

УДК 636.2.034; 577.1; 612.64

БИОСИНТЕЗ КОМПОНЕНТОВ МОЛОКА У КОРОВ И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СПЕКТРА МЕТАБОЛИТОВ-ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ

¹ В.Б. РЕШЕТОВ, ¹ А.И. ДЕНЬКИН, ¹ В.И. АГАФОНОВ,
¹ М.В. СОРОКИН, ² В.О. ЛЕМЕШЕВСКИЙ

¹ ВНИИ физиологии, биохимии и питания сельскохозяйственных животных, г. Боровск, Россия

² Полесский государственный университет, г. Пинск, Республика Беларусь

Abstract. Based on the stoichiometry and thermochemical characteristics of the biosynthesis description it was calculated the energy expenditure necessary for the final stages of biosynthesis of the major milk constituents (lactose, protein and fat). The theoretical analysis indicated that the energy expended for the biosynthesis of fatty acids of milk triglycerides depends on the used precursors' spectrum. It was supposed that the similar mechanism explains the decrease of the energy efficiency in the milk components synthesis, while milk productivity increases. Another supposition was that simultaneously, there is an increase of the energy expenditure for the homeostatic maintenance.

Key words: Cows; Metabolite precursors; Arteriovenous difference; Milk biosynthesis; Lactose; Glycerin; Milk fat

Реферат. На основе стехиометрии и термодимических характеристик реакций биосинтеза вычислены затраты энергии на конечных этапах биосинтеза важнейших компонентов молока (лактозы, белка и жира). Показано, что затраты энергии при биосинтезе жирных кислот триглицеридов молока зависят от спектра использованных предшественников. Высказано предположение, что снижение энергетической эффективности синтеза компонентов молока с ростом молочной продуктивности объясняется аналогичными механизмами. Возможно, при этом возрастают и энергетические затраты на поддержание гомеостаза.

Ключевые слова: Коровы; Метаболиты предшественники; Артерио-венозная разница; Биосинтез молока; Лактоза; Глицерин; Молочный жир

ВВЕДЕНИЕ

Для совершенствования систем питания и разработки способов влияния на процессы биосинтеза компонентов молока в организме лактирующих коров необходимо углубление знаний о потоках метаболитов на уровне как всего организма (Алиев, А., Димов, В. 1997; Дегли, С., Никольсон, Д. 1973; Досон, Р. и др. 1991), так и важнейших тканей и органов, особенно молочной железы. Это касается как субстратов – предшественников веществ молока, так и метаболитов – источников энергии для биосинтеза (Иванов, К.П. 1990, 1993; Котык, А., Яначек, А. 1980; Сапунов, М.И., Черепанов, Г.Г. 2002; Трошин, А.С., 1985).

Вероятно, что для повышения эффективности использования корма, особенно при высокой продуктивности, целесообразно обеспечивать организм веществами, требующими меньших затрат энергии на их трансформацию в процессе использования. Соответственно, при этом возможно снижение затрат энергии – доминирующего по дефицитности компонента при кормлении высокопродуктивных коров. Одновременно имеет значение и снижение затрат на поддержание гомеостаза организма. Учитывая большой объем питательных веществ, используемых коровами, эти затраты могут быть весьма существенными (Решетов, В.Б. 1998).

В описываемых исследованиях ставилась цель определить величину затрат энергии в молочной железе на конечных этапах биосинтеза компонентов молока на фоне общих затрат энергии в организме коров. Для этого на основе стехиометрии реакций биосинтеза важнейших по массе и содержанию энергии веществ молока – жира, белка и лактозы – нужно было провести теоретический расчет потребности в АТФ для биосинтеза этих компонентов и теплообразования при синтезе единицы АТФ и ее использовании (Ленинджер, А., 1976; Малер, Г., Кордес, Ю., 1970; Решетов, В.Б., 1998).

Итоговая величина, очевидно, будет несколько ниже фактических общих затрат энергии в молочной железе (теплообразования), так как расчет затрат АТФ касается лишь конечных стадий биосинтеза макрокомпонентов молока.

С использованием этой исходной теоретической базы, на примере ацетата прослежена судьба данного метаболита от всасывания из пищеварительного тракта до поглощения молочной железой из крови и использования для синтеза жирных кислот жира молока и генерации АТФ и тепла в клетках молочной железы. Последний аспект работы выполнен с учетом результатов расчета образования и расхода в организме основных (по массе и валовому содержанию энергии) субстратов на энергетические нужды всего организма.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Опыты проведены на трех коровах-первотелках на 2-3-м месяцах лактации. Живая масса коров в среднем равнялась 360 кг. Животные имели фистулы рубца и двенадцатиперстной кишки, через которые отбирали пробы содержимого рубца и химуса, поступающего из сложного желудка в кишечник. Для взятия проб крови выводили под кожу на «лодочку» сонную артерию. Измерение объемного кровотока через половину молочной железы выполнено сотрудниками лаборатории физиологии и биохимии лактации с помощью ультразвукового флоуметра, датчик которого был наложен на одну из наружных срамных артерий. Общий кровоток через молочную железу принимали равным удвоенной величине кровотока через половину вымени.

Содержание животных было привязным, без прогулок. Кормление – трехкратное равными долями в 8, 13 и 20 часов. Учет остатков корма проводили ежесуточно. Поение осуществлялось из автопоилок. Доеение – двукратное. Удой учитывали ежедневно, пробы молока для анализа отбирали по плану. Удой оперированных коров во время опыта составлял 9-17 кг.

В предварительном и опытных периодах животные получали одинаковый рацион, в который входили сено, злаково-бобовый силос и комбикорм, состоявший из 45 % ячменя, 20 – пшеницы, 12 – овса, 20 – подсолнечникового шрота, 1 – поваренной соли, 1 – трикальцийфосфата и 1 % – премикса (Табл. 1).

Таблица 1. Рацион коров

| Корма и показатели питательности | Количество |
|---|------------|
| Состав рациона | |
| Сено злаковое, кг | 3,8 |
| Силос из злаково-бобовых многолетних трав, кг | 20,0 |
| Комбикорм, кг | 6,0 |
| В рационе содержится: | |
| Сухое вещество, кг | 13,9 |
| Обменная энергия, МДж | 121 |
| Сырой протеин, г | 1806 |
| в том числе: | |
| распадающийся, г | 1250 |
| нераспадающийся, г | 556 |
| Целлюлоза, г | 2171 |
| Гемичеселлюлоза, г | 2742 |
| Лигнин, г | 913 |
| Крахмал, г | 2540 |
| Сахара, г | 450 |
| Сырой жир, г | 387 |
| Фонд доступных субстратов: | |
| Уксусная кислота (ацетат), г | 3135 |
| Пропионовая кислота (пропионат), г | 1090 |
| Масляная кислота (бутират), г | 570 |
| Сумма аминокислот, г | 1090 |
| Сумма ВЖК, г | 325 |
| Глюкоза, г | 682 |
| Молочная кислота, г | 320 |

В опытные периоды, кроме дачи основного рациона, коровам дополнительно ежедневно инфузировали через фистулы в пищеварительный тракт растворы питательных веществ (субстратов) в следующих вариантах:

- 1) смесь 250 г ацетата калия и 365 г ацетата натрия тригидрата – в рубец;
- 2) 300 г пропионовой кислоты в смеси с буферным раствором – в рубец;
- 3) 370 г глюкозы – в двенадцатиперстную кишку;
- 4) 250 г казеината натрия – в двенадцатиперстную кишку;
- 5) смесь 250 г казеината натрия и 200 г пропионовой кислоты.

Инфузию проводили в течение пяти дней подряд равномерно с 8-00 до 20-00. За час вводили 1 литр раствора. Вводимые за сутки субстраты в каждом варианте содержали около 4,5 МДж валовой энергии. В последний день каждого периода в 7, 11 и 16 часов методом пункции брали пробы крови из сонной артерии и молочной вены.

Использование энергии и питательных веществ основного рациона определяли в обменном опыте в контрольном периоде, который был по порядку третьим после периодов с введением ацетата и пропионовой кислоты. Общий расход энергии в организме коров измеряли методом непрямой калориметрии традиционным масочным методом (Надальяк, Е.А., Агафонов, В.И., Решетов, В.Б. и др. 1986). Химический анализ образцов газа проводили с помощью аппарата Холдена. Калорийность проб кормов, молока, кала и мочи проводили с помощью адиабатического калориметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Потребление коровами обменной энергии с кормом колебалось от 90 до 120 МДж/сут. Использование энергии корма в расчете на голову представлено в таблице 2.

Данные об образовании за счет переваренных веществ основного рациона важнейших субстратов представлены в таблице 1. Определение фонда субстратов проводилось на основе данных о составе рациона, переваривании питательных веществ в сложном желудке и кишечнике, соотношении образовавшихся в рубце ЛЖК в сочетании с показателями газоэнергетического обмена и обмена азота. Как видно из материалов таблицы, доминирующим по массе субстратом являлся ацетат.

Таблица 2. Обмен энергии у коров при потреблении основного рациона

| Показатели | МДж/сут |
|--------------------------------------|----------|
| Обменная энергия потребленных кормов | 90-120 |
| Энергия мочи | 7,3±0,9 |
| Теплопродукция | 52,4±1,0 |
| Энергия удоя | 40,8±5,9 |

В таблице 3 представлены результаты расчета использования (окисления) отдельных субстратов в энергетическом обмене.

Таблица 3. Использование субстратов в энергетическом обмене коров, г/сут

| Период опыта | Азотсодержащие вещества | Ацетат | Глюкоза | ВЖК и кетонные тела |
|---------------------------------------|-------------------------|--------|---------|---------------------|
| Контрольный | 427 | 1546 | 327 | 113 |
| Инфузия ацетата | 376 | 1420 | 278 | 565 |
| Инфузия пропионовой кислоты | 278 | 1461 | 310 | 500 |
| Инфузия глюкозы | 350 | 1509 | 366 | 663 |
| Инфузия казеина | 444 | 1811 | 304 | 371 |
| Инфузия казеина и пропионовой кислоты | 448 | 1790 | 354 | 458 |

При инфузии субстратов в пищеварительный тракт наиболее существенным было уменьшение по сравнению с контролем выделения азота с мочой при введении «чисто» энергетических субстратов (ацетата, пропионовой кислоты, глюкозы). Вероятно, причиной этого стало уменьшение использования для генерации энергии азотсодержащих субстратов. При введении растворов с казеином выделение азота с мочой, напротив, увеличивалось.

Для калькуляции расхода энергии в молочной железе при синтезе лактозы, белка и жира молока

и, следовательно, единицы молока любого состава, были проанализированы на стехиометрической основе конечные реакции биосинтеза важнейших компонентов молока с учетом затрат макроэргов АТФ (Bauman, D.E., Brown, R.E., Davis, C.L. 1970; Christie, W.W. 1983; Scott, R.A., Beuman, D.E., Clark, J.H. 1976). Далее проводится обоснование использованного метода калькуляции. Отдельно анализируются подходы к определению затрат энергии при синтезе лактозы, белка и жира.

Синтез лактозы. Молекулярная масса лактозы равна 342 дальтон. При синтезе из двух молекул глюкозы и молекулы лактозы расходуются 2 молекулы АТФ. Отсюда следует, что на синтез 1 г лактозы расходуются 2 (моль АТФ): $342 = 0,006$ моль АТФ.

Образование и расходование АТФ при синтезе 1 г лактозы будет сопровождаться выделением тепла, количество которого определяется следующим расчетом: $25 \text{ ккал} \cdot 2 : 342 = 0,15 \text{ ккал} = 0,61 \text{ кДж}$. Обоснованием такого расчета теплообразования при образовании и использовании АТФ являются следующие моменты. Средняя энергия макроэргической связи моля АТФ равна 10 ккал (предполагаемый размах 8-12 ккал). Эффективность образования связи за счет энергии окисления близка к 40 % (Иванов, К.П. 1990, 1993).

Следовательно, суммарное теплообразование при образовании и расходовании моля АТФ близко к 10: $40 \cdot 100 = 25 \text{ ккал} = 104,6 \text{ кДж}$. Эта величина теплообразования при синтезе и расходовании 1 моля АТФ будет использована в расчетах и далее.

Синтез белка. При расчете энергетических затрат на синтез белка исходили из следующего: 1) на синтез пептидной связи расходуются, по меньшей мере, 3 молекулы АТФ, 2) основной белок молока – казеин имеет молекулярную массу порядка 23000 дальтон (Сапунов, М.И., Черепанов, Г.Г. 2002), а средняя масса аминокислотного остатка белковой цепи близка к 120 дальтон (Ленинджер, А. 1976).

Определяем, какое количество пептидных связей необходимо образовать при синтезе молекулы казеина и каковы затраты АТФ при этом: 23000 (молекулярная масса казеина): $120 - 1 = 191$ связь. Далее рассчитываем количество АТФ, необходимое для синтеза 191 пептидной связи: 3 (молекулы АТФ) $\cdot 191 = 573$ молекулы АТФ. Затраты АТФ на образование одного грамма казеина, соответственно, равны $573 : 23000 = 0,025$ моль АТФ. При образовании и использовании такого количества АТФ образуется тепла: $25 \cdot 0,025 = 0,62 \text{ ккал} = 2,62 \text{ кДж}$.

Синтез жира молока. Этот фрагмент расчетов является наиболее сложным и трудоемким, вследствие многокомпонентности и вариабельности системы. В качестве исходных параметров и допущений было взято следующее. Молочный жир на 97-98 % представлен триглицеридами, поэтому при составлении модели субстратных потоков достаточно в первом приближении учитывать предшественники лишь этой группы веществ. Почти 100 % общей массы жирных кислот в триглицеридах составляют кислоты: $C_{4:0}$, $C_{6:0}$, $C_{8:0}$, $C_{12:0}$, $C_{14:0}$, $C_{16:0}$, $C_{16:1}$, $C_{18:0}$, $C_{18:1}$, $C_{18:2}$ и $C_{18:3}$. Соотношение этих кислот в условиях традиционного нормированного кормления сравнительно постоянно. Около 50 % жирных кислот жира молока синтезируется в молочной железе, вторая половина поглощается из плазмы крови (Bauman, D.E., Brown, R.E., Davis, C.L. 1970; Christie, W.W. 1983).

Основными предшественниками достаточно определенных групп жирных кислот являются бета-гидроксibuтират, ацетат, жирные кислоты триглицеридов и НЭЖК плазмы крови. Длинноцепочные жирные кислоты (C_{18}) считаются используемыми непосредственно в неизменном виде. Предшественниками короткоцепочных кислот C_4 - C_{12} являются ацетат и бета-гидроксibuтират. Кислоты C_{12} - C_{16} могут иметь двойное происхождение – синтезироваться в железе и поступать из плазмы крови. Потребность в предшественниках может быть рассчитана стехиометрически по количеству жирных кислот, из них образующихся. Дополнительным и контрольным моментом являются фактические данные о соотношении поглощаемых из крови молочной железой веществ-предшественников жирных кислот. При использовании разработанного метода отсутствовала необходимость в идентификации кислот, предшественниками которых были ацетат и бета-гидроксibuтират. Достаточно было знать, что последний дает около 8-10 % массы жирных кислот. Эта величина, судя по величинам артерио-венозной разницы по молочной железе для триглицеридов и бета-гидроксibuтирата, приведенным в отчете лаборатории межучасточного обмена ВНИИФБиП, близка к имевшей место в описываемых исследованиях.

Глицерин, необходимый для синтеза триглицеридов молока, частично происходит из поглощенных триглицеридов плазмы. Это количество поддается расчетному определению, исходя из величины артерио-венозной разницы триглицеридов и объемного кровотока. Данные

о поглощении и использовании молочной железой свободного глицерина из плазмы крови очень скудны. Как показывают расчеты, основная масса глицерина должна быть образована из глюкозы. В связи с очень высокой (около 97 %) энергетической эффективностью процесса образования глицерина из глюкозы этими затратами можно пренебречь.

При синтезе жирных кислот из бета-гидроксibuтирата и ацетата путем удлинения углеродной цепи на одно присоединяемое звено требуется 1 молекула АТФ и водород двух молекул НАДФ·Н₂. При расчетах принято, что молекула бета-гидроксibuтирата используется целиком. Необходимый при синтезе НАДФ·Н₂ образуется, в основном, при окислении глюкозы в пентозофосфатном шунте. При этом за счет одной полностью окисленной молекулы глюкозы образуется 12 молекул НАДФ·Н₂ (Малер, Г., Кордес, Ю. 1970). Синтез молекулы триглицерида из глицерина и 3-х молекул жирных кислот требует расхода 7 молекул АТФ.

Таким образом, суммарные затраты на синтез жира молока состоят из затрат на синтез части жирных кислот из ацетата и бета-гидроксibuтирата и затрат на синтез триглицеридов из глицерина и жирных кислот.

Для получения ориентировочных количественных характеристик затрат энергии на конечном этапе синтеза молочного жира был разработан методический подход для проведения соответствующих расчетов. В результате установлено, что при синтезе жирных кислот из ацетата и бета-гидроксibuтирата (в основном с короткой цепью и часть кислот с C₁₆) на 1 г продукта расходуется около 0,024 моль АТФ. Расход АТФ в расчете на 1 г синтезированных триглицеридов молока (фактически жира молока) близок 0,020 моль, т.е. меньше, так как половина (по массе) жирных кислот (в основном группа C₁₈) поглощается из плазмы в готовом виде. Соответственно и расход НАДФ·Н₂ в расчете на 1 г триглицеридов в два раза меньше, чем на синтез 1 г короткоцепочных жирных кислот.

Сравнение затрат энергии на конечном этапе синтеза лактозы, казеина и (жира) триглицеридов молока проведено в таблицах 4 и 5. По содержащимся в них данным видно, что наименьший абсолютный и относительный расход энергии на единицу массы продукта имеет место при синтезе лактозы, промежуточный – при синтезе жирных кислот и триглицеридов, максимальный – при синтезе казеина.

Таблица 4. Затраты энергии на конечном этапе синтеза компонентов молока (в расчете на 1 г)

| Компонент | Расход АТФ, моль | Расход НАДФ·Н ₂ , моль | Теплообразование при синтезе и использовании АТФ, кДж |
|---|------------------|-----------------------------------|---|
| Лактоза | 0,006 | - | 0,61 |
| Белок (казеин) | 0,025 | - | 2,62 |
| Жир молока (триглицериды в среднем) | 0,020 | 0,023* | 2,62 |
| Синтезированные из ацетата и бета-гидроксibuтирата жирные кислоты | 0,024 | 0,046* | 2,51 |

Примечание. Потери энергии в виде тепла при функционировании в пентозофосфатном шунте невелики (порядка 5,6 %) и в расчет не принимались.

Далее рассматриваются материалы по затратам энергии и использованию ацетата молочной железой коров в проведенной серии опытов. Анализ материалов проводился по описанной выше методике.

В таблице 5 приведены материалы по величине суточного удоя и содержанию в нем основных компонентов молока. Инфузия ацетата обусловила увеличение объема синтеза молочного жира по сравнению с контролем в среднем на 94 г/сут. Инфузия только казеина и особенно казеина в сочетании с пропионатом увеличила массу синтезированного молочного белка, по-видимому, вследствие улучшения обеспечения процессов биосинтеза как аминокислотами, так и энергией, причем в «мягком» режиме. Примечательно, что при инфузии казеина + пропионата величина кровотока через молочную железу была максимальной из всех вариантов. Инфузия только глюкозы, напротив, негативно сказалась как на величине удоя, так и на объеме синтеза молочного жира и белка. Предположительно, это является следствием как гомеостатических сдвигов кровотока, так и вклада отдельных тканей в использование субстратов. Можно ожидать, что в этих изменениях ведущую роль играют гормоны.

Таблица 5. Молочная продуктивность коров при инфузии субстратов в пищеварительный тракт

| Период опыта | Удой, кг/сут | Продукция компонентов молока, г/сут | | |
|------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------|-----------|
| | | молочный жир | Белок | лактоза** |
| Контроль (без инфузии) | 13,4±1,4 | 478±38 | 380±27 | 562 |
| Инфузия ацетата | 13,8±2,2 | 562±39 | 386±54 | 580 |
| Инфузия пропионата | 13,4±2,1 | 472±51 | 390±42 | 563 |
| Инфузия глюкозы | 11,2±1,4 | 399±18 | 343±18 | 470 |
| Инфузия казеина | 13,1±1,4 | 434±24 | 414±48 | 550 |
| Инфузия казеина и пропионата | 13,7±1,5 | 471±19 | 444±35 | 575 |

Примечание. Содержание лактозы принято равным 4,2 %

В таблице 6 представлены материалы по затратам энергии на конечный этап синтеза компонентов молока. Суммарные затраты на образование веществ молока были максимальными при инфузии ацетата и минимальными – при инфузии глюкозы.

Таблица 6. Затраты энергии на конечный этап синтеза компонентов молока (теплообразование), кДж/сут

| Период опыта | Молочный жир | Белок | Лактоза | Удой в целом |
|------------------------------|--------------|-------|---------|--------------|
| Контроль (без инфузии) | 999 | 996 | 343 | 2338 |
| Инфузия ацетата | 1174 | 1011 | 354 | 2539 |
| Инфузия пропионата | 986 | 1122 | 344 | 2352 |
| Инфузия глюкозы | 834 | 899 | 287 | 2020 |
| Инфузия казеина | 907 | 1085 | 336 | 2328 |
| Инфузия казеина и пропионата | 984 | 1163 | 351 | 2498 |

Полученные материалы по содержанию ацетата в артериальной крови и крови молочной вены в сочетании с данными о кровотоке позволили определить массу ацетата, поглощаемого молочной железой из крови (Табл. 7). Максимальный уровень ацетата в крови (1,55±0,03 ммоль/л) имел место при введении дополнительного количества ацетата в рубец.

Таблица 7. Извлечение ацетата из крови молочной железой лактирующих коров

| Период опыта | Объект анализа | Содержание ацетата, ммоль/л | Кровоток, л/мин | Извлечение, г/сут |
|--|------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|
| Контроль (без инфузии) | Артериальная кровь | 1,49±0,02 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,69±0,03 | | |
| | Поглощение | 0,80=0,048 г/л | 5,98 | 413 |
| Инфузия ацетата | Артериальная кровь | 1,55±0,03 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,73±0,02 | | |
| | Поглощение | 0,82=0,049 г/л | 6,06 | 428 |
| Инфузия пропионата | Артериальная кровь | 1,38±0,03 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,62±0,03 | | |
| | Поглощение | 0,76=0,046 г/л | 6,86 | 454 |
| Инфузия глюкозы | Артериальная кровь | 1,39±0,02 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,58±0,03 | | |
| | Поглощение | 0,81=0,049 г/л | 6,32 | 446 |
| Инфузия казеина | Артериальная кровь | 1,30±0,01 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,54±0,02 | | |
| | Поглощение | 0,76=0,046 г/л | 6,62 | 438 |
| Инфузия казеина и пропионата | Артериальная кровь | 1,32±0,01 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,55±0,01 | | |
| | Поглощение | 0,77=0,046 г/л | 7,26 | 481 |
| Исходный уровень до снижения уровня кормления | | - | 5,10 | - |
| В 1-й день исключения из рациона концентратов | Артериальная кровь | 1,33±0,02 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,62±0,03 | | |
| | Поглощение | 0,71=0,043 г/л | 3,62 | 224 |
| Во 2-й день исключения из рациона концентратов | Артериальная кровь | 1,38±0,02 | | |
| | Кровь из молочной вены | 0,56±0,02 | | |
| | Поглощение | 0,82=0,049 г/л | 3,62 | 255 |

В дополнение к описанным выше периодам опыта в течение одного дня произвели снижение уровня кормления коров путем исключения из рациона концентратов. При этом масса поглощаемого молочной железой ацетата снизилась вдвое, преимущественно за счет снижения кровотока. Артерио-венозная разница в это время была минимальной из всех случаев, но снижение ее было не столь существенным.

При статистической обработке всего массива данных о поглощении ацетата молочной железой выявлена достоверная положительная корреляция между концентрацией ацетата в артериальной крови и величиной артерио-венозной разницы ацетата, что свидетельствует о доминировании пассивного механизма транспорта ацетата из крови в ткани молочной железы.

Материалы об использовании молочной железой ацетата приведены в таблице 8 для пересчета от общей массы молочного жира в массу ацетата, использованного для синтеза жирных кислот молока (такие кислоты составляют около 41,2 % от их общей массы). Использовался коэффициент 0,72. Доля ацетата, от поглощенного из крови количества, которая пошла на синтез жирных кислот липидов молока, колебалась от 64 до 95 %. Соответственно разницу между 100 % и этими величинами считали использованной на окисление.

Таблица 8. Использование ацетата в молочной железе

| Период опыта | Поступление ацетата в кровь за счет корма, г/сут | Поглощение ацетата молочной железой, г/сут | Расход на синтез жира в железе, г/сут; доля от поглощения, % | Расход на окисление в железе, г/сут |
|------------------------------|--|--|--|-------------------------------------|
| Контроль (без инфузии) | 2988 | 413 | 344 (83,3) | 69 |
| Инфузия ацетата | 428 | 428 | 405 (95,0) | 23 |
| Инфузия пропионата | 454 | 454 | 340 (74,9) | 114 |
| Инфузия глюкозы | 446 | 446 | 287 (64,3) | 159 |
| Инфузия казеина | 438 | 428 | 312 (71,9) | 126 |
| Инфузия казеина и пропионата | 481 | 481 | 339 (70,4) | 142 |

Примечание. Поступление ацетата рассчитано по результатам обменного опыта на основном рационе (Табл. 1, 2 и 3)

Вышеизложенные материалы проиллюстрировали вариабельность энергетической эффективности синтеза компонентов молока в зависимости от спектра использованных субстратов.

Лабораторией энергетического питания за ряд лет был также получен большой массив экспериментальных данных по энергетическому обмену у коров разного уровня продуктивности. Путем статистического анализа материала более 80 обменных опытов оказалось возможным получить численную характеристику прироста затрат энергии (соответствует приросту общей теплопродукции организма) на единицу прироста энергии молока (Решетов, В.Б. 1998). Эти затраты включают в себя как теплоту, образовавшуюся при окислении органических веществ до этапа образования макроэргических связей (первичная теплота), так и теплоту, образовавшуюся после использования энергии макроэргических связей АТФ (вторичная теплота), для осуществления требующего затрат энергии биосинтеза и других процессов.

Очевидно, что общий прирост затрат энергии происходит во всем организме, особенно в органах, обеспечивающих снабжение молочной железы предшественниками веществ молока (желудочно-кишечный тракт, печень, сердечно-сосудистая система). Важно отметить, что величина прироста затрат энергии ниже при низкой молочной продуктивности и возрастает по мере ее роста. Это явление продемонстрировано в таблице 9.

По сравнению с содержанием энергии в самом приросте удоя, затраты на его образование составляют при невысокой продуктивности около 30 %, возрастая в изученном диапазоне до 58 %. Можно предполагать, что это связано с изменением спектра субстратов, использованных для синтеза веществ молока, и с возрастающими энергозатратами на сохранение гомеостаза организма. Примечательно, что отношение D (общая теплопродукция в тканях) / D (энергия удоя) с ростом удоя постепенно уменьшается в связи с тем, что доля затрат энергии на поддержание в общей теплопродукции становится все меньше.

Таблица 9. Увеличение затрат энергии в тканях всего организма (теплообразование) в расчете на единицу прироста энергии удою

| N п/п | Энергия удою, МДж | Разность (P ₁) между классами | Теплопродукция в тканях, МДж/сут | Разность (P ₂) между классами | Соотношение P ₂ /P ₁ |
|-------|-------------------|---|----------------------------------|---|--|
| 1 | -- | -- | 54,8 | -- | -- |
| 2 | 37,7 | -- | 80,4 | -- | -- |
| 3 | 46,0 | 8,3 | 82,9 | 2,5 | 0,30 |
| 4 | 54,4 | 8,4 | 85,8 | 2,9 | 0,34 |
| 5 | 62,8 | 8,4 | 88,7 | 2,9 | 0,34 |
| 6 | 71,1 | 8,3 | 91,2 | 2,5 | 0,30 |
| 7 | 79,5 | 8,4 | 92,9 | 1,7 | 0,20 |
| 8 | 87,9 | 8,4 | 95,8 | 3,1 | 0,37 |
| 9 | 96,2 | 8,3 | 100,0 | 4,2 | 0,51 |
| 10 | 104,6 | 8,4 | 105,5 | 5,5 | 0,58 |
| | | -- | | -- | -- |

ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы были проанализированы на стехиометрической основе конечные этапы энергетического обеспечения биосинтеза основных компонентов молока. При этом установлено, что синтез в клетках секреторного эпителия молочной железы жирных кислот из ацетата и бета-гидроксibuтирата путем удлинения углеродной цепи требует значительного расхода энергии в расчете на единицу массы продукта. Эти затраты приближаются к затратам при синтезе пептидных цепей, являющемся наиболее энергоемким.

Для калькуляции затрат макроэргических связей АТФ в процессах биосинтеза компонентов молока и теплообразования при ее генерации и использовании были разработаны соответствующие алгоритмы. В комплексе они позволяют прогнозировать базисные затраты энергии при биосинтезе молока любого состава. Однако фактические затраты энергии в молочной железе выше расчетных, которые не учитывают необходимость обеспечения ряда физиологических процессов, особенно поддержания ионных градиентов. Для большего приближения результатов прогноза к фактическим величинам в дальнейших исследованиях целесообразно использование дополнительных более специфических показателей, в частности поглощения молочной железой кислорода. Это позволит оценить объем окисления органических веществ в тканях железы.

В исследованиях была также дана количественная оценка генерации доминирующего энергетического метаболита у жвачных – ацетата за счет питательных веществ корма, прослежено его поглощение молочной железой из крови при варьировании условий питания и на основе проведенных разработок оценена доля ацетата, использованная для синтеза жирных кислот молока. Дополнительное введение ацетата обеспечило увеличение синтеза молочного жира.

Установленные различия в затрате энергии при синтезе веществ молока из разных предшественников позволяют предположить значение этого факта в механизме роста затрат энергии при синтезе дополнительного количества молока и при росте уровня кормления.

В целом проведенные исследования являются частью работы по созданию более совершенной системы питания жвачных животных, базирующейся на учете обеспеченности организма важнейшими субстратами. Работы в этом направлении постоянно ведутся в скандинавских странах и США. Без сомнения, данное направление можно считать прогрессивным и многообещающим в плане повышения эффективности использования кормов, сохранения здоровья коров и продления сроков их хозяйственного использования благодаря оптимизации кормления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АЛИЕВ, А., ДИМОВ, В., 1997. Обмен липидов. В: Обмен веществ у жвачных животных. Москва: Инженер, с. 161-231. ISBN 5-7013-0019-6.
2. ДЕГЛИ, С., НИКОЛЬСОН, Д., 1973. Метаболические пути. Москва: Мир. 310 с.
3. ДОСОН, Р., ЭЛЛИОТ, Д., ЭЛЛИОТ, У., ДЖОНС, К., 1991. Справочник биохимика. Москва: Мир. 544 с. ISBN 5-03-001032-7.
4. ЕРШОВ, Ю.А., МУШКАМБАРОВ, Н.Н., 1990. Кинетика и термодинамика биохимических и физиологических процессов. Москва: Медицина. 210 с.
5. ИВАНОВ, К.П., 1990. Основы энергетики организма: теоретические и практические аспекты. Т. 1. Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. Ленинград: Наука. 307 с. ISBN 5-02-025656-0.
6. ИВАНОВ, К.П., 1993. Основы энергетики организма: теоретические и практические аспекты. Т. 2. Биологическое окисление и его обеспечение кислородом. СПб.: Наука. 270 с. ISBN 5-02-025656-0.
7. КОТЫК, А., ЯНАЧЕК, А., 1980. Мембранный транспорт. Москва: Мир. 341 с.
8. ЛЕНИНДЖЕР, А., 1976. Биохимия. Москва: Мир. 960 с.
9. МАЛЕР, Г., КОРДЕС, Ю., 1970. Основы биологической химии, Москва: Мир. 568 с.
10. НАДАЛЬЯК, Е.А., АГАФОНОВ, В.И., РЕШЕТОВ, В.Б. и др., 1986. Изучение обмена энергии и энергетического питания у сельскохозяйственных животных: метод. указания. Боровск. 58 с.
11. РЕШЕТОВ, В.Б., 1998. Энергетический обмен у коров в связи с физиологическим состоянием и условиями питания : дис. ... д-ра биол. наук. Боровск. 441 с.
12. САПУНОВ, М.И., ЧЕРЕПАНОВ, Г.Г., 2002. Параметры, характеризующие развитие молочной железы и ее функциональную активность. В: С.-х. животные. Физиологические и биохимические параметры организма. Боровск, с. 170-182. ISBN 5-901656-04-0.
13. ТРОШИН, А.С., 1985. Распределение веществ между клеткой и средой, Л.: Наука. 192 с.
14. BAUMAN, D.E., BROWN, R.E., DAVIS, C.L., 1970. Pathways of fatty acid synthesis and reducing equivalent generation in mammary gland of rat, sow, and cow. In: Archives of Biochemistry and Biophysics, nr 140, pp. 237-244. ISSN 0003-9861.
15. CHRISTIE, W.W., 1984. The biosynthesis of milk lipids. In: Food Science and Technology. Present status and future direction, vol. 5, pp. 261-272.
16. SCOTT, R.A., BEUMAN, D.E., CLARK, J.H., 1976. Cellular gluconeogenesis by lactating bovine mammary tissue. In: Journal of Dairy Science, vol. 59, pp. 50-56.

Data prezentării articolului: 03.08.2014

Data acceptării articolului: 03.11.2014