СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ БИОЛОГИЯ, 2020, том 55, № 4, с. 714-725

Физиология, биохимия, питание

УДК 636.2:591.132:57.01 doi: 10.15389/agrobiology.2020.4.714rus

Светлой памяти нашего Учителя
Василия Васильевича Цюпко посвящается

РАЗМЕР ЧАСТИЦ ПИЩИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЕЕ СТРУКТУРНОСТИ И КЛЮЧЕВОЙ АСПЕКТ РАЗВИТИЯ ПАРАДИГМЫ ТЕОРИИ ПИТАНИЯ

Н.В. ВАСИЛЕВСКИЙ, Т.А. ЕЛЕЦКАЯ

Применение в животноводстве современных машин для заготовки кормов и новых технологий приготовления и скармливания рационов обострило проблему соотношения в них достаточно крупных частиц, способных поддерживать необходимую моторику пищеварительного тракта, и относительно мелких, обеспечивающих высокое потребление сухого вещества и его переваримость. В представленной работе нами впервые получены данные о взаимосвязи размеров частиц рациона, содержимого желудочно-кишечного тракта и кала у крупного рогатого скота. На основе определения среднего размера частиц и содержания сухого вещества предложен способ оценки структурности кормов. В парадигму теории питания введено понятие информационной компоненты пищи и определение нормированного кормления. Цель работы — изучить влияние размера частиц рациона на размер частиц содержимого желудочно-кишечного тракта и кала крупного рогатого скота; оценить взаимосвязь этих показателей с переваримостью основных групп питательных веществ; разработать методический подход к нормированию структурности рациона; дополнить теорию нормированного кормления необходимыми понятиями. Исследования проводили в Институте животноводства Украинской академии аграрных наук в 2017-2019 годах на двух телках (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы (живая масса 350 кг) с дуоденальной шлюзируемой канюлей начала 12-перстной кишки и рубцовой канюлей большого диаметра. Животных кормили дважды в сутки (в 8^{00} и 17^{00}) равными долями. Поток химуса измеряли в течение 9 ч после утреннего кормления. Поступление химуса в 12-перстную кишку измеряли в течение 14 сут (n = 6). Между измерениями делали перерывы на 1-2 сут. Пробы содержимого рубца отбирали через канюлю диаметром 100 мм из срединной части рубцового мата в 3-кратной повторности с интервалом 3 ч в промежутке между утренним и вечерним кормлением. Применяли методику проведения балансовых опытов с одновременной оценкой потока дуоденального химуса, отбором образцов рубцового содержимого, дуоденального химуса и кала. Основной рацион животных состоял из сена, силоса, концентратов и обеспечивал поддержание основного обмена. Остальные рационы получали посредством замены одного или двух компонентов основного рациона дополнительным количеством оставшихся компонентов, равным по величине содержанию сухого вещества взаимозаменяемых кормов. Средний размер частиц кормов определяли методом среднего арифметического взвешенного посредством ручного разбора и сухого просеивания, а отобранных биологических образцов — методом мокрого просеивания. Вычисляли обменную энергию рационов. Установлено, что при увеличении среднего размера частиц рациона средний размер частиц в рубце, химусе и кале уменьшался. Средний размер частиц в рубце (8,68±0,49 мм, n = 31) был на порядок больше, чем в дуоденальном химусе и кале, что свидетельствует о наиболее интенсивном измельчении пищи в преджелудках. Средний размер частиц в кале (1,09±0,06 мм, n = 19, 0,1 > p > 0,05) превышал средний размер частиц в дуоденальном химусе (0,99±0,05 мм, n = 31), что свидетельствует о преимущественном переваривании в кишечнике мелкой фракции и формировании каловых масс из крупной фракции химуса. Показатель структурности пищи в наших исследованиях составлял 0,12-0,92 кг·м/сут, содержимого рубца — 0,033-0,062 кг·м/сут, дуоденального химуса — 0,0031-0,0057 кг·м/сут, кала — 0,0019-0,0028 кг·м/сут. Выявлена связь между структурностью рациона, доступностью сырого протеина для переваривания в кишечнике и размером частиц кала, что теоретически предполагает возможность оценки состояния пищеварительных процессов на основе гранулометрических параметров кала. На основании полученных данных обсуждается наличие факторов, которые влияют на переваривание и усвоение рациона, но при этом их эффект невозможно оценить в классическом балансовом эксперименте по разнице между количеством потребленных кормов и выделенных неутилизированных (непереваренных) остатков. Предложено обозначать эти факторы термином информационная компонента пищи, расширив таким образом понятие комплексной структурности пищи. Одна часть этой компоненты представлена различными биологически активными веществами — как входящими в состав самой пищи, так и образующимися в процессе жизнедеятельности микрофлоры желудочно-кишечного тракта. Другая часть включает физические параметры пищи (температура, влажность, размер и жесткость частиц) и факторы непищевой природы (кратность и регулярность кормления, фазированное кормление, звуковые, световые и другие волновые воздействия). Сформулировано определение нормированного питания как процесса материально-информационного обмена между внешней средой и организмом, обеспе-

чивающего полноценную продуктивную жизнедеятельность.

Ключевые слова: средний размер частиц пищи, структурность пищи, информационная компонента пищи, нормированное кормление, теория питания.

В практике кормления крупного рогатого скота в настоящее время широкое распространение получила технология полносмешанного рациона (1, 2). Обладая рядом неоспоримых преимуществ, эта технология включает несколько важных аспектов, игнорирование которых может негативно отразиться на здоровье и продуктивности животных. В первую очередь это касается равномерности смешивания и степени измельчения крупностебельчатых кормов (3). Плохо измельченные части кормов не позволяют добиться необходимой равномерности смешивания, которая требуется, чтобы исключить выборочное поедание животными отдельных компонентов смеси (4). Чрезмерное измельчение ведет к снижению эффективного воздействия пищи на рецепторы пищеварительной системы и, как следствие, уменьшению скорости переваривания и продвижения масс по пищеварительному тракту, вплоть до нарушений пищеварения (5-7). Для оценки способности суточного рациона поддерживать необходимую стимуляцию моторики пищеварительного тракта используют понятие структурности пищи. Влияние структурности на интенсивность пищеварительных процессов может быть охарактеризована степенью измельчения кормов, выраженной через средний размер частиц рациона; частотой и продолжительностью румигации и жевания; плотностью рубцового мата; степенью переваривания сухого вещества; содержанием нейтрально-детергентной, кислотно-детергентной или сырой клетчатки (8). Некоторые исследователи используют безразмерные показатели — проценты или доли по отношению к эталонному корму (9).

В представленной работе нами впервые получены данные о взаимосвязи размеров частиц рациона, содержимого желудочно-кишечного тракта и кала у крупного рогатого скота. На основе определения среднего размера частиц и содержания сухого вещества предложен способ оценки структурности кормов. В парадигму теории питания введено понятие информационной компоненты пищи и определение нормированного кормления.

Цель работы — изучить влияние размера частиц рациона на размер частиц содержимого желудочно-кишечного тракта и кала у крупного рогатого скота; оценить взаимосвязь этих показателей с переваримостью основных групп питательных веществ; разработать методический подход к нормированию структурности рациона; дополнить теорию нормированного кормления необходимыми понятиями.

Методика. Исследования проводили в Институте животноводства Украинской академии аграрных наук в 2017-2019 годах на двух телках (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы с живой массой 350 кг с дуоденальной шлюзируемой канюлей начала 12-перстной кишки и рубцовой канюлей большого диаметра. Конструкция канюль обеспечивала сбор поступающего из сычуга в дуоденум химуса, его учет и возврат в пищеварительную систему (10). Животных кормили дважды в сутки (в 8^{00} и 17^{00}) равными долями. Поток химуса измеряли в течение 9 ч после утреннего кормления. Полученные значения объема химуса за 9 ч экстраполировали на суточный интервал, что позволяло рассчитывать переваримость питательных веществ в сложном желудке после химического анализа отобранных проб химуса и кормов рациона.

Адаптация пищеварения телок к изучаемому рациону происходила за 14 сут. Затем в течение 14 сут измеряли поступление химуса в 12-перстную кишку (n = 6). Между измерениями делали перерывы на 1-2 сут для

отдыха животных. Пробы содержимого рубца отбирали через канюлю диаметром 100 мм из срединной части рубцового мата в 3-кратной повторности с интервалом 3 ч в промежутке между утренним и вечерним кормлением. Опыты осуществляли согласно методике проведения балансовых опытов с одновременной оценкой потока дуоденального химуса, отбором образцов рубцового содержимого, дуоденального химуса и кала.

Состав кормов, содержимого желудочно-кишечного тракта и кала оценивали согласно принятым методикам анализа (11). Основной рацион состоял из сена, силоса, концентратов и обеспечивал поддержание основного обмена. Остальные рационы получали посредством замены одного или двух компонентов основного рациона дополнительным количеством оставшихся компонентов, равным по величине содержанию сухого вещества взаимозаменяемых кормов. Созданная схема планирования исследований позволяла проводить статистическую обработку полученных результатов дисперсионным методом для оценки степени влияния отдельных компонентов рациона на показатели структурности химуса и кала, а также переваримости основных групп питательных веществ.

Средний размер частиц кормов определяли методом среднего арифметического взвешенного посредством ручного разбора и сухого просеивания, а отобранных биологических образцов — методом мокрого просеивания (12).

Обменную энергию (ОЭ) рационов вычисляли по формуле:

$$ОЭ = 14{,}46 - 0{,}0007 \times СП + 0{,}0168 \times СЖ - 0{,}0192 \times СК - 0{,}00028 \times БЭВ,$$

где СП, СЖ, СК, БЭВ — соответственно содержание сырого протеина, сырого жира, сырой клетчатки и безазотистых экстрактивных веществ в рационе, г/кг сухого вещества (СВ) рациона. Доступность питательных веществ в тонком кишечнике рассчитывали по формуле:

$$b = C/A \times 100\ \%,$$

где С — количество питательного вещества, поступившего в тонкий кишечник за сутки, А — количество питательного вещества, потребленного с кормом за сутки (13).

Статистические расчеты, построение графиков и диаграмм проводили с помощью пакета лицензионных программ Office Standard 2010 32-bit Russian (лицензия GGWA-A) (https://www.microsoft.com/ru-ru/download/office.aspx) методами дисперсионного анализа. Вычисляли средние арифметические значения (*M*) и стандартные ошибки среднего (±SEM). Достоверность различий оценивали с помощью парного *t*-критерия Стьюдента и методом сопряженных рядов (прямой разницы).

Результаты. В таблицах 1 и 2 представлены состав и характеристика шести рассчитанных рационов, которые скармливали подопытным телкам.

1. Состав рационов (кг натурального корма/сут), **которые потребляли телки (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы** (Институт животноводства Украинской академии аграрных наук, 2017-2019 годы)

Корм	№ рациона					
	1	2	3	4	5	6
Силос	16,00	20,00	24,40	19,74	–	–
Сено	2,00	3,00	–	–	8,39	4,14
Концентраты	2,00	–	–	2,96	–	4,04

Примечание. Прочерки означают, что соответствующие компоненты не входили в состав рациона.

Средний размер частиц содержимого рубца, дуоденального химуса и кала снижался по мере увеличения среднего размера частиц рациона (рис. 1). Была установлена обратная зависимость между размерами частиц

пищи и содержимого пищеварительного тракта. Наклон линейной регрессии оказался близок для химуса и кала (соответственно –0,0044 и –0,0048 мм/мм), для содержимого рубца степень влияния размера частиц пищи была на порядок выше (–0,0479). Средний размер частиц кала был несколько выше среднего размера частиц дуоденального химуса — соответственно 1,09±0,06 и 0,99±0,05 мм. Статистическая обработка всего массива частиц показала разницу на уровне тенденции в их размерах в химусе и кале ($0,1 > p > 0,05$). Применение метода сопряженных рядов (прямой разницы) к тем же данным выявило достоверную разницу ($p < 0,05$). Вероятнее всего, в тонком и толстом кишечнике происходит преимущественное переваривание и исчезает относительно мелкая фракция частиц химуса, а каловые массы в прямой кишке формируются из оставшейся более крупной фракции.

2. Характеристика рационов, которые потребляли телки (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы (Институт животноводства Украинской академии аграрных наук, 2017-2019 годы)

№ рациона	Сухое вещество, г	Сырая клетчатка, г	Сырой протеин		Обменная энергия		Обеспеченность основного обмена, МДж/кг
			всего, г	концентрация, %	всего, МДж	концентрация, МДж/кг	
1	7685	1690	593	7,71	77,76	10,12	0,80
2	7894	2137	523	6,62	85,17	10,79	0,87
3	6666	1698	444	6,66	69,80	10,47	0,71
4	7899	1492	649	8,21	82,62	10,46	0,85
5	6797	2083	444	6,53	67,61	9,95	0,69
6	6775	1190	614	9,06	66,22	9,77	0,68

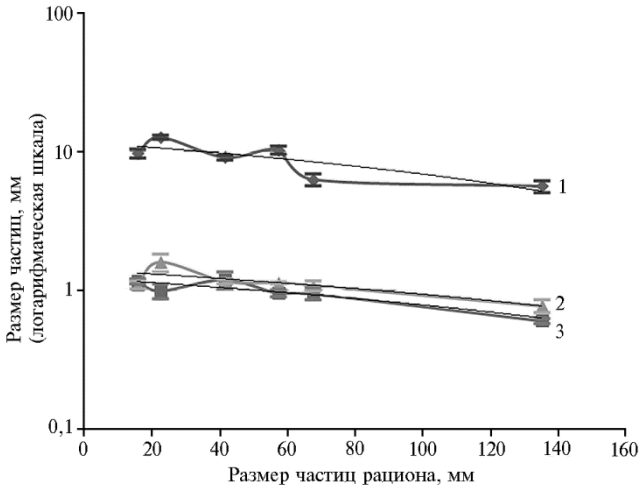


Рис. 1. Размер частиц содержимого рубца (1)**, химуса** (2) **и кала** (3) **у телок (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы в зависимости от размера частиц рациона** (*M*±SEM, Институт животноводства Украинской академии аграрных наук, 2017-2019 годы). Линейная регрессия для рубца — $y = –0,0479x + 11,624$, $R^2 = 0,6311$; для химуса — $y = –0,0044x + 1,2185$, $R^2 = 0,806$; для кала — $y = –0,0047x + 1,3979$, $R^2 = 0,5951$. Описание рационов и условия проведения опытов см. в разделе «Методика».

Несмотря на то, что средний размер частиц пищи оказывает существенное влияние на активацию рецепторов пищеварительного тракта, он не может служить адекватной мерой структурности, поскольку продолжительность и степень воздействия зависят также от числа частиц. В связи с этим для оценки структурности мы использовали показатель, рассчитанный как произведение среднего размера частиц (м) на общее количество сухого вещества (кг) в суточном рационе, содержимом желудочно-

кишечного тракта или кале (табл. 3).

3. Размер частиц и структурность рациона, содержимого желудочно-кишечного тракта и кала у телок (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы (*M*±SEM, Институт животноводства Украинской академии аграрных наук, 2017-2019 годы)

Анализируемый образец	№ рациона					
	1	2	3	4	5	6
	Размер частиц, мм					
Рацион	41,48	57,13	22,43	15,65	135,14	67,43
Рубец	9,05±0,32	10,26±0,67	12,61±0,36	9,69±0,75	5,60±0,55	6,28±0,62
Химус	1,19±0,16	0,95±0,05	0,99±0,12	1,16±0,04	0,60±0,03	0,94±0,10
Кал	1,15±0,04	1,13±0,02	1,58±0,22	1,10±0,07	0,77±0,08	1,08±0,09
	Структурность, кг · м/сут					
Рацион	0,319	0,451	0,150	0,120	0,919	0,457
Рубец	0,051	0,060	0,062	0,061	0,033	0,039
Химус	0,0043	0,0036	0,0032	0,0057	0,0031	0,0052
Кал	0,0031	0,0025	0,0033	0,0030	0,0019	0,0029

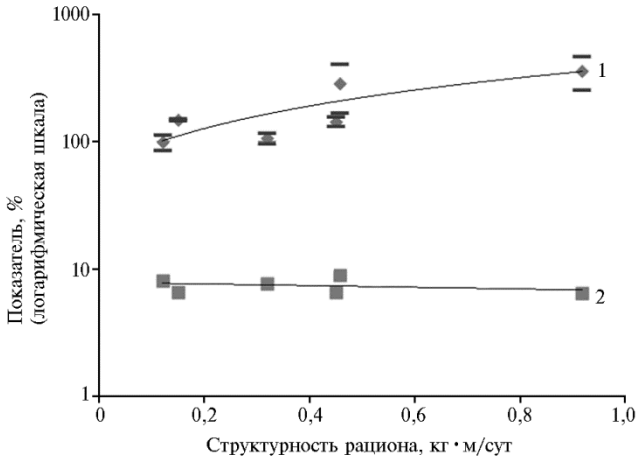


Рис. 2. Доступность для переваривания в кишечнике (1) **и содержание** (2) **сырого протеина в зависимости от структурности рациона, который потребляли телки (*Bos taurus taurus*) украинской красно-пестрой породы** (*M*±SEM, Институт животноводства Украинской академии аграрных наук, 2017-2019 годы). Линейная регрессия для доступности сырого протеина — $y = 314{,}53x + 63{,}298$, $R^2 = 0{,}74$; для содержания сырого протеина — $y = -1{,}101x + 7{,}9101$, $R^2 = 0{,}0946$. Описание рационов и условия проведения опытов см. в разделе «Методика»

С увеличением структурности рациона структурность содержимого рубца и кала понижалась (степень детерминации соответственно $R^2 = 0{,}61$ и $R^2 = 0{,}86$). Регрессионный анализ показателей структурности рациона, с одной стороны, и переваримости в рубце, а также видимой переваримости по всему желудочно-кишечному тракту — с другой, показал отсутствие связи для всех основных групп питательных веществ, за исключением сырого протеина (отрицательная связь с $R^2 = 0{,}73$ и $R^2 = 0{,}74$). Причем это не становилось следствием некоторых колебаний по содержанию сырого протеина в рационе (см. табл. 2), поскольку изменения структурности рационов и количество сырого протеина в них не были взаимосвязаны ($R^2 = 0{,}20$). Поступление сырого протеина в 12-перстную кишку оказалось выше его количества, принятого с кормом, за счет интенсивного микробиального синтеза из эндогенных источников азота. Увеличение структурности с высокой степенью детерминации ($R^2 = 0{,}74$) приводило к повышению доступности сырого протеина для переваривания в кишечнике (поступление в 12-перстную кишку в процентах по отношению к потребленному с рационом) (рис. 2). Увеличение поступления сырого протеина в

кишечник обусловило некоторое снижение его видимой переваримости по всему желудочно-кишечному тракту. Следовательно, в изученном нами диапазоне средних размеров частиц рациона повышение структурности не вызывало существенных изменений в переваримости основных групп питательных веществ при некотором улучшении условий синтеза микробиального сырого протеина в рубце.

Доступность сырого протеина для переваривания в кишечнике — это показатель интенсивности микробиальных процессов в рубце. Ее повышение может также косвенно свидетельствовать об ускорении фракционного оттока из рубца. То есть структурность рациона, с одной стороны, оказывает определяющее влияние на структурность и размер частиц кала, с другой — на доступность сырого протеина для переваривания в кишечнике. В связи с этим был рассмотрен вопрос о взаимосвязи между размером частиц кала и доступностью сырого протеина для переваривания в кишечнике. Полученное значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,37$) показало умеренную степень взаимозависимости по шкале Чеддока (Cheddock scale) между этими показателями.

Представленные нами результаты не позволяют выявить оптимальный с точки зрения условий пищеварения диапазон структурности рациона, поскольку потребление энергии на единицу обменной массы у прооперированных животных не может достигать величин, свойственных для молодняка крупного рогатого скота на откорме и тем более для лактирующих коров. Предложенный методический подход для оценки структурности рациона дает возможность соотносить показатели, характеризующие пищеварительные процессы, и структурные свойства пищи. Исследования на высокопродуктивных животных необходимы для разработки системы нормирования структурности кормов и рационов для крупного рогатого скота. Основная трудность при этом состоит в том, что размеры и форма частиц не могут быть рассмотрены в рамках теории сбалансированного питания как компонент пищи, который в результате переваривания и всасывания усваивается организмом и расходуется в процессе жизнедеятельности. Тем не менее воздействие этого фактора на процесс пищеварения не вызывает сомнения и вопрос оценки структурности кормов и рационов для крупного рогатого скота включен в некоторые современные системы нормирования (9, 14).

Исследуя переваримость питательных веществ из кормосмесей, одинаковых по химическому составу, но различающихся по степени измельчения грубых кормов (15), мы обнаружили существенное влияние фактора структурности (размера частиц и их способности противостоять механическому измельчению при пережевывании) на процессы пищеварения у жвачных. Вместе с тем структурность пищи не может быть оценена в классическом балансовом опыте по разнице потребления и выделения с калом и мочой. «Видимо исчезнувшая» структурность не всасывается во внутреннюю среду организма вместе с составляющими ее переваренными компонентами, тем не менее выделенная с калом «неусвоенная структурность» оказывает воздействие на пищеварительные процессы. Следовательно, понятие структурности не соответствует главному положению теории сбалансированного питания, согласно которому питательная ценность пищи определяется только ее усваиваемыми компонентами.

В своих работах академик А.А. Покровский (16, 17) отмечает, что питание — это сложный и многосторонний процесс, главная цель которого заключается в обеспечении роста и развития детского организма, макси-

мальной работоспособности и хорошего самочувствия в зрелом возрасте, долголетия и здоровья — в пожилом и в старческий период. Питание — источник эстетического наслаждения и важный лечебный фактор (16, 17). По мнению автора, оно не только должно компенсировать расходы организма на поддержание витальных функций (а у сельскохозяйственных животных — также продуктивности), но и обеспечивать эмоциональную и лечебную составляющую.

В работах А.М. Уголева с соавт. (18, 19) показано участие желудочно-кишечного тракта в формировании индивидуального гормонального профиля организма, причем в доле, доходящей до 50 % от общего количества гормонов. Это означает, что пища посредством формирования гормонального паттерна вовлечена в регуляцию экспрессии генов, а значит, влияет на то, каким образом будет сформирован конкретный фенотипический образ организма. Иными словами, в вопросах питания нельзя ограничиваться только рассмотрением роли нутриентов в обеспечении эндогенных метаболических процессов организма экзогенными субстратами, необходимо также учитывать регуляторную функцию пищи, проявляющуюся на нейрогуморальном уровне.

В рамках существующей парадигмы теории питания невозможно объяснить эффект фазового кормления, которое иногда используют при откорме молодняка крупного рогатого скота. Суть метода заключается в периодическом изменении нормы выдачи рациона на 10-20 % попеременно в большую и меньшую сторону от 100 % потребности. Такой прием достоверно повышает прирост живой массы в сравнении с постоянной 100 % выдачей рациона (20, 21).

Другим примером противоречия практики нормированного кормления и положений теории сбалансированного (адекватного) питания может служить обмен кальция в организме. Известно, что усваивание этого элемента критически зависит от наличия витамина D (22, 23). Синтез витамина D, в свою очередь происходит при воздействии на организм ультрафиолетового облучения (24, 25). То есть солнечный свет или другой источник ультрафиолета должен учитываться в качестве элемента питания.

Нынешний этап развития науки о питании характеризуется значительным накоплением фактов, которые не укладываются в рамки общепринятой концепции — классической теории сбалансированного питания. На наш взгляд, эта информация достигла критической массы и созданы предпосылки для формирования иных взглядов на теорию питания и, соответственно, подходов к нормированному кормлению животных. Наиболее подробно критика теории сбалансированного питания рассмотрена в работе А.М. Уголева (26). Тем не менее до настоящего времени не существует общепризнанной альтернативы теории сбалансированного питания и, за исключением некоторых работ (27), большинство специалистов, занимающихся разработкой норм и вопросами питания, рассматривают пищеварение и ассимиляцию питательных веществ в парадигме теории сбалансированного питания. Это выражается в первую очередь в том, что во всех современных системах нормированного кормления сельскохозяйственных животных процесс нормирования рассматривается как компенсация расходов организма на поддержание жизнедеятельности и обеспечение продуктивности.

Поток веществ, жизненно важный для организма и поступающий из переваренных компонентов пищи, кроме пластических и энергетических составляющих, на которые традиционно проводится их условное деление,

содержит вещества с нулевой, а зачастую с отрицательной энергетической ценностью, метаболизация которых сопряжена с дополнительными энергетическими затратами. Кроме того, пища обладает способностью воздействовать на организм не только через питательные вещества, но и посредством других факторов химической и физической природы. Причем такое воздействие приводит не только к изменениям в переваривании и усваивании компонентов самой пищи, но и оказывает влияние на другие жизненно важные функции организма, вплоть до изменения гормонального профиля и регуляции репликации генома (18, 19, 26).

Мы полагаем, что описанные проблемы могут быть легко разрешены, если признать существование информационных потоков, направленных как во внутреннюю среду организма, так и из нее. При этом особую роль в пищеварении играет обмен сигналами с энтеральной средой, частично обособленной от «истинно внешней». По нашему мнению, парадигма теории питания должна быть расширена рядом понятий, характеризующих такой информационный обмен.

Очевидно, что посредством комплексного управления практически не учитываемыми в настоящее время факторами можно с желаемым эффектом влиять на физиологические и биохимические процессы в организме. К таким факторам относятся не только химические (биологически активные вещества, фитогормоны, нейропептиды, некоторые аминокислоты, жирные кислоты и т.д.) и физические (температура, влажность, размер и жесткость частиц) параметры самой пищи, но и кратность, регулярность кормления, фазированное кормление, звуковые и световые эффекты. В совокупности мы предлагаем называть их информационной компонентой пищи, без нормирования которой невозможно наладить кормление животных, в особенности высокопродуктивных.

Исходя из практических задач, можно ограничить рамки общей теории питания понятием нормированного кормления. В этом случае взамен постулатов теорий сбалансированного питания и адекватного питания (26) мы предлагаем следующее определение, вводящее необходимые и достаточные основополагающие понятия. Нормированное питание — это процесс материально-информационного обмена между внешней средой и организмом, обеспечивающий полноценную продуктивную жизнедеятельность последнего. Понятие «материально-информационный обмен» означает, что в этот процесс вовлечены как собственно нутриенты корма и его непереваренные остатки, удаляемые из организма, так и информационные сигналы от химических агентов и физических факторов, связанных с пищей (некоторые аминокислоты, гормоны и гормоноподобные вещества, биологически активные вещества; структурность пищи, регулярность и объем выдачи порций), и от факторов непищевой природы (инсоляция, температура и влажность, акустическое сопровождение процесса кормления).

Процесс обмена информацией сопровождается изменением информационного состояния организма. Для оценки информационного состояния применяется термин «стресс». Выделяют три стадии развития стресса: мобилизация адаптационных возможностей организма (стадия тревоги), сбалансированное расходование адаптационных резервов (стадия резистентности), стадия истощения (28). При этом под истощением понимают не расходование метаболических ресурсов, а некую «усталость» нервной или, скорее, нейрогуморальной системы. В настоящее время принято оценивать стресс по влиянию стресс-фактора на активацию гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси (HPA-axis) (29). У разных видов

животных, в том числе жвачных, повышенная активность оси HPA обычно наблюдается в связи с острым стрессом и направлена на мобилизацию ресурсов организма для преодоления последствий воздействия стресс-фактора. Кортиколиберин (пептидный гормон, секретируемый нейроэндокринными клетками гипоталамуса) на уровне центральной нервной системы участвует в регулировании потребления корма, а также в поведенческих реакциях на стресс (30, 31). В то же время при повторном или долгосрочном воздействии стрессоров у жвачных животных регуляция оси HPA не совсем понятна и может осуществляться как надпочечниками (32), так и гипофизом (33). В настоящее время преимущественное внимание сосредоточено на изучении воздействия питания на реактивность оси HPA у жвачных с целью оптимизации числа животных в производственной группе, пространства для их кормления и отдыха (34, 35). По нашему мнению, эти исследования представляют особый интерес в связи с разработки методологии оценки текущего состояния организма.

Значительная часть информационного потока из организма направлена в просвет желудочно-кишечного тракта и взаимодействует с обитающей там микрофлорой, которая, в свою очередь, взаимодействует с макроорганизмом, вырабатывая определенные сигнальные вещества (и вполне вероятно, посредством других каналов связи).

Осуществление полноценной жизнедеятельности означает расходование энергии и метаболитов, полученных с пищей, на поддержание витальных функций, физической и интеллектуальной активности, на увеличение массы тела, рост и развитие, на репродукцию (у сельскохозяйственных животных — также на обеспечение продуктивности в соответствии с целями разведения) в течение достаточно продолжительного времени без ущерба для организма.

В существующих нормах по питанию человека и кормлению сельскохозяйственных животных практически отсутствует проработка вопроса нормирования информационного потока, сопровождающего процессы кормления и пищеварения. В основном информационная компонента частично нормируется медицинскими и ветеринарными регламентами, санитарными нормами и требованиями к условиям труда и жизнедеятельности человека, а также зоотехническими требованиями к условиям содержания сельскохозяйственных животных. Сам подход к нормированию в настоящее время можно охарактеризовать как детерминистский в том смысле, что, согласно ему, для производства некоторого количества продукции животному априори требуются определенные условия содержания, количество энергии и пластических веществ. При этом не принимаются во внимание ни индивидуальные, ни адаптационные возможности организма. Очевидно, что первоочередной задачей при разработке систем нормированного кормления должно быть не создание усредненных норм потребности, а разработка методов оценки и прогноза состояния объекта управления — организма животного (36).

Итак, классическая теория сбалансированного (адекватного) питания требует коррекции с включением в ее парадигму понятий информационной компоненты пищи и циркуляции информации между средой и организмом. Структурность может быть выражена как произведение среднего размера частиц и содержания сухого вещества оцениваемого объекта (пищи, химуса, кала). В изученном нами диапазоне средний размер частиц рациона и его структурность связаны со средним размером и структурностью содержимого желудочно-кишечного тракта и кала обратной зависимостью. Не

установлено связи между средним размером частиц рациона, структурностью пищи и содержимого рубца, с одной стороны, и продолжительностью жвачки или количеством сокращений рубца — с другой. Повышение структурности не оказало существенного влияния на переваримость основных групп питательных веществ корма при некотором улучшении условий синтеза микробиального сырого протеина в рубце.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moya D., Mazzenga A., Holtshausen L., Cozzi G., González L.A., Calsamiglia S., Gibb D.G., McAllister T.A., Beauchemin K.A., Schwartzkopf-Genswein K. Feeding behavior and ruminal acidosis in beef cattle offered a total mixed ration or dietary components separately. *Journal of Animal Science*, 2011, 89(2): 520-530 (doi: 10.2527/jas.2010-3045).
2. Харитонов Е. Современные проблемы при организации нормированного питания высокопродуктивного молочного скота. *Мясное и молочное скотоводство*, 2010, 1: 16-17.
3. Tylutki T.P., Fox D.G., Durbal V.M., Tedeschi L.O., Russell J.B., Van Amburgh M.E., Overton T.R., Chase L.E., Pell A.N. Net carbohydrate and protein system: a model for precision feeding of dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, 143(1): 174-202 (doi: 10.1016/j.anifeedsci.2007.05.010).
4. Hutjens M.F. Is a one TMR approach right? *Western Dairy Management Conference*. Reno, 2012: 195-190.
5. Fahey G.C., Novotny L., Layton B., Mertens D.R. Critical factors in determining fiber content of feeds and foods and their ingredients. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 2019, 102(1): 52-62 (doi: 10.5740/jaoacint.18-0067).
6. Beauchemin K.A., Rode L.M., Eliason M.V. Chewing activities and milk production of dairy cows fed alfalfa as hay, silage, or dried cubes of hay or silage. *J. Dairy Sci.*, 1997, 80(2): 324-333 (doi: 10.3168/jds.S0022-0302(97)75942-3).
7. Beauchemin K.A., Yang W.Z. Effects of physically effective fiber on intake, chewing activity, and ruminal acidosis for dairy cows fed diets based on corn silage. *J. Dairy Sci.*, 2005, 88(6): 2117-2129 (doi: 10.3168/jds.S0022-0302(05)72888-5).
8. Woolpert M.E., Dann H.M., Cotanch K.W, Melilli C., Chase L.E., Grant R.J. Management practices, physically effective fiber, and ether extract are related to bulk tank milk de novo fatty acid concentration on Holstein dairy farms. *J. Dairy Sci.*, 2017, 100(6): 5097-5106 (doi: 10.3168/jds.2016-12046).
9. Weiß H. von J., Pabst W., Granz S. *Tierproduktion*. Stuttgart, 2011.
10. Алиев А.А. *Новейшие оперативные методы исследования жвачных животных*. М., 1985.
11. Влізло В.В., Федорук Р.С., Ратич І.Б., Віщур О.І., Шаран М.М., Вудмаска І.И., Федорович Є.Ш., Остапів Д.Д., Сталай П.В., Бучко О.М., Гунчак А.В., Салига Ю.Т., Стефанишин О.М., Гевкан І.І., Лесик Я.В., Сімонов М.Р., Невоструєва І.В., Хомин М.М., Смолянінов К.Б., Гавриляк В.В., Колісник Г.В., Петрух І.М., Брода Н.А., Лучка І.В., Ковальчук І.І., Кропивка С.Й., Параняк Н.М., Ткачук В.М., Храбко М.І., Штапенко О.В., Дзень Є.О., Максимович І.Я., Федорович В.В., Юськів Л.Л., Долайчук О.П., Іваницька Л.А., Сірко Я.М., Кисців В.О., Загребельний О.В., Сімонов Р.П., Стояновська Г.М., Кирилів Б.Я., Кузів М.І., Майор Х.Я., Кузьміна Н.В., Талоха Н.І., Лісна Б.Б., Климишин Д.О., Чокан Т.В., Камінська М.В., Козак М.Р., Олійник А.В., Голова Н.В., Дубінський В.В., Іскра Р.Я., Рівіс Й.Ф., Цепко Н.Л., Кишко В.І., Олексюк Н.П., Денис Г.Г., Сливчук Ю.І., Мартин Ю.В. *Лабораторні методи досліджень у біології, тваринництві та ветеринарній медицині: Довідник* /За ред. В.В. Влізла. Сполом, Львів, 2012.
12. Василевский Н.В., Елецкая Т.А., Гребень Л.Г., Берестовая Л.Е. К вопросу о выборе адекватной процедуры статистического анализа при определении размеров частиц измельченных кормов для крупного рогатого скота. *Проблемы биологии продуктивных животных*, 2017, 2: 88-100.
13. Nehring K., Schiemann R., Hoffman L. A new system of energetic evaluation of food on basis of net energy for fattening. In: *Energy metabolism of farm animals*. Oriel Press, London, 1969.
14. National Research council. *Nutrient requirements for dairy cattle: seventh revised edition*. The National Academies Press, Washington DC, 2001: 381-333 (doi: 10.17226/9825).
15. Василевский Н., Елецкая Т., Цюпко В., Берестовая Л. Влияние технологии скармливания кормов и уровня сырого протеина в рационе на переваримость питательных веществ у коров. *Проблемы биологии продуктивных животных*, 2013, 1: 67-74.
16. Покровский А.А. *Беседы о питании*. М., 1964.
17. Покровский А.А. *Метаболические аспекты фармакологии и токсикологии пищи*. М., 1979.
18. Уголев А. М. *Энтериновая (кишечная гормональная) система*. Л., 1978.
19. Уголев А.М., Лабушева М.А., Вахрушев Я.М. Кишечная гормональная система и

специфическое динамическое действие пищи. *Физиологический журнал СССР им. И.М. Сеченова*, 1989, 75(5): 609-618.
20. Медведев А.Ю. *Усовершенствование энергосберегающей технологии производства говядины в молочном скотоводстве. Докт. дис.* Луганск, 2015.
21. Лейбина Т.И. Показатели крови бычков при разных ритмах фазового кормления. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*, 2015, 1: 171-174.
22. Meena K., Khazai N.B., Ziegler T.R., Nanes V.S., Abrams S.A., Tangpricha V. Vitamin D-mediated calcium absorption in patients with clinically stable Crohn's disease: a pilot study. *Mol. Nutr. Food Res.*, 2010, 54(8): 1085-1091 (doi: 10.1002/mnfr.200900351).
23. Kaushik R., Sachdeva B., Arora S., Kapila S., Wadhwa B.K. Bioavailability of vitamin D_2 and calcium from fortified milk. *Food Chemistry*, 2014, 147: 307-11 (doi: 10.1016/j.foodchem.2013.09.150).
24. Nelson C.D., Powell J.L., Price D.M., Hersom M.J., Yelich J.V., Drewnoski M.E., Bird S.L., Bridges G.A. Assessment of serum 25-hydroxyvitamin D concentrations of beef cows and calves across seasons and geographical locations. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(9): 3958-3965 (doi: 10.2527/jas.2016-0611).
25. Holcombe S.J., Wisnieski L., Gandy J., Norby B., Sordillo L.M. Reduced serum vitamin D concentrations in healthy early-lactation dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(2): 1488-1494 (doi: 10.3168/jds.2017-13547).
26. Уголев А.М. *Теория адекватного питания и трофология*. Л., 1991.
27. Василевская Л.С. Современные представления о распространенных «альтернативных» диетах. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*, 2001, 11(4-приложение № 14 Мат. XVI сессии Академической школы-семинара имени А.М. Уголева «Современные проблемы физиологии и патологии пищеварения», Пущино-на-Оке, 14-17 мая 2001 года): 148-155.
28. Sandor S., Yoshida M., Filakovszky J., Juhasz G. «Stress» is 80 years old: from Hans Selye original paper in 1936 to recent advances in gi ulceration. *Current Pharmaceutical Design*, 2017, 23(27): 4029-4041 (doi: 10.2174/1381612823666170622110046).
29. Robert L Spencer R.L., Deak T. A users guide to HPA axis research. *Physiology & Behavior,* 2017, 178: 43-65 (doi: 10.1016/j.physbeh.2016.11.014).
30. Dunn A.J., Berridge C.W. Physiological and behavioural responses to corticotrophin-releasing factor administration: is CRF a mediator of anxiety or stress responses? *Brain Research Reviews,* 1990, 15(2): 71-100 (doi: 10.1016/0165-0173(90)90012-d).
31. Koob G.F. Corticotropin-releasing factor, norepinephrine and stress. *Biological Psychiatry*, 1999, 46(9): 1167-1180 (doi: 10.1016/s0006-3223(99)00164-x).
32. Fisher A.D., Crowe M.A., Prendiville D.J., Enright W.J. Indoor space allowance, effects on growth, behaviour, adrenal and immune responses of finishing beef heifers. *Animal Science*, 1997, 64(1): 53-62 (doi: 10.1017/S135772980001554X).
33. Fisher A.D., Verkerk G.A., Morrow C.J., Matthews L.R. The effects of feed restriction and lying deprivation on pituitary-adrenal axis regulation in lactating cows. *Livestock Production Science,* 2002, 73(2-3): 255-263 (doi: 10.1016/S0301-6226(01)00246-9).
34. Munksgaard L., Ingvartsen K.L., Pedersen L.J., Nielsen V.K.M. Deprivation of lying down affects behaviour and pituitary-adrenal axis responses in young bull. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*, 1999, 49(3): 172-178 (doi: 10.1080/090647099424088).
35. Munksgaard L., Herskin M.S., Lovendahl P., Andersen J.B. Effects of nutrition on stress reactivity. In: *Ruminant physiology. Digestion, metabolism and impact of nutrition on gene expression, immunology and stress* /K. Sejrsen, T. Hvelplund, M.O. Nielsen (eds.). Wageningen Academic Publishers, 2006: 511-525.
36. Василевский Н.В. Управление питанием с учетом вариабельности физиологических параметров животных (концепция). *Проблемы биологии продуктивных животных*, 2015, 2: 67-79.

Институт животноводства
Национальной академии аграрных наук Украины,
61120 Украина, г. Харьков, ул. 7-й Гвардейской Армии, 3,
e-mail: vasilevskii.n@mail.ru ✉, eletskatat@zandex.ru

Поступила в редакцию
8 октября 2019 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [*Agricultural Biology*], 2020, V. 55, № 4, pp. 714-725

Blessed memory of our Teacher
Vasily V. Tsyupko is devoted

FOOD PARTICLE SIZE AS AN INDICATOR OF ITS STRUCTURAL COMPOSITION AND A KEY ASPECT OF THE DEVELOPMENT OF THE NUTRITION THEORY PARADIGM

N.V. Vasilevsky, T.A. Yeletskaya

Institute of Animal Science of National academy of agrarian sciences of Ukraine, 3, vul. 7-i Gvardeiskoi Armii, Kharkov, 61120 Ukraine, e-mail vasilevskii.n@mail.ru (✉ corresponding author), eletskatat@zandex.ru
ORCID:
Vasilevskiy N.V. orcid.org/0000-0002-7437-2910 Yeletskaya T.A. orcid.org/0000-0001-8980-6972
The authors declare no conflict of interests
Received October 8, 2019 doi: 10.15389/agrobiology.2020.4.714eng

Abstract

The using of modern feed-preparation machines and new technologies for the preparation and feeding of rations in animal husbandry has exacerbated the problem of the ratio in food of relatively large particles that capable to support the necessary motility of the digestive tract and relatively small ones, which provide high consumption of dry matter and its digestibility. In the presented work, we were the first to obtain data about the relationship between the particle size of the diet, the contents of the gastrointestinal tract and the feces of cattle. Based on the determination of the average particle size and dry matter content, a method for assessing the structure of feed has been proposed. The concepts of the informational component of food and the definition of rationed feeding have been introduced into the paradigm of nutrition theory. The aim of the work was to study the impact of the particle size of the diet on the particle size of the contents of the gastrointestinal tract and feces of cattle; to assess the relationship of these indicators with the digestibility of the main groups of nutrients; to develop a methodological approach to rationing the diet structure; to supplement the theory of rationed feeding with the necessary concepts. The studies were carried out at the Institute of Animal Science of National academy of agrarian sciences of Ukraine in 2017-2019 on two heifers (*Bos taurus taurus*) of the Ukrainian red-and-white breed with a live weight of 350 kg fitted with a duodenal lockable cannula of the beginning of the duodenum and a large-diameter rumen cannula. The animals were fed twice a day (at 8 a.m. and 5 p.m.) in equal shares. Chyme flux was measured during 9 h after morning feeding. The intake of chyme into the duodenum was measured within 14 days ($n = 6$). The measurements were interrupted for 1-2 days to give the animals rest. Samples of the contents of the rumen were collected through a cannula with a 100 mm diameter from the middle part of the rumen mat in triplicate with a 3 h interval between morning and evening feeding. The experiments were designed according to the balance test methodology with simultaneous assessment of the duodenal chyme flux and sampling of the rumen contents, duodenal chyme and feces. The main diet consisted of hay, silage, concentrates and provided the maintenance of the basal metabolism. The other rations were obtained by replacing one or two components of the main ration with additional amounts of the remaining components in an amount that was equal to the dry matter value of the interchangeable feed. The average particle size of the feed particles was determined by the arithmetic weighted average method by manual parsing and dry sieving, and the selected biological samples by the wet sieving method. The metabolic energy of the rations was calculated. It was found that the average particle size of rumen, chyme and feces decreased with an increase in the average particle size of the diet. The average particle size of the rumen (8.68±0.49 mm, $n = 31$) was an order of magnitude higher than the average particle size of the duodenal chyme and feces, that indicates the most intense crushing of feed in the proventriculus. The average particle size of feces (1.09±0.06 mm, $n = 19$, $0.1 > p > 0.05$) exceeded the average particle size of the duodenal chyme (0.99±0.05 mm, $n = 31$), that is indicative of the predominant digestion of the small fraction in the intestine and the formation of feces from the large fraction of the chyme. The value of feed structure in our studies was 0.12-0.92 kg · m/day vs. 0.033-0.062 kg · m/day for the contents of the rumen, 0.0031-0.0057 kg · m/day for duodenal chyme, and 0.0019-0.0028 kg · m/day for feces. A relationship between the structure of the diet, the availability of crude protein for digestion in the intestine and the size of feces particles was revealed, that theoretically suggests the possibility of assessing the state of digestive processes which based on the granulometric parameters of feces. The obtained data allow us to discuss the factors, affecting feed (and food) digestion and assimilation, which cannot be evaluated in a classical balance experiment by the difference in feed consumption and excretion. It has been proposed to collectively denote these factors as an information component which should be incorporated to express the concept of complex feed (food) structure. The information component is represented in part by various biologically active substances that are ingredients of the feed itself and/or products of the gastrointestinal microorganisms. Another part comprises physical factors, such as the physical parameters of food (temperature, humidity, particle size and stiffness), and non-feed factors (frequency and regularity of feeding, phased feeding, sound, light and other wave effects). We suggest the definition for rationed nutrition as a process of matter and information exchange between the external environment and the body, which ensures welfare and productive life.

Keywords: average particle size of food, structure of food, informational component of food, normalized feeding, theory of nutrition.