методов многофакторного дисперсионного анализа. Другой методический подход может заключаться в проведении мета-анализа большого массива литературных данных (Huhtanen et al., 2009); необходимым требованием при этом является соблюдение авторами первичных материалов достаточно высоких требований в части соблюдения современных методик планирования опытов (погрешность измерений, количество варьируемых факторов, оценка дисперсий измеряемых показателей, численность выборки, рандомизация исследования) с последующим проведением дисперсионного анализа с небольшим количеством факторов).

Материалы, полученные в проведенном исследовании, в определённой степени свидетельствует о регуляторной роли соотношения продуктов ферментации в рубце и о возможности повышать жирность молока и улучшать жирнокислотный состав молочного жира за счёт применения добавок кормового жира.

Заключение

Использованные в проведенных опытах жировые подкормки животного происхождения (свиной), говяжий и костный говяжий) незначительно различались по суммарному содержанию предельных и непредельных жирных кислот, однако, содержание миристиновой кислоты (C14:0) в говяжьем жире было в три раза больше по сравнению со свиным, и в два раза больше по сравнению с говяжьим костным жиром. Известно, что содержание миристиновой кислоты в кормах – это один из важных факторов, влияющих на процессы ферментации компонентов корма в рубце.

При низком содержании жирных кислот в рационе применение жировых добавок повышает переваримость питательных веществ, особенно, сырой клетчатки, но может снижать её при повышенном потреблении жирных кислот (особенно – непредельных).

Жировые добавки, содержащие высшие жирные кислоты, угнетают коров синтез жирных кислот в молочной железе. Пропионовая кислота оказывает на синтез молочного жира гораздо большее влияние, чем уксусная. Из всех изученных показателей метаболизма в рубце наиболее тесно связано с синтезом молочного жира величина отношения ацетат/пропионат.

Полученные данные в определённой степени свидетельствуют о регуляторной роли соотношения продуктов ферментации в рубце и о возможности повышать жирность молока и улучшать жирнокислотный состав молочного жира за счёт применения добавок кормового жира.

Список литературы

1. Абдуллина Р.И. Использование защищенных жиров в кормлении коров. // Научные труды Ижевской с.-х. академии. 2022. Т. 1. С. 839-843.
2. Алиев А.А., Димов В. Обмен липидов. // В кн.: Обмен веществ у жвачных животных М: НИЦ Инженер, 1997. С. 161-231.
3. Архипов А.В. Липидное питание, продуктивность птицы и качество продуктов птицеводства. Москва: Колос, 1980. 300 с..
4. Бетин А.Н., Фролов А.И., Филиппова О.Б., Дорохова В.И. Эффективность использования жировых добавок в рационах коров. // Вестник АПК Верхневолжья. 1984. Т. 55. С. 47-60.
5. Берчфилд Г. Сторрс Э. Газовая хроматография в биохимии. М.: Мир, 1964. 619 с.
6. Головин А.В., Царев Е.А. Влияние инертных жиров на процессы пищеварения и интенсивность раздоя высокопродуктивных коров. // Аграрная наука. 2023. № 5. С. 52-57.
7. Курилов Н.В., Кальницкий Б.Д. и др. Новая система оценки и нормирования протеинового питания коров. Боровск: ВНИИФБиП, 1989. 105 с.
8. Овсянников Ф.И. Основы опытного дела в животноводстве. М.: Колос, 1976. 304 с.
9. Рудаков О.Б., Пономарев А.Н., Полянский К.К., Любарь А.В. Жиры. Химический состав и экспертиза качества. Москва: ДеЛи принт, 2005. 312 с.
10. Allen M.S. Effects of diet on short-term regulation of feed intake in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2000. 83: 1598-1624.
11. Angeli E., Rodriguez F.M., Rey F., Santiago G. et al. Liver fatty acid metabolism associations with reproductive performance of dairy cattle. *Anim. Reprod. Sci.* 2019, 208: 106-104.
12. Baltic B., Starcevic M. et al. Importance of medium chain fatty acids in animal nutrition. *59th International Meat Industry Conference. IOP Conf. Series: Earth Env. Sci.* 2017. 85: 012048.
13. Bauman D.E., Griinari J.M. Nutritional regulation of milk fat synthesis. *Ann. Rev. Nutrit.* 2003. 23: 203-227.
14. Baumgard L.H., Matitashvili E. et al. *Trans*-10, *cis*-12 conjugated linoleic acid decreases lipogenic rates and expression of genes involved in milk lipid synthesis in cows. *J. Dairy Sci.* 2002. 85: 2155-2163.
15. Bayat A.R., Tapio I, Vilkkilä J., Shingfield K.J., Leskinen H. Plant oil supplements reduce methane emissions and improve milk fatty acid composition in dairy cows fed grass silage-based diets without affecting milk yield. *J. Dairy Sci.* 2018.101(2): 1136-1151.

16. Bionaz M., Osorio J., Loores J.J., Triennial lactation symposium: Nutrigenomics in dairy cows: Nutrients, transcription factors, and techniques. *J. Anim. Sci.* 2015. 93(12): 5531-5553.
17. Bobe G., Lindberg G.L. et al. Effects of lipid supplementation on the yield and composition of milk from cows with different β -lactoglobulin phenotypes. *J. Dairy Sci.* 2009. 92(1): 197-203.
18. Bobe G., Young J.W., Beitz D.C. Invited review: pathology, etiology, prevention, and treatment of fatty liver in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2004. 87(10): 3105-3124.
19. Boerman J.P., Preseault C.L., Lock A.L. Effect of dietary antioxidant and increasing corn oil inclusion on milk fat yield and fatty acid composition in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2014. 97(12): 7697-7705.
20. Boufaied H., Chouinard P.Y. et al. Fatty acids in forages. 1. Factors affecting concentrations. *Canad. J. Anim. Sci.* 2003. 83: 501-511.
21. Bradford B.J., Harvatine K.J., Allen M.S. Dietary unsaturated fatty acids increased plasma glucagon-like peptide-1 and cholecystokinin and may decrease premeal ghrelin in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2008. 91: 1423-1450.
22. Burch A.M., Abou-Rjeileh U., Contreras G.A., Lock A.L. Harnessing fatty acids for transition cow management. *Michigan State University Extension*. 2022. 02. 6 p.
23. Castro T., Martinez D., Isabel B., Cabezas A., Jimeno V., Jimeno V. Vegetable oils rich in polyunsaturated fatty acids supplementation of dairy cows diets effect on productive and reproductive performance. *Animals*. 2019. 9(5): 205.
24. Chilliard Y. Dietary fat and adipose tissue metabolism in ruminants, pig, and rodents: a review. *J. Dairy Sci.* 1993. 76(12): 3897-3931.
25. Christopherson S.W., Glass R.L. Preparation of milk fat methyl esters by alcoholysis in an essentially in nonalcoholic solution. *J. Dairy Sci.* 1969. 52(8): 1289-1290.
26. Daley V., Armentano L.E. et al. Modeling fatty acids for dairy cattle: 1. Models to predict total fatty acid concentration and fatty acid digestion of feedstuffs. *J. Dairy Sci.* 2020. 103(8): 6982-6999.
27. de Souza J., Preseault C.L., Lock A.L. Altering the ratio of dietary palmitic, stearic, and oleic acids in diets with or without whole cottonseed affects nutrient digestibility, energy partitioning, and production responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2018, 101(1): 172-185.
28. Dorea J., Armentano L. Effects of common dietary fatty acids on milk yield and concentration of fat and fatty acids in dairy cattle. *Anim. Prod. Sci.* 2017. 57: 2224-2236.
29. Elliott J.P.; Drackley J.K.; Deaulieu A.D.; Aldrich C.G.; Merchen N.R. Effects of saturation and esterification of fat sources on site and extent of digestion in steers: Digestion of fatty acids, triglycerides, and energy. *J. Anim. Sci.* 1999. 77: 1919-1929.
30. Enjalbert F., Combes S., Zened A., Meynadier A. Rumen microbiota and dietary fat: a mutual shaping. *J. Appl. Microb.* 2017, 123(4): 782-797.
31. Folch J., Ascoli I., Lees M.B., Meath J.A. Preparation of lipid extracts from brain tissue. *J. Biol. Chem.* 1951, v. 191, N 2, p. 833-841.
32. Garnsworthy P.C. Feeding calcium salts of fatty acids in high-starch or high-fibre compound supplements to lactating cows at grass. *Anim. Sci.* 1990, 51: 441-447.
33. Ghani A.A.A., Rusli N.D., Shahudin M.S., Goh Y.M., Zamri-Saad M., Hafandi A., Hassim H.A. Utilisation of oil palm fronds as ruminant feed and its effect on fatty acid metabolism. *Pert. J. Trop. Agric. Sci.* 2017. 40(2): 215-224.
34. Harfoot C.G. Lipid metabolism in the rumen. In: *Lipid metabolism in ruminant animals*. (Ed. W.W. Christie). 1981. Ayr. Scotland: Pergamon. p. 21-55.
35. Harvatine K.J., Allen M.S. Effects of fatty acid supplements on feed intake, and feeding and chewing behavior of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2006. 89(3): 1104-1112.
36. Hocquette F., Bauchart D. Intestinal absorption, blood transport and hepatic and muscle metabolism of fatty acids in preruminant and ruminant animals. *Reprod. Nutr. Dev.* 1999. 39(1): 27-48.
37. Huhtanen P., Rinne M., Nousiainen J. A meta-analysis of feed digestion in dairy cows. 2. The effects of feeding level and diet composition on digestibility. *J. Dairy Sci.* 2009. 92(1): 5031-5042.
38. Jenkins T.C. Lipid metabolism in the rumen. *J. Dairy Sci.* 1993. 76(12): 3851-3863.
39. Lashkan S., Bonefeld P.M., Krogh J.S. Rumen biohydrogenation of linoleic and linolenic acids is reduced when esterified to phospholipids or steroids. *Food Sci. Nutr.* 2020. 8(1): 79-87.
40. Lofton O.K., Linn J.G. et al. Invited review: Palmitic and stearic acid metabolism in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2014. 97(8): 4661-4674.

41. Longo N., de San Filippo A.C., Pasquali M. Disorders of carnitine transport and carnitine cycle. *Am. J. Med. Genet. Semin Med Genet.* 2006. 142C(2): 77-85.
42. Longo N., Frigeni M., Pasquali M. Carnitine transport and fatty acid oxidation. *Biochem. Biophys. Acta*, 2016. 1863(10): 2422-2435.
43. McFadden J.W. Review: Lipid biology in the periparturient dairy cow: contemporary perspectives. *Animal*, 2020. 14(Suppl. 1): 165-175.
44. Moallem U. 2018. Roles of dietary-3 fatty acids in performance, milk fat composition on reproductive and immune systems in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2018. 101: 8641-8661.
45. Palmquist D.L., Jenkins T.C. A 100-Year Review: Fat feeding of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2017. 100(12): 10061-10072.
46. Prom C.M., dos Santos N.J. R., Newbold J.R., Lock A.L. Abomasal infusion of oleic acid increases fatty acid digestibility and plasma insulin of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2021.104(12): 12616-12627.
47. Santos J.E., Bisinotto R.S., Ribeiro E.S. et al. Applying nutrition and physiology to improve reproduction in dairy cattle. *Soc. Reprod. Fertilit Suppl.* 2010. 67: 387-403.
48. Sears F., Yentz F., de Souza J., Wenner B., Ward R.E. Supply of palmitic, stearic, and oleic acid changes rumen fiber digestibility and microbial composition. *J. Dairy Sci.* 2024. 107(2): 902-916.
49. Shehata A.Y., de Man J.M., Alexander D.C. A simple and rapid method for the preparation of methyl esters of fats in milligram amounts for gas chromatography. *Canad. Inst. Food Technol. J.* 1970. 3(3): 85-89.
50. Sutton J.D., Broster W.H., Schuller E., Napper J.D., Broster V.J., Bines J.A. 1988. Influence of plane of nutrition and diet composition on rumen fermentation and energy utilization by dairy cows. *J. Agric. Sci.* 110: 261-270.
51. Ueda K., Ferlay A., Chabrot J., Looor J.J., Chilliard Y., Doreau M. Effect of linseed oil supplementation on ruminal digestion in dairy cows fed diets with different forage:concentrate ratios. *J. Dairy Sci.* 2003. 86(12): 3999-4007.
52. Vargas-Bello-Perez E., Sancino-Padilla N., Geldsetzer-Mendoza C., Vyhrmeister S., Morales M.S., Leskinen H et al. Effect of feeding cows with unsaturated fatty acid sources on milk production, milk composition, milk fatty acid profile, and physicochemical and sensory characteristics of ice cream. *Animals*. 2019. 9(9): 569.
53. Vernon R.G. Lipid metabolism during lactation: a review of adipose tissue-liver interaction and the development of fatty liver in dairy cows. *J. Dairy Res.* 2000. 72(4): 460-469.
54. Weisbjerg M.R., Wiking L., Kristensen N.B., Lund H. Effects of supplemental dietary fatty acids on milk yield and fatty acid composition in high and medium yielding cows. *J. Dairy Res.* 2008. 75(1): 142-152.

References (for publications in Russian)

1. Abdullina R.I. [The use of protected fats in feeding cows]. *Nauchnye trudy Izhevskoi s.-kh. Akademi* (Scientific works of Izhevsk agricultural. Academy). 2022. 1: 839-843.
2. Aliev A.A., Dimov V. Obmen lipidov. [Lipid metabolism]. In: *Obmen veshchestv u zhvachnykh zhivotnykh* (Metabolism in ruminants). Moscow: Nits Engineer Publ., 1997: 161-231.
3. Arkhipov A.V. *Lipidnoe pitanie, produktivnost' ptitsy i kachestvo produktov ptitsevodstva* (Lipid nutrition, poultry productivity and quality of poultry products).. Moscow: Kolos, 1980. 300 pp.
4. Berchfeld G., Storrs E. *Gazovaya khromatografiya v biokhimi* (Gas chromatography in biochemistry). Moscow: Mir, 1964. 619 pp.
5. Betin A.N., Frolov A.I., Flippova O.B., Dorokhova V.I. [The effectiveness of using fat additives in cow diets]. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* (Bulletin of the agro-industrial complex of the Upper Volga region). 1984. 55: 47-60.
6. Golovin A.V., Tsarev E.A. [The influence of inert fats on the digestive processes and milking intensity of highly productive cows]. *Agrarnaya nauka* (Agricultural science). 2023. 5.: 52-57.
7. Kurilov N.V., Kal'nitskii B.D., Medvedev I.K. et al. *Novaya sistema otsenki i normirovaniya proteinovogo pitaniya korov* (A new system for assessing and rationing protein nutrition of cows). Borovsk: VNIIFBiP, 1989. 105 pp.
8. Ovsyannikov F.I. *Osnovy opytnogo dela v zhivotnovodstve* (Basics of experimental business in animal husbandry). Moscow: Kolos, 1976. 304 pp.
- 9.

10. Rudakov O.B., Ponomarev A.N., Polyanskii K.K., Lyubar' A.V. Zhiry. *Khimicheskii sostav i ekspertiza kachestva* (Fats. Chemical composition and quality examination). Moscow. DeLi Print, 2005. 312 pp.

Благодарности авторов

Выражаем благодарность Ольге Ивановне Борис и Анне Дмитриевне Жуковой за содействие в подготовке материалов исследования к публикации.

UDC 636.2.034.085.25.087.7:612.322.664

Effect of fat supplements on feed consumption, nutrients digestibility, rumen VFA profile and fatty acid composition of milk lipids in cows

¹Ovcharenko E.V., ²Meshcheryakov V.P.

^{1,2} *Kaluga branch of the Russian State Agrarian University, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Kaluga, Russian Federation*

ABSTRACT. The effect of fat additives on feed consumption, nutrient digestibility, rumen digestion indicators, milk production and milk lipid composition has been studied by the group-period method in a series of experiments conducted on Kholmogory cows of average productivity 5 thousand kg for 305 days of lactation during the decline of lactation (fifth to sixth months of lactation at the beginning of the experiment) when using diets with different ratios of chemical feed components. In each group $n=3-4$, in gr. 1 three periods of 30 days, in gr. 2 two periods of 60 days. Composition of feeding rations in the main experiment in two groups (gr) and three periods (pr): **group 1:** pr 1, basic ration (BR.1) with a balanced ratio of roughage and concentrated feed; pr 2: BR.1 with the addition of pork feed fat (BR.1+F); pr 3: fat-depressing diet with a low ratio of roughage and starchy substances (concentrate); **group 2:** pr 1: (BR.2); pr 2: diet with a low content of crude fat and the addition of dry beet pulp (LcfR); pr 3: LcfR with the addition of pork fat. In two additional experiments, the fatty acid composition of various fat supplements has been studied and the effects of the duration of the adaptation period to the introduction of fat supplements into the diet were assessed. At the end of each period, samples of blood and rumen fluids were taken and nutrients digestibility was determined. Crude fat consumption and its digestibility were higher at BR.1+F ($P<0.05$), and fiber digestibility was lower ($P<0.05$) than at BR.1. Consumption and digestibility of crude fat, dry matter and fiber were lower on LcfR than on BP.2 ($P<0.05$). A negative correlation was revealed between the level of propionic acid in the rumen fluid and the mass fraction of fat in milk ($r=0.45$, $P<0.01$). Total content of C18 fatty acids in milk was higher ($P<0.05$) when fed with fat supplements compared to control. A positive correlation was revealed between the content of C18:0+C18:1 acids in milk fat and the mass fraction of fat in milk ($r=0.56$, $P<0.01$). The data obtained indicate the regulatory role of the ratio of fermentation products in the rumen and the possibility for increasing the fat content of milk and improving the fatty acid composition of milk fat under the use of feed fat additives.

Keywords: dairy cows, fat additives, feed consumption, nutrients digestibility, rumen VFA, milk lipids composition.

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology), 2024. 1: 70-92.

Поступило в редакцию: 09.02.2024

Получено после доработки: 20.03.2024

Сведения об авторах:

Овчаренко Эдуард Васильевич, д.б.н., ovcharenko.ev@list.ru

Мешеряков Виктор Петрович, к.б.н., 8(919)036-07-59; vpmeshcheryakov@mail.ru