

Зоотехния и ветеринария

УДК 636.085

DOI: 10.31857/S250026272204010X, EDN: GEJQLG

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ УГЛЕВОДОВ И ЛИГНИНА В КОРМОВЫХ ТРАВАХ ПО ВАН-СОЕСТУ И КИЗЕЛЮ**Х.К. Худякова¹**, кандидат сельскохозяйственных наук, **В.Г. Косолапова²**, доктор сельскохозяйственных наук¹Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.П. Вильямса, 141055, Московская обл., Лобня, ул. Научный городок, корп. 1
E-mail: hatima40@mail.ru²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49
E-mail: v.kosolapova@rgau-msha.ru

Исследования проводили с целью сравнения результатов определения структурных углеводов и лигнина двумя методами: по Ван-Соесту с использованием детергентов (метод 1) и последовательного кислотного гидролиза по Кизелю (метод 2) в многолетних злаковых (кострец безостый, овсяница луговая, тимофеевка луговая) и бобовых (клевер луговой, люцерна посевная) кормовых травах в 3 фазы роста каждого вида: злаков – в фазы выхода в трубку, начала колошения и начала цветения, бобовых – ветвления, бутонизации и начала цветения. Сравнивали результаты анализа в среднем для 9 проб злаковых и 6 проб бобовых трав. Для злаковых трав различия между методами по уровню целлюлозы (Ц) и лигнина (Л) и кислотно-детергентного лигнина (КДЛ) были незначимыми. Однако содержание нейтрально-детергентной клетчатки (НДК), существенно превышало сумму гемицеллюлоз (ГЦ), целлюлозы (Ц) и лигнина (Л), определенных по Кизелю. Уровень ГЦ, рассчитанный по разнице между НДК и кислотно-детергентной клетчаткой (КДК), также выше величины этого показателя по Кизелю. Однако результаты анализов НДК и ГЦ двумя методами тесно коррелируют между собой. Возможно, это связано с наличием в составе НДК протеина и золы, содержание которых составило в среднем 4,4 и 1,5 % соответственно. При определении ГЦ по разнице между НДК и КДК предложено вычитать из значений клетчатки содержание нерастворимого протеина, нерастворимого в нейтральном детергенте, а также золы. Для бобовых трав различия между методами для всех определяемых соединений были незначительными, за исключением лигнина, для которого величина КДЛ значительно ниже, чем Л. В статье приведены уравнения регрессии, связывающие результаты анализов, проведенных двумя методами.

DETERMINATION OF STRUCTURAL CARBOHYDRATES IN FORAGE GRASSES BY METHODS VAN-SOEST AND KIESEL**Khudyakova H.K.¹, Kosolapova V.G.²**¹Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, 141055, Moskovskaya obl., Lobnya, ul. Nauchnyi gorodok, korp. 1
E-mail: hatima40@mail.ru²Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127434, Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49

*The purpose of these studies is to compare the results of the determination of structural carbohydrates and lignin by two methods: according to Van Soest using detergents (method 1) and sequential acid hydrolysis according to Kiesel (method 2) – in perennial forage grasses (*Bromus inermis*, *Festuca pratensis*, *Phleum pratense*) and legumes (*tifolium pratense*, *medicago sativa*) in 3 phases of growth of each species: grasses – in the phases vegetative, earing and flowering, legumes – vegetative, budding and beginning of flowering. The results of the analysis were compared on average for 9 samples of grasses and 6 samples of legumes. For grasses the differences between the methods in the levels of cellulose (Z) and lignin (L) were insignificant. However, the content of neutral detergent fiber (NDF) significantly exceeded the sum of hemicelluloses (HZ), cellulose and lignin, determined by Kiesel. The HZ level, calculated from the difference between NDF and acid detergent fiber (ADF), is also higher, than by Kiesel, although with a close correlation between the results of the methods. Perhaps this is due to the presence of protein and ash in the composition of NDF, the content of which averaged 4.4 and 1.5%, respectively. When determining the HZ by (NDF-ADF), it is proposed to subtract from the values of fiber the content of insoluble protein (NDICP and ADNCP), as well as ash. For legumes the differences between the methods for all determined compounds are insignificant, with the exception of lignin, for which the AD lignin value (ADL) is significantly lower than L. The article presents regression equations linking the results of the analyses conducted by two methods.*

Ключевые слова: многолетние кормовые травы, кислотно-детергентная клетчатка, нейтрально-детергентная клетчатка, целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, кислотно-детергентный нерастворимый протеин (КДНП), нейтрально-детергентный нерастворимый протеин (НДНП).

Key words: perennial herbages, neutral-detergent fiber, cellulose, hemicelluloses, lignin, acid detergent fiber, acid-detergent insoluble protein, (ADICP), neutral-detergent insoluble protein (NDICP).

Основной источник энергии в кормах – углеводы, на долю которых приходится от 40 до 80 % сухого вещества. Их принято разделять на две главные группы: неструктурные углеводы (НСУ) и углеводы клеточных стенок, или структурные. С точки зрения их трансфор-

мации в организме животных углеводы первой группы – это моно-, ди- и олигосахариды, низкомолекулярные фруктозиды и крахмал – легко и почти полностью переваримы, поэтому их называют также легкогидролизуемыми, или легкопереваримыми.

Структурные углеводы вместе с лигнином составляют клеточные стенки растений – это полимеры (пектиновые вещества, гемицеллюлозы и целлюлоза), которые различаются по степени полимеризации, виду и форме составляющих их моносахаридов, типу связей и др. Они представляют интерес в качестве источника энергии для, главным образом, жвачных животных, которые благодаря микрофлоре желудочно-кишечного тракта способны частично переваривать структурные углеводы. Кроме того, содержание клеточных стенок – основной фактор, от которого зависит переваримость и потребление корма, а также использование энергии переваримых веществ животными. Следует также отметить физиологическую роль структурных углеводов, которая заключается в обеспечении нормального функционирования рубца (руминации) и моторной функции желудочно-кишечного тракта.

Структурные углеводы вместе с лигнином обычно объединяют под общим названием «волокно» (fiber) или «клетчатка». В этом случае «клетчатка» не означает «целлюлозу», а служит термином, принятым при оценке кормов по содержанию структурных веществ. Ее можно определить, как фракцию корма, которая частично и медленно переварима, неполностью доступна и заполняет большую часть объема желудочно-кишечного тракта жвачных животных.

Впервые оценка кормов по величине трудно и медленно переваримых углеводов и лигнина была выполнена по схеме Веенде по содержанию сырой клетчатки (СК). В качестве показателя переваримости и энергетической ценности кормов СК сыграла и до сих пор играет важнейшую роль в изучении качества кормов. Однако она не представляет сумму структурных или непереваримых веществ и не обеспечивает разделение углеводов клеточных стенок по их видам. В состав СК входит только целлюлоза, переменная часть лигнина и очень незначительная часть другого структурного углевода – гемицеллюлоз (ГЦ). Например, в кормовых травах в состав сырой клетчатки входит лишь 19...33 % содержащегося в них лигнина и 5...13 % ГЦ [1]. В то же время информация об отдельных видах структурных веществ корма необходима для более точного прогнозирования их потребления и переваримости. При этом для полного определения углеводного состава кормов необходимо их длительное и трудоемкое разделение на фракции согласно химическому составу, а также переваримости и питательной ценности. Чаще всего в прошлом и до сих пор фракции углеводов определяют из одной навески корма методом последовательного кислотного гидролиза. Этим методом в различных модификациях интенсивно изучали углеводный состав кормовых растений, кормов и рационов в 50-60-е годы и ранее, а также их питательную ценность. К числу таких модификаций относится определение углеводного состава растений по Кизелю, которое до сих пор используют в нашей стране [2, 3].

Однако метод последовательного кислотного гидролиза трудоемок и длителен для применения в практике оценки качества кормов. Для решения этой проблемы в 60-х гг. прошлого века Ван-Соестом была предложена схема анализа структурных углеводов и лигнина кормов, основанная на использовании растворов детергентов. Согласно этой схеме нейтральный детергент растворяет содержимое клетки, оставляя клеточные стенки, состоящие из гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина, которые называют нейтрально-детергентной клетчаткой (НДК). Кислотный детергент удаляет ГЦ и остаток представляет сумму целлюлозы (Ц) и лигнина (Л), или

кислотно-детергентную клетчатку (КДК). КДК используют для определения лигнина (КДЛ) путем ее гидролиза 72 %-ной серной кислотой. ГЦ и Ц вычисляют по разнице: $ГЦ = НДК - КДК$; $Ц = КДК - КДЛ$.

Результаты исследований, по сравнению углеводов и лигнина в исходной траве и в составе НДК и КДК методом последовательного кислотного гидролиза свидетельствуют, что детергентные методы не всегда специфичны для структурных углеводов и лигнина. Тем не менее определение НДК, КДК, КДЛ и на их основе ГЦ и Ц получили широкое распространение во всем мире при оценке качества кормов.

В нашей стране до сих пор в основном применяют метод последовательного кислотного гидролиза, поскольку анализ с использованием детергентов только начинает входить в практику оценки качества кормов. В то же время в литературе много данных, полученных методом последовательного кислотного гидролиза. Для того чтобы обобщать и сравнивать такие сведения, а также использовать их при составлении рационов животных необходимо знать сопоставимость результатов указанных методов.

Цель исследований – выяснить сопоставимость результатов оценки структурных углеводов и лигнина, полученных разными методами.

Методика. Объектом исследования были образцы кормовых трав, выращенных на дерново-подзолистой почве Центральной экспериментальной базы ВНИИ кормов имени В.Р. Вильямса. Оценка содержания углеводных фракций проводили методами детергентных анализов (по схеме Ван-Соеста) и последовательного кислотного гидролиза.

Для сбора проб выделяли несколько площадок по диагонали участка. Образцы отбирали в первом укосе: злаковых трав (кострец безостый, овсяница луговая, тимофеевка луговая) – в фазы выхода в трубку, выметывания соцветий (колошения) и цветения; бобовых (люцерны посевной и клевера лугового) – в фазы ветвления, бутонизации и начала цветения. Скошенную зеленую массу, высушенную при температуре 60...65 °С в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией, размалывали до прохода через сито с отверстиями 1 мм.

При проведении детергентных анализов (метод 1) содержание НДК и КДК определяли из отдельных навесок путем кипячения в течение 1 ч в растворе нейтрального детергента (без применения амилазы) или в растворе кислого детергента соответственно. Содержание ГЦ устанавливали расчетным методом, как разницу между НДК и КДК, а Ц – между КДК и КДЛ. Результаты выражали в процентах от сухого вещества. Для определения КДЛ использовали остаток КДК, которую подвергали гидролизу 72 %-ным раствором серной кислоты.

Последовательный кислотный гидролиз (метод 2) состоял из следующих этапов:

удаление из пробы водорастворимых углеводов экстракцией водой при температуре 60 °С в течение 2 ч;
экстракция ГЦ из остатка 2 %-ным раствором соляной кислоты в течение 4 ч на кипящей водяной бане;
суспендирование остатка в 72 %-ном (m/m) растворе серной кислоты в течение 3 ч при температуре 20...23 °С;

экстракция Ц кипячением остатка пробы в разбавленном растворе серной кислоты в течение 1 ч;
промывка остатка после экстракции Ц, последующее высушивание и взвешивание для извлечения лигнина.

Гидролизаты ГЦ и Ц после нейтрализации анализировали на содержание редуцирующих сахаров перманганатным методом Бертрона. Полученные результаты

Табл. 1. Содержание структурных углеводов и лигнина при разных методах их определения, % сухого вещества

Показатель	Метод анализа*	Злаковые травы		Бобовые травы	
		среднее**	разница	среднее**	разница
НДК	№ 1	61,54	6,89±0,87***	43,51	0,64±1,23
	№ 2 (ГЦ+Ц+Л)	54,65		44,15	
КДК	№ 1	34,39	-1,30±0,68	35,48	0,37±1,32
	№ 2 (Ц+Л)	35,69		35,11	
ГЦ	№ 1	27,15	8,19±0,81	8,04	-1,0±0,54
	№ 2 (НДК-КДК)	18,96		9,04	
Ц	№ 1 (КДК-Л)	28,14	-0,71±0,81	27,1	1,90±3,11
	№ 2	28,86		25,20	
КДКЛ	№1	6,25	-0,58±0,27	8,38	-1,53±0,43
Лигнин	№2	6,83		9,91	

*метод №1 – с применением детергентов, метод №2 – последовательный кислотный гидролиз; ** средний результат для 9 проб злаковых трав (три вида в три фазы вегетации, за исключением одной пробы по содержанию КДК, для которой результаты представляли статистический выброс, поэтому были удалены из выборочной совокупности, то же относится к результатам по Ц) и для 6 проб бобовых трав; *** стандартная ошибка.

умножали на коэффициент 0,9 и выражали в процентах от сухого вещества.

Значения НДК сравнивали с суммой Ц, ГЦ и Л, определенных методом последовательного гидролиза, а КДК – с суммой Ц и Л.

Результаты и обсуждение. Содержание клеточных стенок (НДК) при использовании метода 1 в *злаковых травах* было на 6,3 % выше, чем сумма (ГЦ+Ц+Л), определенная методом последовательного кислотного гидролиза (табл. 1).

Разница между НДК и суммой (ГЦ+Ц+Л) по $t_{0,95}$ -критерию была существенной. Однако между результатами двух методов отмечена достаточно тесная положительная корреляция (табл. 2). Завышение результатов при использовании метода 1, по сравнению с методом 2, по-видимому, связано с тем, что в состав НДК входят сырой протеин и зола, которые не учитываются при последовательном гидролизе. Содержание протеина, нерастворимого в нейтральном детергенте НДНП в среднем для 9 проб составило 4,4 %, золы – 1,5 %. При

вычете из величины НДК, содержащихся в ее составе золы и НДНП получается результат, близкий к сумме Ц, ГЦ и лигнина.

КДК по методу 1, напротив, ниже суммы (Ц+Л). Это может быть связано с вхождением в ее состав лишь 88,8 % Ц исходной зеленой массы [4] и более низким значением КДЛ, по сравнению с Л. В КДК также присутствует КДНП, но намного меньше, чем в НДК. В результате наших исследований установлено, что в среднем для 9 проб злаковых трав содержание КДНП составило 1,2 % [5]. Из полисахаридов клеточных стенок содержание Ц при ее определении по методу 2 было несущественно выше, чем по разнице КДК – КДЛ (см. табл. 1 и 2). Однако разница между результатами методов несущественна.

В отличие от Ц, содержание второго полисахарида клеточных стенок – ГЦ по методу 1 было существенно выше, чем при последовательном кислотном гидролизе (см. табл. 1). Кроме того, для величин этих показателей отмечен более низкий коэффициент корреляции, чем для других (см. табл. 2). Поскольку по методу 1 ГЦ представляет собой разницу между НДК и КДК, частично такая ситуация обусловлена повышенным содержанием НДК и более низким – КДК. Также существует вероятность удаления части ГЦ, например, уроновых кислот, при экстракции пробы водой, которую применяли в нашем опыте по методу 2 до экстракции ГЦ, что могло привести к занижению величины этого показателя.

При определении ГЦ методом 1, результат включает также разницу по содержанию нерастворимых в нейтральном и кислотном детергенте протеина и золы. В НДК их содержится гораздо больше, чем в КДК. Поскольку ГЦ – полисахарид, в состав которого не входят протеин и зола, было бы более правильно определять его содержание по разнице между НДК и КДК после вычитания из их значений содержания нерастворимых протеина и золы. Более высокое содержание ГЦ в злаковых травах при их определении по разнице между НДК и КДК отмечают и других исследованиях. По-видимому, в связи с этим ГЦ, рассчитанные по разнице между НДК и КДК были названы «сырыми», а для связи содержания ГЦ, определенного независимым методом (у) с данными по разнице НДК-КДК (х) было разработано соответствующее уравнение [4]:

$$y = 0,98 + 0,73x,$$

При пересчете содержания ГЦ с использованием этого уравнения для наших данных разница между методами составила всего 1,8 %.

Табл. 2. Статистические параметры оценки разности результатов между методами

Структурные углеводы и лигнин	Значения t-критерия		Уравнение	Параметры уравнений		
	фактический	$t_{0,95}$		n	r	s
злаковые травы						
НДК	7,70	2,31	$y = 0,83x + 6,08^*$	9	0,97	1,95
КДК	1,10	2,37	$y = 1,10x + 4,54$	8	0,97	1,78
Гемицеллюлозы	10,08	2,31	$y = 0,45x + 6,69$	9	0,58	1,84
Целлюлоза	0,36	2,37	$y = 1,24x - 7,46$	8	0,96	1,60
Лигнин	2,16	2,31	$y = 1,06x - 0,25$	9	0,89	1,10
бобовые травы						
НДК	0,52	2,57	$y = 0,86x + 654$	6	0,93	2,49
КДК	0,28	2,57	$y = 0,72x + 9,38$	6	0,93	2,31
Гемицеллюлозы	1,86	2,57	$y = 12,42 - 0,42x$	6	0,38	1,54
Целлюлоза	0,61	2,57	$y = 0,72x + 5,54$	6	0,87	2,30
Лигнин	3,55	2,57	$y = 0,71x + 3,93$	6	0,94	0,68

*у – величина показателя, рассчитанного по уравнению; x – значение показателя по методу 2; n – количество переменных; r – коэффициент корреляции; s – стандартная ошибка уравнения.

Бобовые травы отличаются от злаковых более низким содержанием ГЦ и более высоким – Л, а также присутствием пектиновых веществ. Эти особенности, по-видимому, отразились и на результатах рассматриваемых методов.

В отличие от злаковых, величина НДК в зеленой массе бобовых культур незначительно отличается от суммы (Ц+ГЦ+Л), полученной методом последовательного кислотного гидролиза (см. табл. 1). Это связано с входжением в состав НДК, например, люцерны, только 83,7 % Ц исходной массы, а у злаковых – 96,3 %. То же касается протеина: в НДК бобовых входит 12,4 %, злаковых – 31,6 % протеина исходной вегетативной массы [4]. Наличие пектиновых веществ в составе клеточных стенок бобовых, не привело к повышению содержания НДК, по сравнению с суммой ГЦ, Ц и Л, так как нейтральный детергент растворяет пектиновые вещества, и они не входят в состав НДК, хотя и содержатся в клеточных стенках.

В бобовых травах также отмечено незначительное различие между содержанием КДК и суммой (Ц+Л), определенных методом последовательного кислотного гидролиза. Кислотный детергент не удаляет пектиновые вещества, входящие в состав клеточных стенок, но в связи с тем, что в составе КДК остается лишь 88,7 % Ц исходной массы существенные различия между результатами методов отсутствуют.

При определении Ц путем расчета разницы между КДК и КДЛ, величина этого показателя хотя и несущественно, но выше, чем при использовании метода последовательного кислотного гидролиза. По-видимому, это связано с более низким уровнем КДЛ, по сравнению с Л.

Данные по среднему содержанию ГЦ, полученные разными методами, отличались не существенно (см. t-критерий, табл. 2). Однако высокая ошибка разности средней обусловила низкий коэффициент корреляции между ними.

Таким образом, методы определения структурных углеводов (ГЦ, Ц, и Л) по Ван-Соесту не всегда специфичны для полисахаридов и лигнина клеточных стенок. Но физические и биологические свойства фракций углеводов, которые влияют на питание животных, более важны, чем их состав. Преимущество имеет такой метод, который позволяет разделять углеводы кормов на фракции, которые различаются по ферментации и переваримости в организме животных и влияют на их продуктивность. В то же время он должен быть доступным по длительности и трудоемкости, для использования в практике кормления. Как видно из этапов выполнения анализов, методы Ван-Соеста предпочтительнее, поэтому в течение последних десятилетий интенсивно изучают их различные аспекты, а также возможности применения получаемых результатов при оценке качества кормов и использовании в организме животных. Это особенно относится к НДК, представляющей всю сумму структурных углеводов и лигнина, которая служит одним из наиболее важных показателей качества корма. Исследования касаются содержания НДК в различных кормах, ее переваримости, влияния на нее различных факторов, а также уровня содержания в рационе крупного рогатого скота [6, 7, 8].

Повышенное внимание уделяют не только уровню НДК в рационе, но и физической эффективной НДК, которая зависит от ее содержания и размеров частичек корма [9, 10]. Это определяет потребление корма, процессы метаболизма в рубце и в конечном итоге – продуктивность животных.

Поскольку кроме уровня НДК и размера частичек корма, имеется много других факторов рациона, влияющих на протекание процессов в рубце. С целью интеграции физических и химических параметров корма предложена система регулируемой НДК путем моделирования [11].

Часть НДК вообще не переваривается жвачными и после длительной ферментации – это непереваримая НДК (uNDF), ее содержание коррелирует с питательной ценностью корма. Поэтому разработан метод определения такой НДК для рутинных анализов [12].

Доля лигнина в НДК используется как показатель ее переваримости. При этом более полно объясняет вариацию переваримости НДК его связь с углеводами клеточных стенок [13]. Играет роль и вид лигнина, зависящий от метода его определения. Так, КДЛ более тесно коррелировал с переваримостью НДК, чем лигнин Класона, содержание которого было выше, чем КДЛ [14]. Авторы считают, что лигнин Класона характеризуется гетерогенностью состава. В нашем опыте содержание лигнина по методу 2 также выше, чем КДЛ, что, возможно, также связано с наличием в нем различных фракций.

Следует отметить исследования, которые появились после того, как определение клеточных стенок раствором нейтрального детергента получило широкое распространение. Это – определение фракции углеводов, растворимых в нейтральном детергенте, которые представляют сумму неструктурных углеводов и соединений, содержащихся в клеточных стенках. Изучен их состав в различных кормах и роль в питании животных.

Таким образом, в злаковых травах содержание клеточных стенок по Ван-Соесту (НДК), которая считается суммой гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина, значительно выше (на 6,89 %), чем сумма тех же соединений, определенных методом последовательного кислотного гидролиза. При вычитании из значения НДК содержащихся в ней нерастворимых протеина и золы (4,4 и 1,5 % соответственно), которые не относятся к числу углеводов, результаты методов близки между собой.

Содержание КДК, целлюлозы и лигнина в злаковых травах, установленное обоими методами существенно не различается. Количество гемицеллюлозы по Ван-Соесту, определенное по разнице между НДК и КДК, значительно выше, чем при фракционировании последовательным кислотным гидролизом.

При анализе бобовых трав сравниваемые методы не отличались по содержанию НДК, КДК, целлюлозы и гемицеллюлозы. Однако концентрация лигнина, определенная по методу Кизеля, была существенно выше, чем по Ван-Соесту.

Литература.

1. Худякова Х.К. Состав безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) при их анализе по схемам Веенде и Ван Соесту // Сб. научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. 2021. Т.10. №3. С. 202-206.
2. Гарист А.В., Соколов В.М., Петлах М.М. Факторы, определяющие питательность кормов // Кормопроизводство. 1987. № 9. С. 8-13.
3. Углеводная питательность кормов / Н.Г. Григорьев, Н.П. Волков, Е.С. Воробьев и др. // Биологическая полноценность кормов. М.: Агропромиздат, 1989. С. 134-235.
4. Colburn M. W., Evans L. Chemical composition of the cell wall constituent and acid-detergent fiber fractions of forages // J. Dairy Sci. 1967. Vol. 50. P. 1130- 1135.

5. Косолапов В.М., Худякова Х.К. Уровни содержания протеина, нерастворимого в кислотном детергенте, в злаковых травах и кормах из них // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021. Т. 22. № 3. С.360-366.
6. Assessment of contents of structural carbohydrates and lignin of perennial fodder herbages depending on vegetative stage growth / H.K. Khudyakova, A.V. Shitikova, N.V. Zarenkova, et al. // *Periodico Tchê Quimica*. 2020. Vol. 17. No. 36. P. 994–1003.
7. Erickson P.S., Kalscheur K.F. Nutrition and feeding of dairy cattle // *Animal Agriculture*. Academic Press. 2020. p. 157 -180. doi: 10.1016/b978-0-12-817052-6.00009-4.
8. Быкова М.Ю., Гибадуллина Ф.С. Содержание структурных углеводов в кормах Татарстана и оптимизация их в рационах молодняка крупного рогатого скота // *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана*. 2010. Вып. 202. С. 50-55.
9. Mertens D.R. Physically effective NDF and its use in dairy rations explored // *Feedstuffs*. 2000. Vol. 72. No 15. P. 11-19.
10. Role of physically effective fibre and estimation of dietary fibre adequacy in high-producing dairy cattle / Q. Zebeli, J.R. Aschenbach, M. Tafaj, et al. // *J. Dairy Sci.* 2011. Vol. 95. P. 1041-1056. doi: 10.3168/jds.2011-4421.
11. Physically adjusted neutral detergent fiber system for lactating dairy cow rations. I: Deriving equations that identify factors that influence effectiveness of fiber / R. White, M. B. Hall, J. L. Firkins, et al. // *J. Dairy Sci.* 2017. Vol. 100. No 10. P. 9551-9568. doi: 10.3168/jds.2017.12765.
12. Raffrenato E., Ross D. A., Van Amburgh M. E. Development of an in vitro method to determine rumen undigested u NDFom for use in feed evaluation // *J. Dairy Sci.* 2018. Vol. 101. No 11. P. 9888-9900.
13. Effect of lignin linkages with other plant cell wall components on in vitro and in vivo neutral detergent fiber digestibility and rate of digestion of grass forages / E. Raffrenato, R. Fievisohn, K. W. Cotanch, et al. // *J. Dairy Sci.* 2017. Vol. 100. No 10. P. 8119-8131. doi: 10.3168/jds.2016-12364.
14. Klason lignin is a nutritionally heterogeneous fraction unsuitable for the prediction of forage neutral-detergent fibre digestibility in ruminants / P. J. Van Soest, J. B. Robertson, M. B. Hall, et al. // *British Journal of Nutrition*. 2020. Vol. 124. No. 7. P. 693–700. doi: 10.1017/S0007114520001713.
15. Tebbe A.W., Faulkner M.J., Weiss W.P. Effect of partitioning the nonfiber carbohydrate fraction and neutral detergent fiber method on digestibility of carbohydrates by dairy cows // *J. Dairy Sci.* 2017. Vol. 100. No. 8. P. 6218-6228. doi: 10.3168/jds.2017-12719.

Поступила в редакцию 21.03.2022
 После доработки 03.06.2022
 Принята к публикации 27.07.2022