

Э. В. Логвинова, В. С. Болтовский

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОНСОРЦИУМА МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ И ФЕРМЕНТНОГО ПРЕПАРАТА

Ключевые слова: травянистые растения, люцерна, злаковые культуры, молочнокислые бактерии, ферментные препараты, ферментация, целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, полисахариды, моносахариды, сырой протеин.

Травянистое растительное сырье является ценным возобновляемым ресурсом и источником природных биополимеров (целлюлозы, гемицеллюлоз, пектиновых веществ) и широко используется для получения растительных кормов и углеводно-белковых добавок. Актуальной задачей является получение доброкачественного продукта на основе травянистых растений, обеспечение сбалансированности питательных компонентов сохранности и повышения усвояемости сухих веществ травянистых растений, что достигается их ферментацией. В работе использовали одну из распространенных бобовых трав – люцерну с высоким содержанием сырого протеина в смеси с богатой углеводами злаковыми культурами. Однако в условиях естественной сушки протеин люцерны быстро разлагается под действием протеолитических ферментов. Ферментация трав бобовых растений затруднена из-за низкого содержания моносахаридов и молочнокислых бактерий в эпифитной микробиоте. В работе дефицит углеводов восполняли, используя смесь люцерны и высокоуглеводистых злаковых травянистых растений (райграс, ежа, тимофеевка) в соотношении 1 : 1. Для обеспечения доминирования молочнокислых бактерий в процессе ферментации (без предварительной сушки) смеси вносили консорциум *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans* в количестве $1 \cdot 10^{11}$ КОЕ/г и фермент, обладающий ксилитической активностью 20000 ед/г. Показано, что после ферментации образцы обладали оптимальным значением pH (4,1–4,4) и соотношением молочной и уксусной кислот при отсутствии масляной при незначительной потере сухих веществ. По сравнению с исходной зеленой массой бобово-злаковой смеси содержание сырой клетчатки снизилось на 2,4–7,9 %, повысилась доля водорастворимой фракции белка. Результаты, приводимые в работе, могут быть рекомендованы к использованию при ферментации других травянистых растений.

E. V. Logvinova, V. S. Boltovsky

CHANGES IN THE COMPOSITION AND QUALITY OF HERBACEOUS PLANTS UNDER THE INFLUENCE OF A CONSORTIUM OF LACTIC ACID BACTERIA AND AN ENZYME PREPARATION

Key words: herbaceous plants, alfalfa, cereal crops, lactic acid bacteria, enzyme preparations, fermentation, cellulose, hemicelluloses, lignin, polysaccharides, monosaccharides, crude protein.

Herbaceous plant materials are a valuable renewable resource and a source of natural biopolymers (cellulose, hemicelluloses, pectin) and are widely used to produce plant-based carbohydrate-protein feeds and supplements. A pressing challenge is to produce a high-quality herbaceous product, ensuring a balanced nutritional profile, preserving, and increasing the digestibility of dry matter from herbaceous plants, which is achieved through fermentation. In this study, alfalfa, a common legume with a high crude protein content, was used in a mixture with carbohydrate-rich cereals. However, under natural drying conditions, alfalfa protein is quickly degraded by proteolytic enzymes. Fermentation of legumes is difficult due to the low content of monosaccharides and lactic acid bacteria in the epiphytic microbiota. In the study, the carbohydrate deficiency was compensated for using a mixture of alfalfa and high-carbohydrate cereal grasses (ryegrass, orchard grass, timothy grass) in a 1:1 ratio. To ensure the dominance of lactic acid bacteria during fermentation (without preliminary drying), a consortium of *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans* in an amount of $1 \cdot 10^{11}$ CFU/g and an enzyme with a xylolytic activity of 20,000 units/g were added to the mixture. It was shown that after fermentation, the samples had an optimal pH value (4.1–4.4) and a ratio of lactic and acetic acids in the absence of butyric acid with an insignificant loss of dry matter. Compared to the original green mass of the legume-cereal mixture, the crude fiber content decreased by 2.4–7.9%, while the proportion of the water-soluble protein fraction increased. The results presented in this study can be recommended for use in the fermentation of other herbaceous plants.

Введение

Традиционно травянистые растения используются как источник структурных полисахаридов и растительного белка. В настоящее время ферментированные травянистые растения не всегда обладают необходимым качеством из-за дефицита сырого протеина и легкоусвояемых углеводов. Основным и самым дешевым источником растительного белка являются многолетние травы (люцерна, клевер и др.), которые плохо ферментируются из-за низкого содержания моносахаридов и молочнокислых бактерий. Поэтому проблема получения доброкаче-

ственного продукта из высокобелковых бобовых культур приобретает особую актуальность.

В ранней стадии вегетации травянистых растений целлюлоза характеризуется низкой степенью полимеризации, что способствует ее разрушению под действием гликозидгидролаз до олиго- и моносахаридов, которые являются дополнительным источником питания для молочнокислых бактерий, синтезирующих молочную и уксусные кислоты и эффективно подавляющих метаболизм патогенной микробиоты.

При спонтанной ферментации трав бобовых культур наблюдается медленное снижение значения

pH, что обусловлено недостаточным количеством органических кислот (молочной, уксусной, реже пропионовой). Причиной является низкое содержание молочнокислых бактерий в эпифитной микробиоте травянистых растений и дефицит моносахаридов, что усугубляется высокой буферностью.

Люцерна является ценной бобовой культурой с разнообразной микробной популяцией по сравнению со злаковыми культурами [1]. Поэтому для смещения биохимических процессов в сторону закисления и обеспечения доминирования молочнокислых бактерий в эпифитной микробиоте дополнительно вносится закваска.

Установлено [2], что внесение *Lactobacillus plantarum* либо *Lactobacillus casei* в зеленую массу люцерны и хранение образцов при 20 и 30°C в течение 60 сут улучшает микробный профиль (увеличивает долю *Lactobacillus*) и качество ферментации травянистых растений.

Инокуляция зеленой массы люцерны *Lactobacillus buchneri* также способствует снижению разнообразия бактериальной микробиоты, увеличивая численность штаммов рода *Lactobacillus*, что возможно связано с повышением концентрации ацетатов и снижением величины pH [3].

Измельчение люцерны до 2 см, собранной в фазе бутонизации и обработанной γ -лучами (15 кГр в течение 5 ч), с последующей инокуляцией микробиотой травянистого растения *Pennisetum purpureum* Schumacher в течение 14 и 30 сут ферментации привело к доминированию молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus*, что способствовало повышению содержания органических кислот и препятствовало распаду белка с образованием аммиачного азота [4].

В работе [5] установлено, что консорциум гомо- и гетероферментативных молочнокислых бактерий значительно повышает скорость снижения pH, что позволяет эффективно подавить метаболизм патогенной микробиоты.

Некоторые штаммы гетероферментативных молочнокислых бактерий способны частично гидролизовать гемицеллюлозы до моносахаридов с последующим преобразованием до уксусной и молочной кислот через фосфокетотазный путь [6].

Из эпифитной микробиоты люцерны были выделены *Lactobacillus plantarum* с группой генов углеводоактивных ферментов (CAZyme), отвечающих за расщепление арабиноксилана и целлюлозы до гексоз и пентоз [1].

Установлено, что ферментация провяленной люцерны (сухие вещества 38,71%) генетически модифицированными молочнокислыми бактериями *Lactobacillus plantarum* 11AG в количестве $1 \cdot 10^6$ КОЕ/г, синтезирующими гликозидгидролазы (в отличие от дикого штамма), за 45 сут при 20°C снижает содержание гемицеллюлоз на 17%, целлюлозы на 6% и лигнина на 72% по сравнению с контролем. Структурное разрушение ксилана и карбоксиметилцеллюлозы авторы объясняют воздействием фибролитических ферментов CbXyn10C и Bgxl. В результате содержание водорастворимых углеводов повысилось на 72% по сравнению с контролем и была достигнута высокая сохранность (на уровне 100%) по

сырому веществу и сырому протеину. Показателем доброкачественности ферментированной люцерны является значение pH 4,42 и высокое содержание молочной и уксусной кислот 5,23 и 2,39% соответственно при отсутствии масляной кислоты и низкой доли фракции аммиака 4,94% [7].

Установлен синергетический эффект при ферментации люцерны с размером частиц 1–2 см в течение 60 сут при 20°C штаммами *Lactobacillus plantarum* A1 и *Lactobacillus brevis* A3, продуцирующими фермент эстеразу феруловой кислоты, с добавлением коммерческой целлюлазы, способствующий снижению содержания лигнина до 45,8 г/кг (на 14,2% ниже контроля) и доли водорастворимых углеводов до 8,31 г/кг (на 38,9% ниже контроля). Это объясняется разрушением связей между лигнином и структурными полисахаридами эстеразой феруловой кислоты, что облегчает доступ целлюлолитическому ферменту к целлюлозе [8].

Применение только целлюлазы не приводит к деструкции компонентов сырой клетчатки (нейтрально-детергентной и кислотно-детергентной) [8]. Это связано с тем, что целлюлоза представляет собой высокоориентированный кристаллический полимер со сложной фибриллярной надмолекулярной структурой [9].

Дефицит моносахаридов в люцерне можно устранить внесением патоки в количестве 20 г на 1 кг зеленой массы. Образцы, взятые после 5, 10 и 60 сут ферментации характеризуются значительным повышением содержания молочной (в 7,3 раза) и уксусной кислот, что является важным показателем нормализации процесса брожения [10]. Но при использовании в производственных масштабах требуется ее предварительное растворение в воде для снижения вязкости, равномерного распределения в рабочем растворе и в массе растительного сырья.

Важным показателем качества ферментации является скорость снижения pH, поэтому необходимо тщательно подходить к выбору технологических стадий.

Установлено [11], что измельченная люцерна (0,95 см), собранная в фазу раннего цветения с одного поля, без стадии предварительной сушки обладала лучшим кислотным профилем (более низким значением pH, повышенным содержанием молочной и уксусной кислот, 1,2-пропандиола и этанола) с долей сухих веществ 33%, чем просушенная до 45% сухих веществ.

Целью данного исследования являлось:

- изучение эффективности применения гомо- и гетероферментативных молочнокислых бактерий и ферментного препарата на основе ксиланазы при ферментации травянистых растений;
- определение влияния консорциума бактерий и ферментного препарата на фракционный состав сырой клетчатки и содержание протеина;
- определение влияния ферментного препарата ксилолитического действия на структурные полисахариды (гемицеллюлозы, целлюлозу).

Экспериментальная часть

В качестве травянистых растений использовали люцерну, обладающую высоким содержанием сыро-

го протеина, и богатую углеводами смесь трав злаковых культур (райграс, ежа, тимофеевка), которые измельчали до размера частиц 3–4 см, орошали рабочим раствором биоконсерванта в количестве 1 л на 1 т зеленой массы, трамбовали и укрывали специальной пленкой для создания анаэробных условий без доступа солнечного света.

Готовили рабочий раствор, в 1 л которого содержалось 3,0 г порошка биоконсерванта (использовали консорциум гомоферментативных бактерий (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*) и гетеротрофов (*Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans*) в количестве $1 \cdot 10^{11}$ КОЕ/г и ферментный препарат с ксилолитической активностью 20000 ед/г).

Анализ качества исходной зеленой массы бобово-злаковых травянистых растений и после 15, 30 и 60 сут ферментации осуществляли органолептически (внешний вид, цвет, запах, структуру, наличие очагов плесени) и по содержанию сухого вещества, сырой, нейтрально-детергентной и кислотно-детергентной клетчатки, сырого и растворимого протеина, переваримой нейтрально-детергентной клетчатки, молочной, уксусной и масляной кислот и значение pH методом спектроскопии ближнего инфракрасного излучения NIRS (Near-InfraRed Spectroscopy) в течении суток в лаборатории «Скарб-био», партнера голландской компании Eurofins Agro Testing Wageningen B.V. Для проверки достоверности полученных по данному методу результатов дополнительно проводили определение содержания основных компонентов с использованием традиционно применяемых в химии растительного сырья методов, при которых получены сопоставимые результаты.

Результаты и их обсуждение

Показано, что после 15-ти сут все образцы обладали оптимальным значением pH (4,1–4,4) и соотношением молочной и уксусной кислот при отсутствии масляной, что указывает на их доброкачественность. Потери сухих веществ незначительны и составили 0,6–6,1%. Разрушение структурных полисахаридов под воздействием ксилолитического ферментного препарата («Xylanase») позволило снизить по сравнению с исходной зеленой массой бобов. При сравнении скорости кислотообразования консорциумов бактерий *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* (серия №1) и *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans* (серия №2) (рис. 2) показано, что скорость синтеза кислот консорциума серии №2 выше, чем серии №1.

о-злаковой смеси содержание сырой клетчатки на 2,4–7,9%, в том числе нейтрально-детергентной – на 2,7–14,5%, и повышению доли водорастворимой фракции белка на 17,3–70,45%.

Обсуждение результатов исследований. Основным требованием к молочнокислым бактериям является высокий уровень кислотообразования и ростовые свойства в первые 24 ч после внесения в измельченные травянистые растения.

Определение ростовых свойств консорциумов *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei* (серия

№1) и *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans* (серия №2) – рис. 1.

Из рис. 1 видно, что скорость роста гетероферментативных молочнокислых бактерий серии №2 выше, чем серии №1. В первые 12 ч скорость роста консорциума бактерий серии №2 более чем в два раза выше серии №1, по прошествии суток она выравнивается, но уже через 12 ч снова значительно повышается.

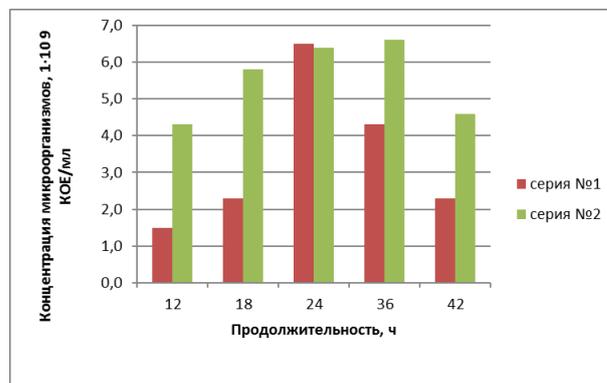


Рис. 1 – Рост консорциумов молочнокислых бактерий серий №1 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*) и №2 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans*)

Fig. 1 – Growth of consortia of lactic acid bacteria of samples of series No. 1 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*) and series No. 2 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans*)

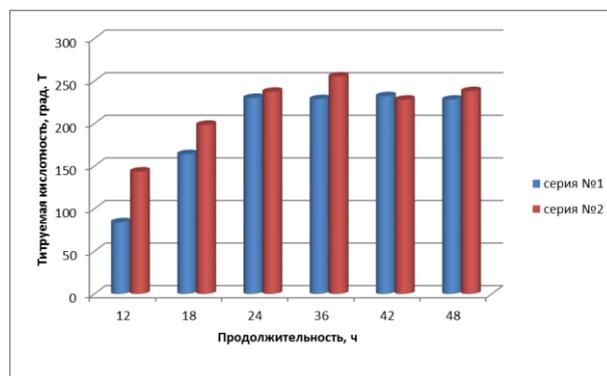


Рис. 2 – Скорость кислотообразования консорциумов серии №1 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*) и серии №2 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans*)

Fig. 2 The rate of acid formation of samples of series No. 1 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*) and series No. 2 (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buhneri*, *Lactobacillus diolivorans*)

Важным показателем качества ферментации является не только скорость роста молочнокислых бактерий, но и их способность к кислотообразованию. Это является решающим фактором в первые

трое суток, который в дальнейшем определяет сохранность питательных веществ.

На основании проведенных экспериментов установлено, что внесение гетероферментативных молочнокислых бактерий *Lactobacillus buhneri* и *Lactobacillus diolivorans* усиливает консорциум гомоферментативных *Lactobacillus plantarum* и *Lactobacillus casei* и позволяет за 36 ч ферментации набрать максимальную кислотность и количество жизнеспособных бактерий.

В опытно-промышленных условиях проводили ферментацию смеси люцерны и злаковых культур на сельскохозяйственных предприятиях Брестской области (образец №1) и Минской области (образцы №2 и №3).

Важным показателем доброкачественности ферментированных травянистых растений является активная кислотность, которая характеризуется количеством и соотношением молочной и уксусной кислот (таблица 1). Приятный аромат квашенных овощей, зеленый цвет с хорошо выраженной структурой без очагов плесени показали, что биохимический процесс смещен в сторону молочнокислого брожения.

Из таблицы 1 видно, что после 15-ти суток ферментации кислотность всех образцов достигла оптимальной величины, что позволяет судить о высокой скорости кислотообразования выбранного консорциума гомо- и гетероферментативных молочнокислых бактерий.

Таблица 1 – Кислотный профиль ферментированных образцов смеси травянистых растений бобово-злаковых культур

Table 1 – Acid profile of fermented samples of a mixture of herbaceous legume-cereal crops

Показатель	Образцы								
	№1	№2	№3	№1	№2	№3	№1	№2	№3
	Продолжительность ферментации, сут								
	15			30			60		
рН	4,1	4,4	4,4	4,1	4,2	4,25	4,1	4,4	4,3
Молочная кислота, %	88	60	50	89	75	59,6	90	77	51
Уксусная кислота, %	10	2	20	18	8	4,4	10	17	14,9
Соотношение молочной и уксусной кислот	8,8:1	30:1	2,5:1	4,9:1	9,4:1	13,5:1	9:1	4,5:1	3,4:1
Масляная кислота, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Преобладание в полученных ферментированных образцах молочной кислоты по сравнению с уксусной и стабильность их значений в течение 60 сут указывает на завершенность биохимических процессов и высокую сохранность качественных характеристик ферментированной смеси бобово-злаковых трав при продолжительном хранении.

Масляная кислота является одним из показателей порчи. Она образуется в процессе клостридиального брожения, при котором изменяется цвет и запах ферментированных травянистых растений, образуются различные токсины, снижается содержание молочной кислоты, разрушаются ценные белки с образованием аммонийного азота. Поэтому очень важно обеспечить благоприятные условия для развития молочнокислых бактерий, способствующих быстрому закислению травянистых растений.

Отсутствие масляной кислоты в полученных продуктах подтверждает эффективность подавления метаболизма ряда штаммов клостридиальных бактерий.

Для повышения эффективности ферментативного воздействия закваски молочнокислых бактерий на травянистые растения бобово-злаковых культур вносили ферментный препарат «Xylanase», обладающий ксилитической активностью 20000 ед/г, который частично разрушает гемицеллюлозы (гидролизует ксиланы и арабиноксиланы) до моно- и олигосахаридов, стимулируя развитие молочнокислых бактерий, синтезирующих молочную и частично уксусную кислоты.

Показателем эффективности ксилитического ферментного препарата является снижение содержания сырой клетчатки в ферментированных продуктах, включая нейтрально- и кислотно-детергентную (таблица 2).

Сырая клетчатка представляет собой остатки растительных оболочек, включающие целлюлозу, гемицеллюлозы и лигнин, которые подразделяются на две фракции нейтрально-детергентную (НДК) и кислотно-детергентную (КДК). Компоненты НДК, нерастворимые нейтральным детергентом, включают целлюлозу, лигнин и гемицеллюлозы. КДК состоит из целлюлозы и лигнина, нерастворимые кислотным детергентом [12].

Ферментативный гидролиз измельченной зеленой массы ксиланазой с активностью 60 000 ед на 1 т привел к снижению содержания сырой клетчатки на 2,4–7,9%, что незначительно отразилось на кислотно-детергентной и в большей степени затронуло нейтрально-детергентную (снижение на 2,7–14,5%) клетчатку.

Это связано с тем, что в состав НДК входят гемицеллюлозы, которые под действием ксилитического фермента подвергаются структурному разрушению и обеспечивают доступ к целлюлозе. Более эффективная деструкция целлюлозы до моносахаридов и олигосахаридов происходит под действием целлюлолитического ферментного комплекса микробиоты рубца крупного рогатого скота, поддерживая метаболизм эпифитной микробной популяцией.

Таблица 2 – Содержание сырой, нейтрально-детергентной и кислотно-детергентной клетчатки, сырого протеина в ферментированных травах бобово-злаковой смеси предприятий Брестской (образец №1) и Минской (образцы №2, 3) областей

Table 2 – Content of crude, neutral detergent and acid detergent fiber, crude protein in fermented grass legume-cereal mixture of enterprises of Brest (sample No. 1) and Minsk (samples No. 2, 3) regions

Показатель	Образцы											
	№1				№2				№3			
	Продолжительность ферментации, сут											
	0	15	30	60	0	15	30	60	0	15	30	60
Сырая клетчатка, %	247	253	266	241	256	254	267	248	310	281	319	285
Нейтрально-детергентная клетчатка, г/кг	463	454	449	420	516	432	442	441	506	487	495	492
Кислотно-детергентная клетчатка, %	273	298	309	271	290	303	302	299	334	337	325	310
Сырой протеин, г/кг	154	152	154	157	174	177	176	179	195	165	175	157

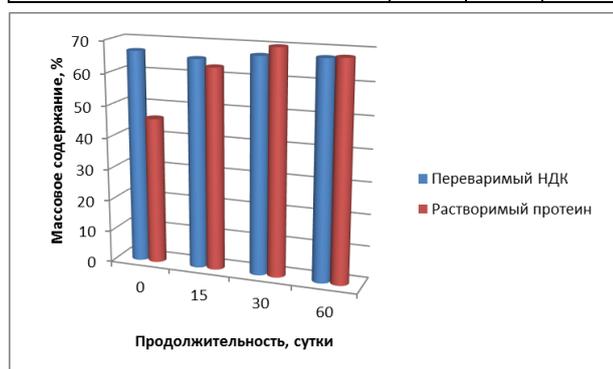


Рис. 3 – Содержание фракции перевариваемой нейтрально-детергентной клетчатки и водорастворимого сырого протеина в ферментированных образцах №1 травах бобово-злаковой смеси

Fig. 3 – Content of the fraction of digestible neutral detergent fiber and water-soluble crude protein in fermented samples No. 1 of legume-cereal mixture

Клеточная стенка травянистых растений состоит из трех слоев: внутреннего (целлюлозы и гемицеллюлозы), вторичного (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина), первичного (метилового эфира полигалактоуроновой кислоты, гемицеллюлозы и белка) [9]. Поэтому мы предполагаем, что воздействие ксилитического ферментного препарата на первичный слой способствует высвобождению части сырого протеина и повышению доли его растворимой фракции (рис. 3–5). В результате повышается доступность, а значит и усвояемость, компонентов сырой клетчатки на 2,7–14,5 % и протеина на 9–24 % в абсолютных величинах, что увеличивает пищевую ценность ферментированных травянистых растений.

Как видно из рис. 3, в ферментированных образцах №1 бобово-злаковой смеси переваримость нейтрально-детергентной клетчатки изменяется, в тоже время после 60 сут фракция растворимого сырого протеина существенно увеличивается с 46 до 68% (на 47,8%). Возможно, это связано со снижением содержания нейтрально-детергентной клетчатки с 463 до 420 г/кг (на 9,3%).

В ферментированных образцах №2 бобово-злаковой смеси наблюдается другая корреляция

между показателями перевариваемой нейтрально-детергентной клетчатки и растворимого сырого протеина (рис. 4).



Рис. 4 – Содержание фракции перевариваемой нейтрально-детергентной клетчатки и водорастворимого сырого протеина в ферментированных образцах №2 бобово-злаковой смеси

Fig. 4 – Content of the fraction of digestible neutral detergent fiber and water-soluble crude protein in fermented samples No. 2 of the legume-cereal mixture

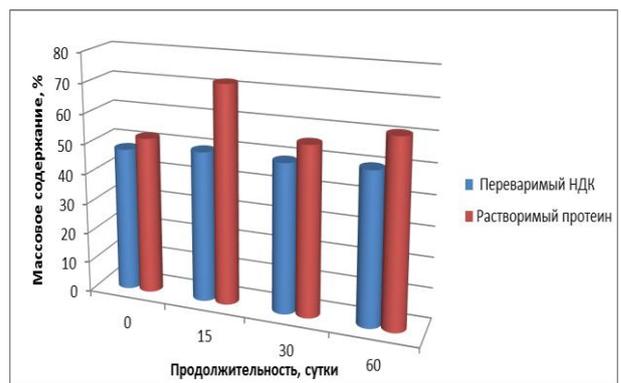


Рис. 5 – Содержание фракции перевариваемой нейтрально-детергентной клетчатки и водорастворимого сырого протеина в ферментированных образцах №3 бобово-злаковой смеси

Fig. 5 – Content of the fraction of digestible neutral detergent fiber and water-soluble crude protein in fermented samples No. 3 of the legume-cereal mixture

В процессе ферментации бобово-злаковой смеси перевариваемость нейтрально-детергентной клетчатки снизилось с 62,9 до 52,6% (на 16,4%) при одновременном уменьшении доли нейтрально-детергентной клетчатки с 516 до 441 г/кг (на 14,5%). Однако это не повлияло на снижение содержания фракции растворимого сырого протеина, а наоборот повысило с 44 до 75 % (на 70,5%).

Как видно из рис. 5, в опытных образцах серии №3 бобово-злаковой смеси увеличивается перевариваемость нейтрально-детергентной клетчатки на 4,9% (с 47,6 до 49,9%) и содержание фракции растворимого сырого протеина на 17,3% (с 52 до 61%), что представляет собой прямую корреляционную зависимость.

Таблица 3 – Содержание сухих веществ в ферментированных травах бобово-злаковой смеси
Table 3 – Dry matter content of fermented herbs legume-cereal mixture

Показатель	Образцы											
	№1				№ 2				№ 3			
	Продолжительность ферментации, сут											
	0	15	30	60	0	15	30	60	0	15	30	60
Сухое вещество, %	333,3	330,8	331,3	331,4	332,0	335,9	34,7	32,2	336,1	338,7	545,5	333,9

Выводы

Под воздействием ферментного препарата «Xylanase» легкогидролизуемые гемицеллюлозы расщепляются до легкоусвояемых фракций олиго- и моносахаридов, которые используются молочнокислыми бактериями для синтеза молочной и уксусной кислот, и являются источником питания для рубцовой микробиоты крупного рогатого скота. В процессе ферментации бобово-злаковой смеси травянистых растений растут и развиваются лактобактерии, которые активно расходуют остатки кислорода, что является дополнительным сдерживающим фактором метаболизма мицелиальных грибов и дрожжей. В результате достигается оптимальное соотношение молочной и уксусной кислот, препятствующих развитию патогенной микробиоты (включая клостридиальные бактерии и микромицеты).

Ферментация зеленой массы смеси люцерны и злаковых травянистых растений (райграс, ежа, тимфеевка) с использованием комплексного биоконсерванта на основе консорциума гомо- и гетероферментативных молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus buchneri* и *Lactobacillus diolivorans* и ферментного препарата «Xylanase», обладающего ксилитической активностью, позволяет ускорить процесс ферментации, снижая pH до 4,1–4,4 за 15 сут. вместо 30–60 сут, и начать кормление жвачных сельскохозяйственных животных восполняя острый дефицит в высококачественных ферментированных травянистых растений.

Литература

1. G. Xusheng, X. Dongmei, L. Fuhou, B. Jie, S. Rina, *Microbial Biotechnology*, 67-87 (2023).

Это позволяет повысить энергетическую ценность ферментированной бобово-злаковой смеси и снизить долю дорогостоящих зерновых концентратов, что способствует снижению себестоимости продукции животноводства.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что основные биохимические процессы ферментации завершаются в течение двух месяцев и приходят в относительно равновесное состояние.

При ферментации травянистых растений потери сухих веществ могут составлять до 25% [13,14,15]. В опытных образцах потери сухих веществ снижены до 0,6–6,1% (таблица 3).

- Z. Qing, Y. Zhu, W. Xianguo and T. Jipeng, *Animal Science Journal*, 89, 1085-1092 (2018) (<https://doi.org/10.1111/asj.12961>).
- I.M. Ogunade, Y. Jiang, A.A. Pech Cervantes, D.H. Kim, A.S. Oliveira, D. Vyas, Z.G. Weinberg, K.C. Jeong and A.T. Adesogan, *Journal Dairy Science*, 101, 3, 2048-2059 (2018). (<https://doi.org/10.3168/jds.2017-12876>).
- Y. XianJun, L. JunFeng, D. ZhiHao, S. Tao, *Bioresource Technology*, 297, 1-9 (2019) (<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122391>).
- B.H. Minhalina, M.H. Amalia, M.H. Nursyuhaida, A.R. Norafzah, A.M. Nur Elina, K.T. Chun, H.N. Muhamad and M.Y. Nur Fatihah, *Scientific Reports*, 12, 7107. (2022) (<https://doi.org/10.1038/s41598-022-08819-4>).
- M. Kanehisa, *Protein Scientific*, 28, 11, 1947–1951 (2019) (<https://doi.org/10.1002/pro.3715>).
- G. Jingui, X. Yixiao, Y. Zhu, M. Geng, W. Zhe, *Applied Microbiology Biotechnology*, 103(19), 7983-7995 (2019) (<https://doi.org/10.1007/s00253-019-10097-6>).
- Z.T. Ding, D.M. Xu, J. Bai, F.H. Li, A.T. Adesogan, P. Zhang, X.J. Yuan and X.S. Guo, *Journal Applied Microbiology*, 127(4), 985-995 (2019) (<https://doi.org/10.1111/jam.14374>).
- А.Г. Лобанок, В.Г. Бабицкая *Микробиологический синтез белка на целлюлозе*, Минск, 1976, 230 с.
- B. Wu, N. Nishino, *Journal Applied Microbiology*, 120 (3), 543-551 (2016) (<https://doi.org/10.1111/jam.13031>).
- M.C. Santos, L.Jr. Kung, *Journal of Dairy Science*, 99, 7, 5466-5469 (2016) <http://doi.org/10.3168/jds.2016-10866>
- О. Ф. Ганущенко, *Животноводство России*, 10, 37-43 (2019) (<http://doi.org/10.25701/ZZR.2019.72.82.010>).
- В.В. Гракун, А.К. Заневский, *Техническое обеспечение технологий заготовки высококачественных кормов*, Минск, 2017, 77 с.
- О.Ф. Ганущенко, *Ветеринарное дело*, 9, 29-37 (2024).
- А.С. Мееровский, Р.Т. Пастушок, А.Л. Бирюкович, О.С. Михайлова, *Мелиорация*, 1, 31-37 (2021).

References

1. G. Xusheng, X. Dongmei, L. Fuhou, B. Jie, S. Rina, *Microbial Biotechnology*, 67-87 (2023).

2. Z. Qing, Y. Zhu, W. Xianguo and T. Jipeng, *Animal Science Journal*, 89, 1085-1092 (2018) (<https://doi.org/10.1111/asj.12961>).
3. I.M. Ogunade, Y. Jiang, A.A. Pech Cervantes, D.H. Kim, A.S. Oliveira, D. Vyas, Z.G. Weinberg, K.C. Jeong and A.T. Adesogan, *Journal Dairy Science*, 101, 3, 2048-2059 (2018). (<https://doi.org/10.3168/jds.2017-12876>).
4. Y. XianJun, L. JunFeng, D. ZhiHao, S. Tao, *Bioresource Technology*, 297, 1-9 (2019) (<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122391>).
5. B.H. Minhalina, M.H. Amalia, M.H. Nursyuhaida, A.R. Norafzah, A.M. Nur Elina, K.T. Chun, H.N. Muhamad and M.Y. Nur Fatihah, *Scientific Reports*, 12, 7107. (2022) (<https://doi.org/10.1038/s41598-022-08819-4>).
6. M. Kanehisa, *Protein Scientific*, 28, 11, 1947-1951 (2019) (<https://doi.org/10.1002/pro.3715>).
7. G. Jingui, X. Yixiao, Y. Zhu, M. Geng, W. Zhe, *Applied Microbiology Biotechnology*, 103(19), 7983-7995 (2019) (<https://doi.org/10.1007/s00253-019-10097-6>).
8. Z.T. Ding, D.M. Xu, J. Bai, F.H. Li, A.T. Adesogan, P. Zhang, X.J. Yuan and X.S. Guo, *Journal Applied Microbiology*, 127(4), 985-995 (2019) (<https://doi.org/10.1111/jam.14374>).
9. A.G. Lobanok, V.G. Babickaja *Microbiological protein synthesis on cellulose*, Minsk, 1976, 230 p.
10. B. Wu, N. Nishino, *Journal Applied Microbiology*, 120 (3), 543-551 (2016) (<https://doi.org/10.1111/jam.13031>).
11. M.C. Santos, L.Jr. Kung, *Journal of Dairy Science*, 99, 7, 5466-5469 (2016) (<http://doi.org/10.3168/jds.2016-10866>).
12. O.F. Ganushhenko, *Animal husbandry in Russia*, 10, 37-43 (2019) (<http://doi.org/10.25701/ZZR.2019.72.82.010>).
13. V.V. Grakun, A.K. Zanevskij *Technical support of technologies for harvesting high-quality feed*, Minsk, 2017, 77 p.
14. O.F. Ganushhenko, *Veterinarnoe delo*, 9, 29-37 (2024).
15. A.S. Meerovskij, R.T. Pastushok, A.L. Birjukovich, O.S. Mihajlova, *Melioracija*, 1, 31-37 (2021).

© Э. В. Логвинова – инженер-технолог, ООО «Фермент», Минск, Республика Беларусь, irulent@tut.by; В. С. Болтовский – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь, v-boltovsky@rambler.ru.

© E. V. Logvinova – Process Engineer, LLC "Ferment", Minsk, Republic of Belarus, irulent@tut.by; V. S. Boltovskiy – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus, v-boltovsky@rambler.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 30.01.26

Дата принятия рукописи в печать – 10.02.26