Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-44-54 Оригинальная статья/Research article
УДК 664.8/.9:636.085.55 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Исследование кинетических закономерностей процесса экструдирования зерновых культур при производстве высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота

Валерий А. Афанасьев [1] vnii_kp@vmail.ru
Лариса Н. Фролова [1] fln-84@mail.ru 0000-0002-6505-4136
Константин А. Сизиков [1] ska@combikorm.ru
Александр Н. Остриков [1] ostrikov27@yandex.ru 0000-0002-2335-0017
Виталий Н. Василенко [1] vvn_1977@mail.ru 0000-0002-1547-9814

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Проблема разработки высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота обусловлена спецификой желудочного тракта коров и особенностями усвоения белка. В связи с важностью предварительной влаготепловой обработки зерна для последующего протекания процесса экструзии, ее проводили паром под давлением 0,6 МПа до увлажнения комбикорма до влажности 17–20% и нагрева до температуры 70–80ºС. Установлено, что тепловая обработка оказывает значительное влияние на углеводный комплекс зерна: нагревание его при высоких температурах вызывает деструкцию крахмала, сопровождающуюся образованием легкорастворимых углеводов, что оказывает положительное влияние на усвояемость корма. Исследованы кинетические закономерности процессов влаготепловой обработки, измельчения и экструдирования зерновых культур при производстве высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота. Установлено, что степень декстринизации и перевариваемость крахмала возрастает с увеличением температуры нагрева кукурузы и её смеси с пшеницей до 100–110 ºС, когда производительность экструдера составила 300–320 кг/ч, перевариваемость крахмала экструдированной кукурузы и зерносмеси увеличивается до 85 и 68 мг глюкозы на 1 г продукта (далее по тексту мг/г) соответственно. Для пшеницы этот показатель ниже и соответственно составляет 50 мг/г. При нагреве в процессе экструдирования кукурузы до температуры до 120–140ºС перевариваемость крахмала составляла 100–110 мг/г, а для зерновой смеси – 80–83 мг/г. При данной температуре перевариваемость крахмала экструдированной пшеницы соответствовала 60–65 мг/г. Наиболее оптимальная влажность комбикорма в процессе экструдирования с целью формирования гранул – 18%. Исследования влияние экструдирования на углеводный комплекс обрабатываемого комбикорма показали, что деструкция крахмала в экструдированном продукте повышается. Так, содержание растворимых углеводов увеличивается на 27–32%, а перевариваемость крахмала в 2 раза в экструдированном комбикорме по отношению к необработанному.

Ключевые слова: кинетика, влаготепловая обработка, измельчение, экструзия, комбикорм, защищенный белок, перевариваемость

Study of the kinetic regularities of the grain extrusion process in the production of highly digestible feed with protected protein for cattle

Valerii A. Afanasiev [1] vnii_kp@vmail.ru
Larisa N. Frolova [1] fln-84@mail.ru 0000-0002-6505-4136
Konstantin A. Sizikov [1] ska@combikorm.ru
Alexsandr N. Ostrikov [1] ostrikov27@yandex.ru 0000-0002-2335-0017
Vitalii N. Vasilenko [1] vvn_1977@mail.ru 0000-0002-1547-9814

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The problem of developing of highly digestible compound feeds with protected protein for cattle is due to the specifics of the gastric tract of cows and the peculiarities of protein assimilation. Due to the importance of preliminary moisture-heat treatment of grain for the subsequent course of the extrusion process, it was carried out by steam at a pressure of 0.6 MPa before moistening the feed to a humidity of 17–20% and heating to a temperature of 70–80° C. It is established that heat treatment has a significant effect on the carbohydrate complex of grain: heating it at high temperatures causes the destruction of starch, accompanied by the formation of easily soluble carbohydrates, which has a positive effect on the digestibility of feed. The kinetic regularities of the processes of moisture-heat treatment, grinding and extrusion of grain in the production of highly digestible feed with protected protein for cattle were studied. The degree of dextrinization and the digestibility of starch increased with the heating temperature of corn and its mixtures with wheat up to 100–110° C, when the performance of the extruder was 300–320 kg/h, the digestibility of starch extruded corn and grain mixture is increased to 85 and 68 mg of glucose per 1 g of the product (hereinafter mg/g), respectively. For wheat, this indicator is lower and, accordingly, is 50 mg/g. When heated during the extrusion of corn to a temperature of up to 120–140° C, the digestibility of starch was 100–110 mg/g, and for the grain mixture – 80–83 mg/g. At this temperature, the digestibility of the starch of extruded wheat corresponded to 60–65 mg/g. The optimal moisture content of feed in the process of extrusion for the purpose of forming pellets is 18%. Studies of the extrusion effect on the carbohydrate complex of processed feed have shown that the destruction of starch in the extruded product increases. Thus, the content of soluble carbohydrates increases by 27–32%, and the digestibility of starch increases twice in extruded feed compared to unprocessed.

Keywords: kinetics, moisture-heat treatment, grinding, extrusion, feed, protected protein, digestibility

Для цитирования
Афанасьев В.А., Фролова Л.Н., Сизиков К.А., Остриков А.Н., Василенко В.Н. Исследование кинетических закономерностей процесса экструдирования зерновых культур при производстве высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 44–54. doi:10.20914/2310-1202-2021-1-44-54

For citation
Afanasiev V.A., Frolova L.N., Sizikov K.A., Ostrikov A.N., Vasilenko V.N. Study of the kinetic regularities of the grain extrusion process in the production of highly digestible feed with protected protein for cattle. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 44–54. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-1-44-54

© 2021, Афанасьев В.А.и др. / Afanasiev V.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Объем производства комбикормов в России в 2020 г. превысил 30 млн. тонн. В условиях интенсивного ведения животноводства, проблема обеспечения его кормовым белком имеет исключительную важность. Белок является незаменимым компонентом всех рационов. Сбалансированность кормов по белку снижает затраты на производство единицы продукции и ее себестоимость, повышает рентабельность животноводства. Потребность комбикормовой промышленности в белковом сырье удовлетворяется только на 60–65%, что приводит к перерасходу зерна на производство комбикормов и снижению их питательной ценности. Так, удельный вес зерна в общем расходе сырьевых ресурсов составляет 63–65%. В США на долю зерновых в составе комбикормов приходится 50–53%, в странах ЕЭС – 38%, а доля отходов перерабатывающих отраслей (жома свекловичного сухого, мелассы, жмыхов, шротов, кормов животного происхождения и др.) соответственно – 39% и 57% [2, 3, 11].

Основным источником белка в настоящее время являются продукты переработки сои, прежде всего, соевый шрот, а также подсолнечника, рапса. Источниками полноценного кормового белка являются рыбная, мясокостная мука. В Российской Федерации объем производства рыбной муки составляет на уровне 90–100 тыс. тонн, а объем производства мясокостной муки – около 350 тыс. т. В силу малых объемов эти два продукта не могут заменить сою, но являются существенными для кормопроизводства в силу высокого качества животного белка.

Удельная масса виды этих компонентов белкового сырья (жмыхи и шроты, рыбная и мясокостная мука) в вырабатываемых отечественной промышленностью комбикормах составляет: жмыхи и шроты – от 8 до 9%; корма животного происхождения – от 0,7 до 1,0%, что является явно недостаточным.

Для обеспечения растущих потребностей животноводческих комплексов высокоусвояемыми комбикормами с защищенным белком для крупного рогатого скота необходимо внедрение новых технологий и разработка новых современных видов технологического оборудования [7, 8, 12, 14–20].

Проблема разработки высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота (КРС) обусловлена спецификой желудочного тракта коров и особенностями усвоения белка. Так в частности, весь объем рациона попадает в первый из 4-х участков преджелудков – рубец. Часть распадается в преджелудках коровы до азота (распадаемый протеин), а часть протеина доходит до тонкого кишечника и под действием энзимов расщепляется до пептидов и далее, до аминокислот (протеин, избежавший распада в рубце, – это нераспадаемый протеин (НРП). Избыточный азот, попадая в кровь, становится аммиаком, который, закисляя кровь, ведет к заболеваниям. Вводя в рацион повышенные нормы белковых добавок без учёта распадаемости белка, резко увеличивается количество образующегося азота N и аммония NH_4, которые способны превращаться в аммиак NH_3. Корова резко теряет упитанность и выбывает после первой-второй лактации, возникают проблемы с воспроизводством. При концентрации свыше 90 % большая часть аммиака всасывается в кровь и далее в печень, вызывая заболевания последней [4, 9].

Повысить продуктивность и сохранить здоровье крупного рогатого скота (КРС) можно, только увеличив в сыром протеине долю защищенного протеина. Защищенный белок – это белок, устойчивый к воздействию ферментов микрофлоры и неспособный к распаду на составляющие – аммиак и углеродную цепочку. Для высокопродуктивных коров защищенный белок должен составлять 45%, легко расщепляемые протеины – не более 15%, кислотно–детергентный протеин – не более 5% и микробный – 35%.

Для получения защищенного белка смесь белка и редуцирующих сахаров нагревают при температуре, уровне pH, чтобы спровоцировать начало реакции Майяра, но не ее развитие. При этом белок меняется и блокирует прикрепление микробных ферментов рубца, тем самым предотвращая расщепление. Связь сильна и остается неизменной, во время нахождения в среде рубца. При попадании в кислую среду сычуга, где уровень pH от 2 до 3, а не от 6 до 6,5 как в рубце, белок денатурирует, и начинает раскручиваться, позволяя ферментам коровы попасть внутрь и разрушить его на составляющие аминокислоты, которые затем усваиваются и используются для синтеза молока. Использование влаготепловой и баротермомеханической обработки зерновых и зернобобовых культур позволяет поучить комбикорма с защищенным белком [5, 6].

Результаты и обсуждение

Известно, что предварительное увлажнение значительно стабилизирует процесс экструзии [1], поэтому особое внимание в исследованиях процесса экструдирования уделялось предварительной влаготепловой обработке зерна. Влаготепловая обработка зерновых и зернобобовых культур заключались в увлажнения комбикорма до влажности 17–20% и нагрева до температуры 70–80ºС паром давлением 0,6 МПа и передачу подготовленного комбикорма на кондиционер. Установлено, что тепловая обработка оказывает значительное влияние на углеводный комплекс зерна. Нагревание его при высоких температурах вызывает деструкцию крахмала, сопровождающуюся образованием легкорастворимых углеводов,

что оказывает положительное влияние на усвояемость корма, а, следовательно, на рост и развитие животных [1, 10, 13, 15].

Изучение влияния предварительной влагообработки зерна на качество зерна показало, что повышение содержания влаги в зерне оказывает заметное влияние на рост деструкции крахмала в процессе экструдирования. Установлено, что декстринизация и перевариваемость крахмала с увеличением влажности зерна до 18% растет интенсивно. Например, в экструдированной кукурузе степень декстринизации и перевариваемость крахмала при данном значении влаги достигала 65% и 140 мг/г, в зерносмеси – 45% и 108 мг/г, в пшенице – 32% и 90 мг/г соответственно (таблица 1, рисунок 1).

Увлажнение зерна выше 18% не оказывает заметного воздействия на рост деструкции крахмала зерна.

При одном и том же значении влажности зерна (18%) с увеличением температуры нагрева экструдированного зерна деструкция крахмала в нем повышается (рисунок 2). Например, при температуре зерна кукурузы 100ºС перевариваемость крахмала в экструдате составляла 60 мг/г глюкозы, то при температуре кукурузы – 120–130ºС. Этот показатель достигал 140 мг/г, что на 40–42% выше, чем в зерне с исходной влажностью.

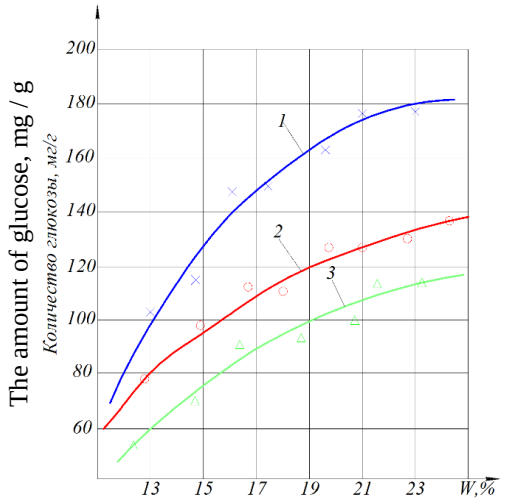

Рисунок 1. Влияние влажности зерна на изменение переваримости крахмала (in vitro) при экструдировании: 1 – увлажненная кукуруза (*W* = 17,6%); 2 – увлажненная зерносмесь (*W* = 17,8%); 3 – увлажненная пшеница (*W* = 18,3%)

Figure 1. The influence of grain moisture on the change in the digestibility of starch (in vitro) during extrusion: 1 - moistened corn (W = 17.6%); 2 - moistened grain mixture (W = 17.8%); 3 - moistened wheat (W = 18.3%)

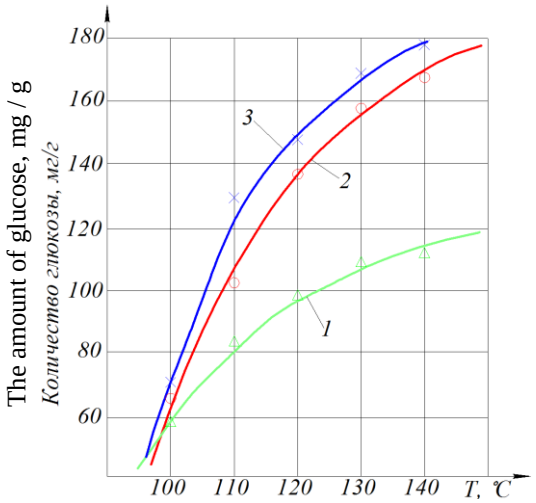

Рисунок 2. Влияние температуры нагрева экструдируемой кукурузы на изменение переваримости крахмала (in vitro) при влажности: 1 – *W* = 12,8%; 2 – *W* = 17,8% (увлажненная); 3 – *W* = 18,3% (пропаренная)

Figure 2. The influence of the heating temperature of extruded corn on the change in the digestibility of starch (in vitro) at humidity: 1 - W = 12.8%; 2 - W = 17.8% (wetted); 3 - W = 18.3% (steamed)

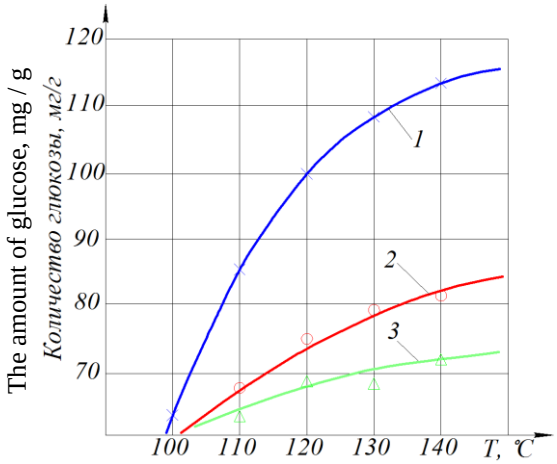

Рисунок 3. Изменение переваримости крахмала (in vitro) от температуры нагрева зерна и зерносмесей с начальной влажностью: 1 – кукуруза (*W* = 12,6%); 2 – зерносмесь (*W* = 12,7%); 3 – пшеница (*W* = 12,1%)

Figure 3. Change in the digestibility of starch (in vitro) from the heating temperature of grain and grain mixtures with initial moisture content: 1 - corn (W = 12.6%); 2 - grain mixture (W = 12.7%); 3 - wheat (W = 12.1%)

Увеличение влагосодержания зерна свыше 18% повышает технико-экономические показатели, однако темп роста их значительно снижается. Предварительное пропаривание также приводит к повышению технико-экономических показателей. При этом энергетические показатели несколько выше при экструдировании пропаренного зерна, чем увлажненного при одном и том же значении влажности (рисунок 3).

Исследование влияния предварительного пропаривания зерна на деструкцию крахмала показало, что обработка зерна паром незначительно влияет на состояние крахмала (таблица 2). Так, пропаривание зерна пшеницы и кукурузы в течение 4 минут увеличивает перевариваемость крахмала на 0,1–0,3 мг/г, а в течение 10 минут – на 0,5–0,7 мг/г по сравнению с их содержанием с исходном зерне.Следует отметить, что увеличение влагосодержания зерна до 18% практически исключает потерю массы экструдированного зерна (таблица 1), в отличие от обработки зерна по отношению к необработанному снижается на 4–5%.

Таблица 1.

Изменение перевариваемости крахмала (in vitro) зерна от продолжительности пропаривания

Table 1.

Change in the digestibility of starch (in vitro) grain from the duration of steaming

Продолжительность пропаривания, мин Duration, min	Влажность зерна, % Humidity, %		Перевариваемость крахмала (in vitro), мг глюкозы на 1 г продукта Starch digestibility	
	кукуруза	пшеница	кукуруза	пшеница
	corn	wheat	corn	wheat
0	13,3	12,3	21,2	12,4
2	13,8	13,7	21,0	12,5
4	14,7	14,6	21,3	12,7
6	15,6	15,3	21,6	12,7
8	16,0	16,7	21,9	12,9
10	16,8	18,3	22,4	13,0
12	17,7	20,1	23,1	13,3
14	18,8	21,8	23,3	13,2
16	19,4	24,6	23,5	13,4

Исследование процесса экструдирования зерна исходной влажности показало, что степень декстринизации и перевариваемость крахмала возрастает с увеличением температуры нагрева кукурузы и её смеси с пшеницей до 100–110ºС, когда производительность экструдера составила 300–320 кг/ч, перевариваемость крахмала экструдированной кукурузы и зерносмеси увеличивается до 85 и 68 мг глюкозы на 1 г продукта (далее по тексту мг/г) соответственно. Для пшеницы этот показатель ниже и соответственно составляет 50 мг/г.

При нагреве в процессе экструдирования кукурузы до температуры до 120–140ºС перевариваемость крахмала составляла 100–110 мг/г, а для зерновой смеси – 80–83 мг/г.

При данной температуре перевариваемость крахмала экструдированной пшеницы соответствовала 60–65 мг/г. Дальнейшее повышение температуры зерна вызывает незначительное увеличение деструкции крахмала, однако имело место интенсивное испарение влаги и снижение технико-экономических показателей процесса экструзии.

Анализируя полученные данные, следует отметить, что наиболее рациональные режимы экструдирования кукурузы с исходной влажностью и зерносмеси: температура продукта на выходе 120–140ºС, нагрузка двигателя – 50–55 А; производительностью экструдера – 420–470 кг/ч; удельный расход электроэнергии 73–85 кВт×ч/т. Для пшеницы данные показатели соответственно изменялись в следующих пределах: 150–155ºС; 58–65 А; 320–330 кг/ч; 120–125 кВт×ч/т. При этом степень декстринизации и перевариваемость крахмала для кукурузы составляла 50–60% и 100–120 мг/г, для зерносмеси 35% и 80 мг/г, для пшеницы 21–23% и 60 мг/г соответственно.

Таблица 2.

Результаты исследований процесса экструдирования зерна

Table 2.

Research results of the grain extrusion process

Продукт	Подготовка	Влажность, %		Степень декстринизации, %	Перевариваемость крахмала, зерна, мг/г	Температура экструдированного зерна,ºС	Производительность экструдера, кг/ч	Удельный расход электроэнергии, кВт×ч/т	Нагрузка двигателя, А
		до	после						
Кукуруза неизмельченная	Без увлажнения	13,3	–	–	22,3	–	–	–	–
Кукуруза неизмельч. экструдированная		13,3	8,4	40,6	86,4	135	452	80,6	55,0
Кукуруза измельч. экструдированная		12,8	7,6	57,2	111,6	138	455	78,8	55,0
	Увлажненная	17,6	11,2	64,4	143,4	122	475	73,8	51,0
	Пропаренная	18,1	11,9	68,7	156,0	127	483	72,6	50,0
Пшеница неизмельч.	Без увлажнения	12,3	–	12,4	–	–	–	–	–
Пшеница неизмельч. экструдированная		12,3	8,1	21,6	59,3	152	312	121,3	58,0
Пшеница измельч. экструдированная		12,1	7,9	29,0	68,5	155	323	120,5	65,0
	Увлажненная	18,3	12,8	32,6	88,8	140	374	95,0	58,0
	Пропаренная	18,6	13,2	38,2	96,5	142	388	90,0	58,0
Зерносмесь измельч.	Без увлажнения	12,7	–	–	19,3	–	–	–	–
Пшеница измельч. экструдированная		12,7	8,9	35,8	79,5	142	416	86,2	55,0
	Увлажненная	17,8	11,6	44,3	108,6	133	426	83,3	52,0
	Пропаренная	18,3	12,3	51,8	135,4	136	434	82,6	52,0

Product	preparation	Humidity, %		Degree of destrination, %	Digestability of starch, grains, mg/g	Extruded grain temperature, sn out	Extruder performance, kg/h	Specific electricity consumption, kWh×h/t	Engine load, A
		before	after						
Unsorthed corn	No hydration	13,3	–	–	22,3	–	–	–	–
The corn is unsorthed. Extruded		13,3	8,4	40,6	86,4	135	452	80,6	55,0
Corn is crushed. Extruded		12,8	7,6	57,2	111,6	138	455	78,8	55,0
	Hydrated	17,6	11,2	64,4	143,4	122	475	73,8	51,0
	Steamed	18,1	11,9	68,7	156,0	127	483	72,6	50,0
Wheat unpealed.	No hydration	12,3	–	12,4	–	–	–	–	–
Wheat unpealed. extruding		12,3	8,1	21,6	59,3	152	312	121,3	58,0
Wheat med. extruding		12,1	7,9	29,0	68,5	155	323	120,5	65,0
	Hydrated	18,3	12,8	32,6	88,8	140	374	95,0	58,0
	Steamed	18,6	13,2	38,2	96,5	142	388	90,0	58,0
Grain chop.	No hydration	12,7	–	–	19,3	–	–	–	–
Wheat med. extruding		12,7	8,9	35,8	79,5	142	416	86,2	55,0
	Hydrated	17,8	11,6	44,3	108,6	133	426	83,3	52,0
	Steamed	18,3	12,3	51,8	135,4	136	434	82,6	52,0

Были проведены опыты по экструдированию увлажненного и пропаренного зерна. Влажность изменяли в пределах от 12 до 25%.

Экструдирование пшеницы с начальной влажностью 12–13% протекает наиболее трудно и нестабильно. Так, экструдирование пшеницы различной влажности позволило установить, что с увеличением содержания влаги в зерне, снижается расход электроэнергии на экструдирование и повышается производительность экструдера.

Полученные зависимости удельного расхода электроэнергии на экструдирование и производительности экструдера от влажности зерна пшеницы (рисунок 4), показывают, что с увеличением влаги в зерне от 12,5% до 18% производительность экструдера возрастает от 300 кг/ч до 380 кг/ч, а удельный расход электроэнергии снижается от 120 до 90 кВт×ч/т. Для кукурузы и зерносмеси с повышением содержания влаги до 18% производительность экструдера достигала 470–480 кг/ч и 430–435 кг/ч; а удельный расход электроэнергии 70–74 кВт×ч/т и 82–83 кВт×ч/т соответственно.

Экструдирование пропаренного зерна интенсифицирует процесс деструкции крахмала. Если в экструдате из пшеницы и кукурузы с исходной влажностью 12–13% перевариваемость крахмала составляла 60–70 и 90–110 мг/г,

то в экструдате, полученном из зерна, прошедшее предварительное пропаривание до влажности 18%, данный показатель увеличился до 100 и 160 мг/г, т. е. на 50–60% (рисунок 5).

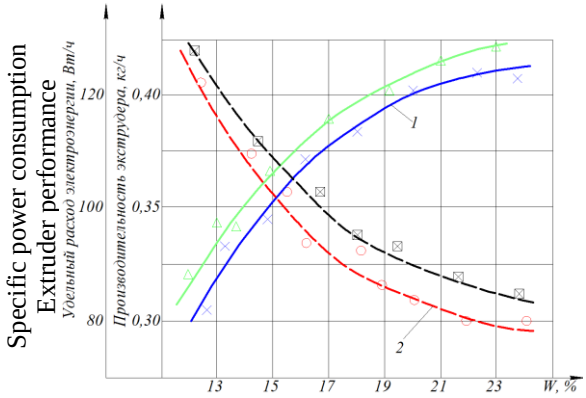

Рисунок 4. Влияние влагосодержания зерна на изменение производительности экструдера и удельного расхода электроэнергии: 1 – увлажненная пшеница; 2 – пропаренная пшеница; (___ – производительность экструдера; – – удельный расход электроэнергии)

Figure 4. nfluence of moisture content of grain on the change in the productivity of the extruder and the specific consumption of electricity: 1 - moistened wheat; 2 – parboiled wheat; (___–productivity of the extruder; - –specific power consumption)

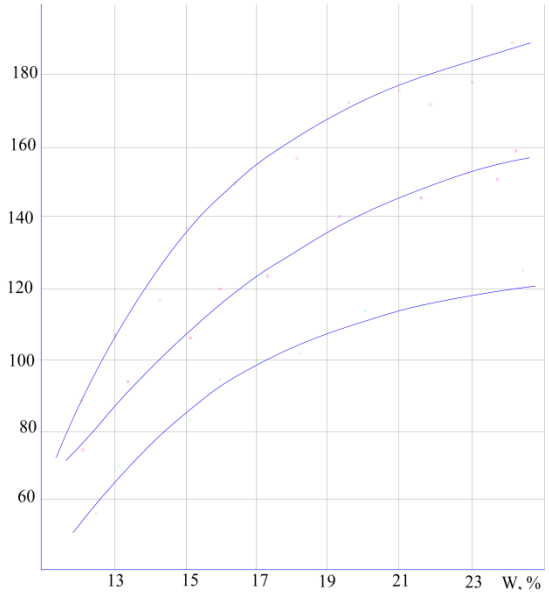

Рисунок 5. Влияние влажности пропаренного зерна на изменение переваримости крахмала (in vitro) при экструдировании: 1 – пропаренная кукуруза (*W* = 18,1%); 2 – пропаренная зерносмесь (*W* = 18,3%); 3 – пропаренная пшеница (*W* = 18,6%)

Figure 5. The influence of the moisture content of parboiled grain on the change in the digestibility of starch (in vitro) during extrusion: 1 - parboiled corn (W = 18.1%); 2 - steamed grain mixture (W = 18.3%); 3 - parboiled wheat (W = 18.6%)

Достигаются данные показатели качества кукурузы при температуре нагрева зерна до 125–130ºС. Для пшеницы эти показатели соответственно равны 140–145ºС и 380–390 кг/ч, для зерносмеси – от 135 до 140ºС и 430–435 кг/ч (таблица 3).

Наряду с этим следует отметить, что пропаривается пшеница до влажности 18% в течение 10–12 минут, кукуруза и зерносмесь – от 15 до 16 минут. При этом давление пара составило 0,2–0,3 МПа, а расход пара – от 75 до 85 кг на 1 тонну обрабатываемого продукта.

Первоначально исследовали возможность экструдирования неизмельченного зерна исходной влажностью, изменяемой от 12,3 до 13,3%. Однако экструдат неизмельченного зерна содержит значительное количество нераздробленных половинок и целых зерен, что существенно снижает качественные показатели готовой продукции. Так, (таблица 1) перевариваемость крахмала (in vitro) неизмельченной пшеницы была ниже на 30–35% по отношению к измельченному экструдированному зерну.

Исследование влияния крупности размола зерна на изменение качества готового экструдированного продукта показало (рисунок 6), что чем меньше диаметр отверстий сита дробилки, тем перевариваемость крахмала выше.

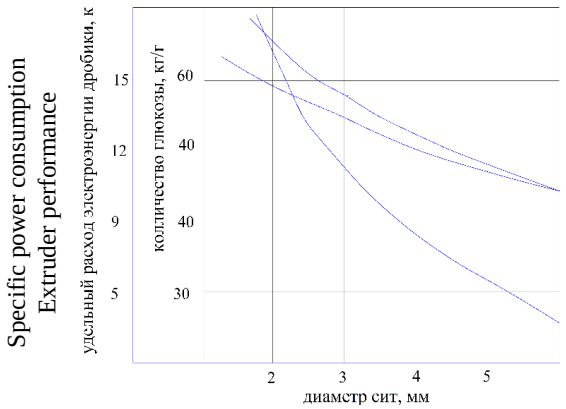

Рисунок 6. Влияние величины диаметра отверстий сита дробилки на перевариваемость крахмала (in vitro) и удельный расход электроэнергии дробилки и экструдера при экструдировании кукурузы: 1 – изменение переваримости крахмала (in vitro); 2 – удельный расход электроэнергии дробилки; 3 – удельный расход электроэнергии экструдера

Figure 6. The influence of the size of the hole diameter of the crusher sieve on the digestibility of starch (in vitro) and the specific power consumption of the crusher and extruder during corn extrusion: 1 – change in the digestibility of starch (in vitro); 2 – specific power consumption of the crusher; 3 – specific power consumption of the extruder

Следует отметить, что разница в показателе содержания количества образуемой глюкозы в исследуемых образцах измельченного и экструдированного зерна небольшая.

Сопоставляя показатели изменения качества и энергетические показатели дробилки и экструдера пришли к выводу, что наиболее оптимальный размер отверстий сита дробилки, на котором измельчается зерно – 3,0 мм. Поэтому в дальнейшем при исследовании процесса экструдирования зерна и приготовленного на базе его комбикорма используется только зерно, измельченное на дробилке с ситом диаметром отверстий 3,0 мм.

Результаты исследований экструдирования измельченного зерна показали, что экструдирование измельченной кукурузы исходной влажности происходит стабильно, с незначительными колебаниями нагрузки на электродвигатель экструдера.

Стабильно осуществляется процесс экструдирования смеси кукурузы и пшеницы кондиционной влажности. При экструдировании данных продуктов температура продукта на выходе составляла 120–140ºС, нагрузка двигателя – от 50 до 55 А, напряжение цепи двигателя постоянного тока – 100 В; производительность экструдера – от 450 до 480 кг/ч; удельный расход электроэнергии – от 72 до 80 кВт×ч/т (таблица 1).

Экструдирование измельченной пшеницы кондиционной влажности проходило с большими затруднениями. Температура продукта на выходе повышалась до 175ºС, колебания нагрузки на основной двигатель экструдера доходила до 20 А и составляли 75–80 А. Наблюдались выбросы продукта, хлопки. Часто происходило пригорание продукта и заклинивание экструдера.

Результаты этих исследований позволили установить, что процесс экструдирования пшеницы исходной влажности стабилизируется при температуре зерна на выходе 150–155ºС, а производительность экструдера составила 330–340 кг/ч.

Анализируя физико-механические свойства рассыпных комбикормов для крупного рогатого скота пришли к выводу, что они имеют следующие свойства: угол естественного откоса 46–50 град, объемная масса – 0,48–0,51 т/м³ (таблица 4). В процессе хранения все комбикорма имеют склонность к комкованию, при истечении из бункеров образуют своды, что объясняется большим количеством содержания жира – не менее 6%.

С целью улучшения технологических свойств комбикормов, для придания ему товарного вида, повышения питательности и особенно важно доброкачественности, а также формирования гранул применяя повторное экструдирование. В связи с этим была поставлена задача определения оптимальных параметром процесса экструдирования комбикормов с целью формирования гранул.

При экструдировании комбикормов для крупного рогатого скота важнейшими технологическими факторами, которые обеспечивают наилучшие условия для формирования гранул, являются температура продукта на выходе из шнека экструдера, производительность экструдера, влага обрабатываемого продукта и нагрузка основного двигателя экструдера.

Конструкция головки шнека экструдера позволила получать готовый продукт в виде гранул диаметром 10–13 мм и длиной 20 мм.

Исследования процесса экструдирования зерна позволило установить, что влажность обрабатываемого продукта за счет пластифицирования оказывает существенное влияние на процесс экструдирования.

Изучение влияния содержания влаги на процесс экструдирования и целью формирования гранул проводили при постоянном качественном составе крупности рассыпного комбикорма (таблица 4).

Влажность комбикорма изменяли путем его увлажнения водой от 12 до 25%. За критерий эффективности процесса были приняты производительность экструдера, удельный расход электроэнергии и качественные показатели – крошимость гранул и проход сита Ø 2 мм.

Полученные результаты исследований, показали, что с увеличением влажности комбикорма производительность экструдера уменьшается (рисунок 7). Так, при содержании влаги в комбикорме 12–13% производительность экструдера составляла 350–370 кг/ч, а удельный расход электроэнергии – 53–56 кВт×ч/т, то при влажности комбикорма 18% эти показатели увеличивались до 450 кг/ч и 62–63 кВт×ч/т соответственно. Дальнейшее увеличение влагосодержания более 18% повышает технико-экономические показатели, однако кривые их роста снижаются. Повышение влажности комбикорма при экструдировании улучшает и качество гранул (рисунок 8).

Таким образом, анализируя результаты исследований можно отметить, что наиболее оптимальная влажность комбикорма в процессе экструдирования с целью формирования гранул – 18%.

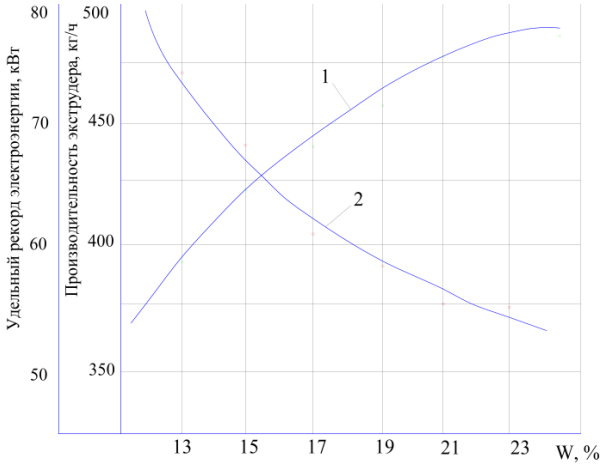

Рисунок 7. Влияние влажности комбикорма на изменение производительности экструдера и удельного расхода электроэнергии: 1 – производительность экструдера; 2 – удельный расход электроэнергии

Figure 7. The influence of the moisture content of the compound feed on the change in the productivity of the extruder and the specific consumption of electricity: 1 – the productivity of the extruder; 2 – specific power consumption

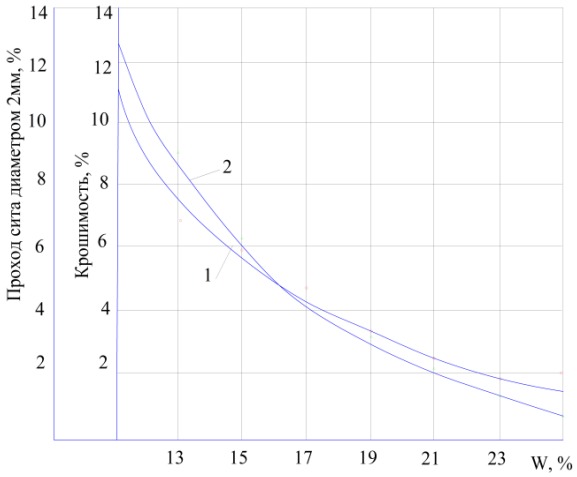

Рисунок 8. Изменение крошимости гранул и величины прохода сита ∅ 2 мм от влажности комбикорма: 1 – крошимость; 2 – проход сита ∅ 2 мм

Figure 8. Changes in the crumbling of granules and the size of the sieve passage ∅ 2 mm from the moisture content of the feed: 1 – crumbling; 2 – sieve passage ∅ 2 mm

Таблица 3.

Качественные показатели рассыпных и экструдированных комбикормов для крупного рогатого скота

Table 3.

Quality indicators of loose and extruded feed for cattle

Продукт Product	Влажность Humidity	Остатки на ситах, % Ext					Угол естеств. откоса, град Deg	Объемная масса, т/м³ Density	Содержание, %				Перевариваемость крахмала (in vitro) мг глюкозы на 1 г продукта
		Ø5	Ø3	Ø2	Ø1	Дно			Сырой протеин Crude protein	Жир Fat	Клетчатка Fiber	Растворимые углеводы Soluble carbohydrates	
Рассыпной комбикорм Loose compound feed	12,9	-	0,5	16,7	36,8	52,0	51	0,530	21,89	11,11	1,20	7,72	29,3
	10,4	-	0,3	15,2	35,5	49,0	48	0,527	21,62	10,58	1,11	6,58	27,4
	12,1	-	0,3	15,5	34,2	50,0	52	0,545	21,74	10,39	1,22	7,96	28,5
Экструдированный комбикорм в гранулах Extruded feed in granules	8,5	-	-	-	-	-	40	0,340	22,34	10,35	1,15	10,54	65,32
	7,4	-	-	-	-	-	41	0,330	21,18	10,64	1,08	19,13	68,15
	7,9	-	-	-	-	-	40	0,395	21,98	10,60	1,13	11,64	63,85

Исследуя влияние экструдирования на углеводный комплекс обрабатываемого комбикорма можно отметить (таблица 1), что деструкция крахмала в экструдированном продукте повышается. Так, содержание растворимых углеводов увеличивается на 27–32%, а перевариваемость крахмала в 2 раза в экструдированном комбикорме по отношению к необработанному.

Основной целью исследования процесса экструдирования при производстве комбикормов для КРС – повышение питательной ценности обрабатываемого продукта за счет денатурации белков и деструкции углеводов. Но питательная ценность экструдированного продукта обуславливается содержанием и изменением в них не только белковых веществ и углеводов, а и наличием биологически активных веществ – витаминов.

С этой целью проведены опыты по изучению влияния экструдирования на изменение содержания витаминов B_1, B_2, E и A в ячмене и комбикорме (таблица 4).

Таблица 4.

Изменение содержания витаминов в ячмене и комбикорме в процессе экструдирования

Table 4.

Changes in the content of vitamins in barley and compound feed during the extrusion process

Продукт Product	Содержание витаминов | Vitamins							
	B_1, мг/кг		B_2, мг/кг		E, м.е./кг		A, м.е./кг	
	Исход.	Экструд.	Исход.	Экструд.	Исход.	Экструд.	Исход.	Экструд.
Ячмень Barley	4,8	5,0	2,1	2,0	5,7	4,55	–	–
Комбикорм Combi	0,76	0,74	2,9	2,9	45,0	42,7	4800	4530
	0,91	0,90	2,0	2,1	–	–	–	–

Экструдирование производили при производительности экструдера 350–400 кг/ч, температура нагрева экструдата 125–130ºС.

В опытах использовали в качестве контроля ячмень и комбикорм с исходной влажностью 12,3 и 12,7% соответственно.

Результаты проведенных исследований показывают, что в экструдированном ячмене содержание витаминов B_1 и B_2 осталось практически без изменений. Не наблюдалось изменения этих витаминов и в экструдированном комбикорме. Содержание витамина Е в ячмене и комбикорме уменьшилось на 23% и 7,3% соответственно. Содержание витамина А в комбикорме снизилось на 5,6%.

Выработку опытных партий комбикормов, проводили в условиях ОАО "Богдановичский комбикормовый завод". Партии комбикормов готовили в соответствии с рецептами ПК-5 и ПК-6 по восьми вариантам.

В соответствии со схемой зоотехнических исследований первый и шестой варианты комбикормов, были контрольными и содержали подсолнечный и соевый шроты. По остальным вариантам готовили комбикорма, в состав которых вводили сою или рапс, прошедшие различную технологическую подготовку. Для всех опытных партий комбикормов зерновые компоненты (кукуруза, пшеница, ячмень) и шроты измельчали на молотковой дробилке БД-2М при установке сит с отверстиями Ø 3, 4, 5 и 6,3 мм, обеспечивая получение продуктов размола требуемой крупности. Подготовку белкового и минерального сырья (рыбная мука, дрожжи, мел, соль) производили по обычной технологии, включающей очистку сырья от сорной примеси, просеивание на сите с отверстиями Ø3 мм, доизмельчение сходовых фракций.

Применение высокоусвояемых комбикормов с защищенным белком позволила увеличить молочную продуктивность высокоудойных коров на 18%, содержание белка в молоке – на 12%, а продолжительность их использования возросла с 1,5–2-х до 4–5 лактаций [1].

Заключение

1. Установлено, что тепловая обработка оказывает значительное влияние на углеводный комплекс зерна: нагревание его при высоких температурах вызывает деструкцию крахмала, сопровождающуюся образованием легкорастворимых углеводов, что оказывает положительное влияние на усвояемость корма.

2. Установлено, что степень декстринизации и перевариваемость крахмала возрастает с увеличением температуры нагрева кукурузы и её смеси с пшеницей до 100–110ºС, когда производительность экструдера составила 300–320 кг/ч, перевариваемость крахмала экструдированной кукурузы и зерносмеси увеличивается до 85 и 68 мг глюкозы на 1 г продукта (далее по тексту мг/г) соответственно.

3. Исследования влияние экструдирования на углеводный комплекс обрабатываемого комбикорма показали, что деструкция крахмала в экструдированном продукте повышается, так, содержание растворимых углеводов увеличивается на 27–32%, а перевариваемость крахмала – в 2 раза в экструдированном комбикорме по отношению к необработанному.

Литература

1 Афанасьев В. А., Остриков А. Н., Василенко В. Н., Фролова Л. Н. и др. Разработка стартерных комбикормов для крупного рогатого скота // Кормопроизводство. 2020. № 2. С. 39–42.

2 Золотарёв А., Седюк И., Золотарёва С. Продуктивность дойных коров при использовании новейшей технологии кормления // Научно-технический бюллетень Института животноводства Национальной академии аграрных наук Украины. 2020. № 124. С. 79–88.

3 Есаулова Л.А. Необходимость использования кормовых добавок в рационах высокопродуктивных дойных коров в хозяйствах воронежской области // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (52). С. 61–69. doi: 10.17238/issn2071-2243.2017.1.61

4 Летунович Е.В., Яцко Н.А. Использование "защищенного" различными способами протеина корма при кормлении коров // Зоотехническая наука Беларуси. 2012. Т. 47. № 2. С. 148–163.

5 Погосян Д.Г., Чудайкин В.В. Распадаемость протеина в рубце и использование азотистых веществ корма у растущих бычков при химической и барогидротермической обработке кормов // Проблемы биологии продуктивных животных. 2011. № 2. С. 79–86.

6 Романов В.Н., Боголюбова Н.В., Девяткин В.А., Гришин В.Н. и др. Особенности пищеварительных и обменных процессов у молодняка крупного рогатого скота при включении в рационы "защищенной" формы карнитина // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2015. № 1. С. 35–42.

7 Таранович А. «Защищенные» жиры и белки в кормлении высокопродуктивных коров // Молочное и мясное скотоводство. 2010. № 4. С. 18–20.

8 Харитонов Е.Л., Остренко К.С., Лемешевский В.О. Профилактика нарушений рубцового пищеварения у растущих бычков молочных пород // Ветеринария. 2020. № 9. С. 50–55.

9 Чуприна Е.Г., Власов А.Б., Юрин Д.А., Юрина Н.А. Кормовой продукт в рационах новотельных коров, состоящий из защищенного соевого и подсолнечного белка // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2020. № 10 (183). С. 24–32.

10 Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Василенко В.Н., Фролова Л.Н. и др. Оценка эффективности технологии получения зерновых хлопьев для производства комбикормов для молодняка крупного рогатого скота // Кормопроизводство. 2017. № 6. С. 33–38.

11 Kamau E.H., Nkhata S.G., Ayua E.O. Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients and bioactive components of cereals and legumes // Food science & nutrition. 2020. V. 8. № 4. P. 1753-1765. doi: 10.1002/fsn3.1473

12 Menis-Henrique M.E.C., Scarton M., Piran M.V.F., Clerici M.T.P.S. Cereal fiber: extrusion modifications for food industry // Current opinion in food science. 2020. doi: 10.1016/j.cofs.2020.05.001

13 Abdel-Ghani A.A. et al. Productive performance and blood metabolites as affected by protected protein in sheep // Open Journal of Animal Sciences. 2011. V. 1. № 02. P. 24. doi:10.4236/ojas.2011.12004

14 Shelke S.K. et al. Protected nutrients technology and the impact of feeding protected nutrients to dairy animals: a review // Int J Dairy Sci. 2012. V. 7. P. 51-62. doi: 10.3923/ijds.2012.51.62

15 Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // Critical reviews in food science and nutrition. 2019. V. 59. № 18. P. 2979-2998. doi: 10.1080/10408398.2018.1480007

16 Alqaisi O., Moraes L.E., Ndambi O.A., Williams R.B. Optimal dairy feed input selection under alternative feeds availability and relative prices // Information Processing in Agriculture. 2019. V. 6. № 4. P. 438-453. doi: 10.1016/j.inpa.2019.03.004

17 Amid S., Gundoshmian T.M., Shahgoli G., Rafiee S. Energy use pattern and optimization of energy required for broiler production using data envelopment analysis // Information Processing in Agriculture. 2016. V. 3. № 2. P. 83-91. doi: 10.1016/j.inpa.2016.03.003

18 Fu Q., Shen W., Wei X., Zheng P. et al. Prediction of the diet nutrients digestibility of dairy cows using Gaussian process regression // Information Processing in Agriculture. 2019. V. 6. № 3. P. 396-406. doi: 10.1016/j.inpa.2018.11.005

19 Zeyner A., Kirchhof S., Susenbeth A., Südekum K.H. et al. A new protein evaluation system for horse feed from literature data // Journal of nutritional science. 2015. V. 4. doi: 10.1017/jns.2014.66

20 Chakraborty P., Shivhare U. S., Basu S. Effect of milk composition on sensory attributes and instrumental properties of Indian Cottage Cheese (chhana) // NFS Journal. 2021. V. 23. P. 8-16. doi: 10.1016/j.nfs.2021.02.002

References

1 Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Frolova L.N. et al. Development of starter compound feed for cattle. Feed production. 2020. no. 2. pp. 39–42. (in Russian).

2 Zolotarev A., Sedyuk I., Zolotareva S. Productivity of dairy cows using the latest feeding technology. Scientific and technical bulletin of the Institute of Livestock of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. 2020. no. 124. pp. 79–88. (in Russian).

3 Esaulova L.A. The need to use feed additives in the diets of highly productive dairy cows in the farms of the Voronezh region. Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2017. no. 1 (52). pp. 61–69. doi: 10.17238/issn2071-2243.2017.1.61 (in Russian).

4 Letunovich E.V., Yatsko N.A. The use of feed protein "protected" by various methods when feeding cows. Zootechnical Science of Belarus. 2012. vol. 47. no. 2. pp. 148–163. (in Russian).

5 Pogosyan D.G., Chudaykin V.V. Protein degradability in the rumen and the use of nitrogenous feed substances in growing bulls during chemical and barohydrothermal processing of feed. Problems of biology of productive animals. 2011. no. 2. pp. 79–86. (in Russian).

6 Romanov V.N., Bogolyubova N.V., Devyatkin V.A., Grishin V.N. et al. Peculiarities of digestive and metabolic processes in young cattle when the "protected" form of carnitine is included in the diets. Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Livestock. 2015. no. 1. pp. 35–42. (in Russian).

7 Taranovich A. "Protected" fats and proteins in feeding highly productive cows. Dairy and beef cattle breeding. 2010. no. 4. pp. 18–20. (in Russian).

8 Kharitonov E.L., Ostrenko K.S., Lemeshevsky V.O. Prevention of cicatricial digestion disorders in growing bulls of dairy breeds. Veterinary Medicine. 2020. no. 9. pp. 50–55. (in Russian).

9 Chuprina E.G., Vlasov A.B., Yurin D.A., Yurina N.A. Forage product in the diets of fresh cows, consisting of protected soy and sunflower protein. Feeding agricultural animals and fodder production. 2020. no. 10 (183). pp. 24–32. (in Russian).

10 Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Frolova L.N. et al. Evaluation of the efficiency of the technology for obtaining cereal flakes for the production of compound feed for young cattle. Feed production. 2017. no. 6. pp. 33–38. (in Russian).

11 Kamau E.H., Nkhata S.G., Ayua E.O. Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients and bioactive components of cereals and legumes. Food science & nutrition. 2020. vol. 8. no. 4. pp. 1753-1765. doi: 10.1002/fsn3.1473

12 Menis-Henrique M.E.C., Scarton M., Piran M.V.F., Clerici M.T.P.S. Cereal fiber: extrusion modifications for food industry. Current opinion in food science. 2020. doi: 10.1016/j.cofs.2020.05.001

13 Abdel-Ghani A.A. et al. Productive performance and blood metabolites as affected by protected protein in sheep. Open Journal of Animal Sciences. 2011. vol. 1. no. 02. pp. 24. doi:10.4236/ojas.2011.12004

14 Shelke S.K. et al. Protected nutrients technology and the impact of feeding protected nutrients to dairy animals: a review. Int J Dairy Sci. 2012. vol. 7. pp. 51-62. doi: 10.3923/ijds.2012.51.62

15 Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K.O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. Critical reviews in food science and nutrition. 2019. vol. 59. no. 18. pp. 2979-2998. doi: 10.1080/10408398.2018.1480007

16 Alqaisi O., Moraes L.E., Ndambi O.A., Williams R.B. Optimal dairy feed input selection under alternative feeds availability and relative prices. Information Processing in Agriculture. 2019. vol. 6. no. 4. pp. 438-453. doi: 10.1016/j.inpa.2019.03.004

17 Amid S., Gundoshmian T.M., Shahgoli G., Rafiee S. Energy use pattern and optimization of energy required for broiler production using data envelopment analysis. Information Processing in Agriculture. 2016. vol. 3. no. 2. pp. 83-91. doi: 10.1016/j.inpa.2016.03.003

18 Fu Q., Shen W., Wei X., Zheng P. et al. Prediction of the diet nutrients digestibility of dairy cows using Gaussian process regression. Information Processing in Agriculture. 2019. vol. 6. no. 3. pp. 396-406. doi: 10.1016/j.inpa.2018.11.005

19 Zeyner A., Kirchhof S., Susenbeth A., Südekum K.H. et al. A new protein evaluation system for horse feed from literature data. Journal of nutritional science. 2015. vol. 4. doi: 10.1017/jns.2014.66

20 Chakraborty P., Shivhare U.S., Basu S. Effect of milk composition on sensory attributes and instrumental properties of Indian Cottage Cheese (chhana). NFS Journal. 2021. vol. 23. pp. 8-16. doi: 10.1016/j.nfs.2021.02.002

Сведения об авторах

Валерий А. Афанасьев д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зернопереработывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vnii_kp@vmail.ru

Лариса Н. Фролова д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия , fln-84@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-6505-4136

Константин А. Сизиков экстерн, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий , пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ska@combikorm.ru

Александр Н. Остриков д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий , пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия , ostrikov27@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Виталий Н. Василенко д.т.н., проректор по УР, ректорат, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vvn_1977@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-1547-9814

Information about authors

Valerii A. Afanasiev Dr. Sci. (Engin.), professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vnii_kp@vmail.ru

Larisa N. Frolova Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, fln-84@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-6505-4136

Konstantin A. Sizikov external student, technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ska@combikorm.ru

Alexsandr N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), head of department, technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0002-2335-0017

Vitalii N. Vasilenko Dr. Sci. (Engin.), prorector, rektorat, Voronezh State University of Engineering Technologies , Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vvn_1977@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-1547-9814

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 25/01/2021	**После редакции** 16/02/2021	**Принята в печать** 01/03/2021
Received 25/01/2021	**Accepted in revised** 16/02/2021	**Accepted** 01/03/2021