

Обзоры, проблемы

УДК 636.085.6

doi: 10.15389/agrobiol.2024.3.411rus

**ФИЗИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ
ПИТАТЕЛЬНОСТИ КОРМОВ***

(обзор)

**Е.А. ВЛАСОВ, Е.А. СИЗОВА[✉], К.С. НЕЧИТАЙЛО, К.В. РЯЗАНЦЕВА,
А.М. КАМИРОВА, А.П. ИВАНИЩЕВА, Д.Е. ШОШИН, Л.Л. МУСАБАЕВА,
А.С. МУСТАФИНА**

Повышение продуктивности домашних животных на 20-30 % за последние 50 лет было достигнуто за счет успехов генетики, интенсификации обменных процессов и влияния на пищеварение (M. Georges с соавт., 2019), а также благодаря эффективной подготовке кормов к скармливанию и обеспечению большей доступности нутриентов для организма (M. Valehgn с соавт., 2020). Корм для животных должен обладать определенными качественными характеристиками: быть питательным, вкусным, чистым, легко перевариваться и хорошо усваиваться, не содержать примесей и веществ, вредных для здоровья и неблагоприятно влияющих на качество животноводческой продукции (M. Valehgn с соавт., 2020). Этим требованиям удовлетворяет лишь незначительная часть кормов, скармливаемых в естественном виде (Р.Ш. Фахрутдинова, 2009). Важным критерием служит конверсия корма, определяющая экономическую эффективность отрасли, поскольку 70 % расходов при выращивании животных приходится на корм. Организм животного перерабатывает в продукцию около 20-25 % энергии корма. Примерно 30-35 % энергии тратится на физиологические нужды, а остальная часть в неусвоенном виде выделяется с экскрементами. Задача подготовки кормов к употреблению заключается в уменьшении потерь энергии посредством изменения физико-химических свойств корма, повышения питательной ценности, доступности для организма, а именно переваримости и усвоения животными (Р.В. Картекенова с соавт., 2013). В российском и мировом производстве комбикормового сырья разработаны разные технологии повышения доступности питательных компонентов. Их можно условно разделить на две группы — физические и биологические методы повышения питательности и доступности кормов (А.И. Фицев, 1997). Цель настоящего обзора — обобщение информации об основных (физических и биологических) методах подготовки кормов к скармливанию, повышения их доступности, улучшения питательности и усвояемости для сельскохозяйственных животных и птицы, а также о принципах действия этих методов и их применения в исследованиях и практике. Физические методы предполагают воздействие температуры, давления или других факторов, а также их сочетание. К ним относятся как простые способы (например, замачивание с проращиванием и без него, жарка), так и технологически более сложные процессы — экструзия, экспандирование (кондиционирование под давлением), микронизация, воздействие сверхвысокочастотными волнами, кавитация (Е. Космынин с соавт., 2006; В.А. Чикулаев, 2020). Биологические методы включают в себя использование бактерий, дрожжей и других микроорганизмов или их метаболитов для расщепления сложных углеводов на более простые и легко усваиваемые формы (ферментация) и производства сопутствующих веществ, которые могут быть использованы животными (К.С. Крылов с соавт., 2000; N. Lau с соавт., 2022). Применение методов ферментации может увеличить эффективность использования корма, улучшить его питательную ценность и снизить количество отходов, что повышает производительность в отрасли и качество продукции (L. Yang с соавт., 2021; L. Yafetto с соавт., 2023). Рассмотренные физические и биологические методы воздействия на кормовые компоненты обеспечивают повышение их усвояемости и общей питательности за счет деградации факторов, препятствующих эффективному пищеварению. Среди ресурсосберегающих технологий в животноводстве подобная стратегия представляется достаточно выгодной. Однако перед выбором того или иного способа следует учитывать ряд важнейших факторов, включая энерго- и трудозатраты, степень разрушения биологически активных компонентов и рентабельность.

Ключевые слова: корм, подготовка к скармливанию, повышение питательности, экструзия, кавитация, переваримость.

За последние 50 лет общий уровень продуктивности домашних животных повысился на 20-30 %. Подобный результат достигается, с одной стороны, за счет успехов генетики, интенсификации обменных процессов и влияния на пищеварение животных, с другой, — благодаря эффективной предварительной подготовке кормов и обеспечению большей доступности

* Тематика поддержана Российским научным фондом, проект № 20-16-00078-П.

нутриентов для организма. Важным признаком служит конверсия корма, определяющая экономическую эффективность отрасли, поскольку 70 % расходов при выращивании животных приходится на корм (1-3).

В настоящее время актуализируется поиск и применение методов увеличения доступности и питательности кормов. На основании анализа результатов исследований в доступных информационных базах (Scopus, PubMed, eLibrary, CyberLeninka) по ключевым словам «повышение питательности», «экструзия», «кавитация», «сельское хозяйство», «кормление», «переваримость корма», «nutritional enhancement», «extrusion», «cavitation», «agriculture», «feeding», «feed digestibility» найдено более 3500 статей, опубликованных за последние 10 лет. Из них около 400 публикаций посвящено использованию кавитационной и около 450 — экструзионной обработки кормов, что составляет около 27 % от всех статей по применению физических методов воздействия на корм.

Углеводы зерновых неоднородны по своему составу. Несмотря на то, что термин «углеводы» объединяет такие вещества, как сахара, крахмал, целлюлоза, лигнин, декстрины и др., они не похожи друг на друга в качественном отношении. Основные зерновые корма (ячмень, кукуруза, пшеница, овес, рожь), имеющие практически равное содержание углеводов (около 80 %), качественно отличаются друг от друга, что влияет на степень переваримости. Это, в свою очередь, обеспечивает значительные различия в содержании обменной энергии (4-6).

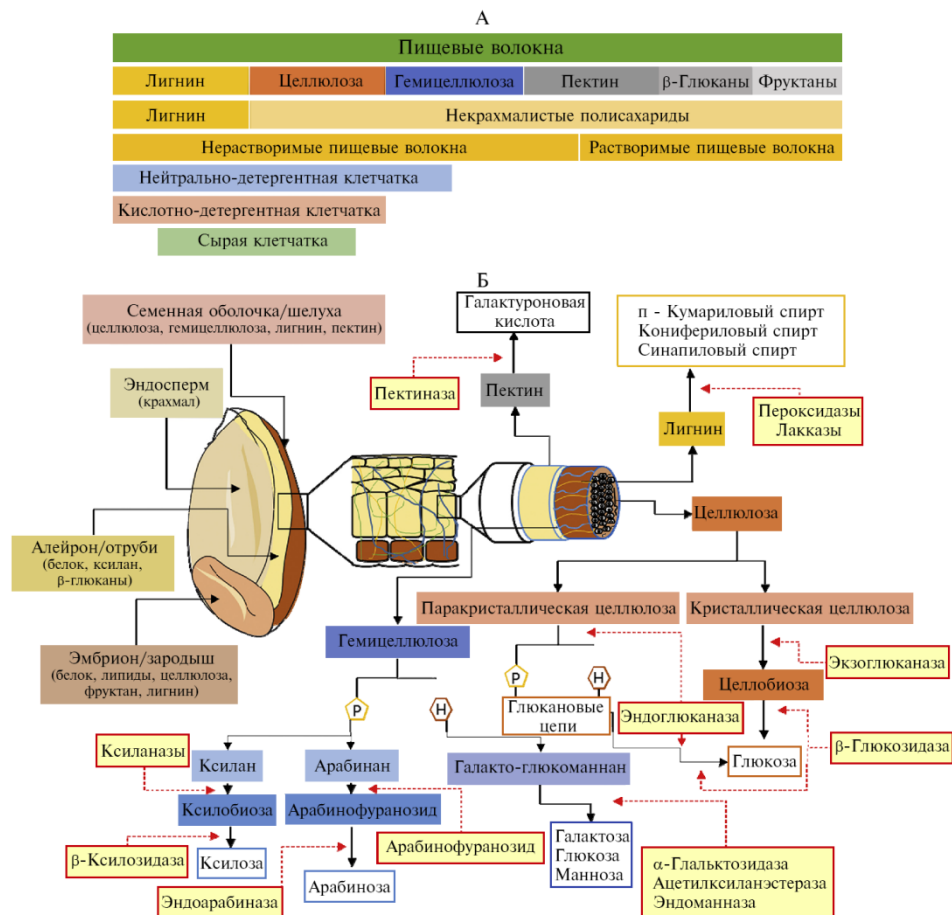
Большинство животных с однокамерным желудком в основном получают энергию из двух типов химических веществ, обобщенно называемых углеводами и жирами. Корма, богатые углеводами, не всегда представляют ценность как источник энергии, поскольку в понятие «углеводы» (рис.) могут входить и непереваримые материалы, например целлюлоза. Сельскохозяйственные животные в большинстве извлекают энергию из простых углеводных молекул, называемых сахарами, поэтому необходимо различать корма с наибольшей и наименьшей переваримостью (7-10).

В российском и мировом производстве комбикормов разработаны технологии повышения переваримости и питательности зернового сырья. Их можно условно разделить на две большие группы — на физические и биологические методы (11, 12).

Физические методы предполагают воздействие температуры, давления или других факторов, а также их сочетание. К физическим методам относятся как простые способы (например, замачивание с проращиванием и без него, жарка), так и более сложные в технологическом отношении процессы — экструзия, экспандирование (кондиционирование под давлением), микронизация, воздействие сверхвысокочастотными волнами, кавитация (13, 14). Биологические методы включают в себя использование бактерий, дрожжей и других микроорганизмов или их метаболитов для переработки клетчатки и производства различных сопутствующих веществ, которые могут быть использованы животными (15-17). Биологическая ферментация происходит внутри желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) или в искусственно созданной среде (*in vitro*) (18).

В основе процесса ферментации лежит добавление в корм определенных видов микроорганизмов, например молочнокислых бактерий, которые способны расщеплять сложные углеводы на более простые, легко усваиваемые формы. Они также используются для обогащения корма витаминами, ферментами и другими биологически активными веществами. Применение методов ферментации может увеличить эффективность исполь-

зования корма, улучшить его питательную ценность и снизить количество отходов, что приводит к повышению производительности в отрасли и качества продукции (19, 20).



Классификация пищевых волокон (А), распределение пищевых волокон в зерне и участки ферментативной атаки (Б) (7).

Цель настоящего обзора — обобщение информации об основных (физических и биологических) методах подготовки кормов, повышения их доступности, улучшения питательности и усвояемости для сельскохозяйственных животных и птицы, а также о принципах действия этих методов и их применения в исследованиях и практике животноводства и птицеводства.

Кавитация — процесс, при котором возникает эффект так называемых схлопываемых пузырьков при резком снижении давления в жидкости, сопровождающийся сильным высвобождением энергии и последующим гидравлическим ударом (21). Эффективность этого метода заключается в разрыве структурных звеньев полимерных растительных частиц, таких как целлюлоза и крахмал. Вследствие разрыва из длинных цепочек полимеров образуются более короткие разветвленные крахмальные структуры и гидролизованые короткие структуры сахаров. Преобразование углеводов в более короткоцепочечные увеличивает переваримость кормов (22).

С помощью кавитационного воздействия можно производить корма на основе вторичных ресурсов растительного сырья (шелуха, солома отруби), изменяя их химический состав (23).

Кавитация за счет одновременного нагревания и перемешивания дает возможность получать мелкодисперсную, влажную, гомогенную смесь, которая не распадается на части в течение длительного времени. Метод позволяет снижать количество клетчатки и увеличивать долю сахаров и аминокислот, не уменьшая общее содержание питательных веществ (24). Однако термическая обработка приводит к частичной потере витаминов, ферментов, изофлавоноидов, а также к денатурации белков (25). Некоторые источники свидетельствуют, что для сохранения биологически активных веществ целесообразно использовать менее высокие температуры (80 °С) (26, 27). Доказано, что в процессе кавитации повышается доступность компонентов корма, в результате чего возрастает переваримость питательных веществ рациона (28-30).

Флокирование — метод влаготепловой обработки зерна с последующим плющением, при котором время пропаривания длится 12-14 мин при температуре 94 °С. Корм превращается в питательный хлопьевидный продукт с хорошим вкусом, при потреблении которого у животного снижаются затраты энергии на переваривание (31, 32).

Установлено, что гидротермическая обработка зерна (флокирование) снижает долю непереваримой клетчатки и антипитательных веществ. Кроме того, переваримость крахмала повышается в 1,5 раза, протеина — на 15-20 %. При гидробаротермической обработке зерна вследствие длительного воздействия температуры происходит частичное разрушение протеина и жира, что понижает энергетическую питательность гидролизатов в сравнении с исходным зерном на 0,16-0,6 МДж. Включение в рацион коров такого зерна позволило получить суточный удой на 1 кг выше по сравнению с применением зерна в дробленном виде (33). Гидротермическая обработка зернового сырья влияет на поверхностную и глубинную микрофлору. С увеличением времени обработки пшеница и ячмень, искусственно зараженные, а также зараженные естественным способом, были обеззаражены на 100 % (34). Установлена зависимость между величиной зазора валков и степенью клейстеризации крахмала зерна овса (35).

Кондиционирование — двухэтапный технологический процесс, при котором на первом этапе корма обрабатываются водяным паром при 70-83 °С. Далее пропаренный комбикорм из кондиционера направляется в экспандер и проходит этап плющения и пропаривания при избыточном давлении. При этом оператор экспандера контролирует такие параметры, как давление, температура продукта на выходе из экспандера, величина кольцевого зазора, а также управляет экспандером, наблюдает и при необходимости изменяет регистрируемые данные, которые передаются в монитор (36).

Кондиционирование в сравнении с экспандированием менее энергоемко (удельные затраты энергии при экструдировании составляют 100-150 кВт·ч/т). При экспандировании значительное количество энергии теряется вследствие теплового излучения и испарения пара при резком снижении давления. Под действием высокой температуры разрушаются витамины, находящиеся в комбикормах (37, 38). При кормлении свиней кормом, подвергнутым термообработке, конверсия корма улучшалась на 4,8 %, среднесуточный прирост живой массы — на 3,3 % (39).

Обработка горячим паром и в некоторых случаях озоном позволяет максимально снизить обсемененность зерна бактериями и грибами, что, в свою очередь, благотворно сказывается на экономике птицеводческих хозяйств, поскольку снижается падеж и вынужденный убой (40).

Имеются данные о том, что гидротермическая обработка повышала

перевариваемость крахмала, скорость роста и улучшала использование корма у цыплят-бройлеров (41). Однако количество и активность большинства витаминов, ферментов, как и антипитательных факторов, например ингибиторов ферментов, лектинов и фитатов, имеют тенденцию к снижению (42).

Смешивание — физическая обработка корма, направленная на достижение однородного распределения всех компонентов. При этом смешивание не приводит к снижению количества микотоксинов, присутствующих в кормах. Компоненты, из которых изготавливается корм, должны соответствовать нормативным требованиям и быть свободными от микотоксинов. Тем не менее в процессе смешивания могут быть добавлены вещества, связывающие микотоксины, которые обеспечивают их недоступность для животных. Исследования *in vitro* с кормом, загрязненным микотоксинами, показали, что действие микотоксинов, связанных подобными добавками, приводило к менее серьезным патологическим эффектам у животных. Примерами добавок для связывания микотоксинов служат активированный уголь (43, 44) и молочнокислые бактерии (45, 46). Последние могут естественным образом присутствовать при силосовании. Поскольку микотоксины физически не удаляются из корма, добавление связывающих веществ не оказывает влияния на результаты количественного определения микотоксинов в корме в целом (47, 48). По этой причине может быть трудно рассмотреть законодательно вопрос об использовании микотоксин-связывающих агентов, поскольку будет непросто измерить их эффективность.

Экструзия — высокотемпературный (например, при 180-200 °С) и кратковременный процесс влажного прессования с последующим схлопыванием корма. Суть метода заключается в гидро-, баро- и термообработках сырья, в результате которых корм сжимается под высоким давлением и выталкивается в область атмосферного давления. Затем происходит взрыв, в результате которого объем корма увеличивается. В основе этой технологии лежат два основных процесса: механохимическая деструкция на всех этапах и декомпрессионный шок, или взрыв, на выходе продукта из экструдера, что завершает структурные преобразования корма (49). Преимущества экструзии заключаются в возможности индивидуальной обработки любого типа сырья, а также в использовании различных композиций. Эта технология особенно эффективна для производства комбикормов, которые включают зерновые культуры, сою, жмых и шрот (50, 51). Экструзия может успешно применяться при переработке отходов птицеводства, мясо- и рыбоперерабатывающей промышленности для получения питательного сырья.

Доказано, что экструзионная обработка корма способствует повышению переваримости минеральных веществ. Экструдированная пшеничная мука имела значительно более высокое содержание Fe и Cu и более низкое общее содержание крахмала, чем неэкструдированная (52). Положительные результаты получены при экструзионной обработке пшеничных отрубей в сочетании с высокодисперсными порошками. Переваримость питательных веществ в эксперименте *in vitro* повышалась с 64,2 до 78,2 %, что сопровождалось ростом биодоступности минеральных веществ из кормового продукта: Zn — на 21,6 %, Cu — 2,98 %, Fe — 7,3 % (53). Также менялся аминокислотный состав кормов (54). Наряду с этим, экструзия может обеспечить возможность использовать в рационе животных отходы зерноперерабатывающей промышленности, например гречишную и подсолнечную лузгу. Совместно с обработкой 5 % раствором NaOH экструдирование снижает содержание в лузге клетчатки и лигнина, что делает корм более

доступным для переваривания животными (55).

В мире в целом (56) и в частности в Китае (57), Нигерии (58), Бразилии (59) существует острая проблема загрязнения кормов микотоксинами. Термические процессы при производстве кормов влияют на содержание микотоксинов в готовых продуктах, значительно его снижая. Экструзионная обработка может вносить вклад в улучшение качества кормов за счет как увеличения биодоступности, так и обеспечения безопасности при обеззараживании кормов (60, 61).

Фрезерование — механическая обработка резаньем, при которой многолезцовый инструмент (фреза) совершает вращательное, а обрабатываемый материал — поступательное движение (движение подачи). Этот метод считается не самым эффективным для повышения переваримости кормов, но способствует снижению содержания микотоксинов. Как правило, это вторичные метаболиты плесневых грибов, среди которых особое внимание уделяют дезоксиниваленолу (DON), зеараленону (ZEN), афлатоксинам (AF), охратоксину А (OTA), фумонизинам (FUM) и трихотеценам (Т-2, НТ-2), значимо влияющим на здоровье животных (62-64).

Измельчение и очищение зерна обеспечивает снижение содержания токсинов. Решающим этапом в переработке кормов на основе злаков становится измельчение ядер, которое не устраняет микотоксины, но приводит к перераспределению их количества в различные фракции — отруби, шрот, мука для дробления и измельчения (65).

Многочисленные исследования ученых разных стран показали, что наружные части зерен пшеницы (отруби) содержат большее количество DON по сравнению с внутренними частями (66, 67). В то же время сухой помол может снижать содержание DON в эндосперме на 53 % по сравнению с очищенным цельным зерном (68).

Исследователи заметили разницу между количеством OTA в измельчаемых фракциях мягкой и твердой пшеницы. Его высокие концентрации отмечены в отрубях и субпродуктах твердой пшеницы по сравнению с мягкой (69). Сделан вывод, что измельчение мягкой пшеницы менее эффективно в результате худшего сепарирования ее фракций (70).

В очищенной ржи содержалось на 3000 мкг/кг меньше алкалоидов спорыньи по сравнению с неочищенной (71). При этом измельчение очищенной ржи уменьшало содержание алкалоидов с 356 до 239 мкг/кг в отрубях после помола.

Исследование, посвященное ячменю и эффекту его сухого помола, было сосредоточено на удалении шелухи при двух типах помола. Шелуха с ядер ячменя удалялась с помощью роликового фрезерования и прецизионного фрезерования. Валковая мельница смогла удалить 36,7 % DON, а прецизионная мельница — 85,1 % (66).

Подобно пшенице и ячменю, при сухом помоле кукурузы микотоксины в больших количествах концентрируются во фракции отрубей. Накопление DON было в 17 раз, Т-2 — почти в 3 раза, токсина НТ-2 — почти в 13 раз выше в отрубях, чем в сырых кукурузных зернах. Высокое содержание DON отмечено в зародыше и муке из него, а также в отсевах (соответственно 4056, 2994 и 2543 мкг/кг) (72).

Фрезерование зерна привело к увеличению содержания жира в отрубях на 60 % по сравнению с образцами сырой кукурузы после помола. В кукурузной муке, используемой в качестве корма, концентрации микотоксинов (FB₁, FB₂, AFB₁, AFB₂, AFG₁ и AFG₂) были выше по сравнению с нативным зерном. Кукурузная мука с меньшим размером частиц имела более высокую концентрацию DON, FB₁, FB₂ и ZEN, чем крупа грубого

помола (73).

Содержание АF и FUM зависит от степени измельчения и финальных размеров частиц. Так, мелкие частицы кукурузы имели более высокие концентрации АF и FUM, чем более крупные (74). Кукурузная пыль плотностью 0,12 г/см³ содержала 166 мкг/кг АF, тога как в крупных зерновых частицах плотностью 1,43 г/см³ количество АF составляло 18 мкг/кг.

В отличие от сухого помола, мокрый помол включает стадию замачивания либо муки, либо целых зерен. Замачивание облегчает отделение соединений эндосперма и может вызвать перемещение микотоксинов в жидкие фракции, что приводит к снижению их количества в твердых побочных продуктах. Однако следует отметить, что жидкие фракции часто добавляются к твердым побочным продуктам для получения глютеносодержащего корма.

Группой ученых был проведен опыт по сравнительному определению влияния сухого и влажного помола (оба применялись к цельному зерну) на содержание микотоксинов в пшенице. Концентрация DON в цельном зерне составляла 57-61 %, в отрубях твердой яровой пшеницы и в отрубях твердой пшеницы после сухого помола — 48-51 %. После мокрого помола максимальная доля DON в отрубях составляла 7 %. Большая часть DON (97 % для твердой яровой пшеницы и 95 % для твердых сортов пшеницы) была извлечена в виде водорастворимых фракций, отделенных от влажной клейковины и крахмала. В итоге влажный помол оказался более эффективным для снижения содержания DON, в то время как сухой помол увеличивал концентрацию DON в отрубях (75).

Таким образом, фрезерование позволяет отделить фракцию, содержащую микотоксины, от фракции, в которой их количество меньше, а с помощью мокрого помола можно удалить часть микотоксинов, которые были растворены в воде.

В последние годы наблюдается растущий интерес к использованию ферментов для извлечения белка. Ферменты — глобулярные белки, получаемые из микроорганизмов, растений, животных и человека и функционирующие в качестве катализатора (76). Ферменты применяются в пищевой промышленности уже долгое время, служат биотехнологической основой рецептов молочных, мясных и хлебобулочных изделий (77). В промышленности используют карбогидразу, липазу и преимущественно протеазу (78).

Процесс экстракции веществ с помощью ферментов считается экологически безопасным, поскольку они заменяют этапы, включающие сильные химические или физические воздействия (79). Разрушение клеток во время экстракции с помощью ферментов — один из наиболее важных этапов высвобождения белка из внутренних клеточных компартментов в растворимой форме (80). Существует множество доказательств, которые определяют процесс с участием ферментов как неинвазивный метод зеленой экстракции (81). Экстракция с помощью ферментов позволяет успешно извлекать аминокислоты, такие как глутамин и аспарагин, которые обычно легко разрушаются в результате кислотного и щелочного гидролиза (82). Полученные продукты часто более пригодны для непосредственного потребления (83).

Применение экстракции с помощью ферментов зависит от условий, включая соотношение субстрата и фермента, специфичную для фермента температуру и pH, а также время экстракции (84-86). При выборе ферментов важна внутренняя матрица (вид, структура и состав) сырья. Продемонстрирована применимость грибных аспарагиновых эндопептидаз в пищевой и кормовой промышленности. Эффективный гидролиз белков промышленно важных субстратов, таких как кислая сыворотка, или кормовых

белков можно провести с помощью грибных аспарагиновых пептидаз (87). Использование микробного штамма *Pseudomonas fluorescens*, продуцирующего ксиланазу, позволяет производить пищевые и кормовые ферментные препараты (88).

Роль большинства карбогидраз (целлюлаз и пектиназ) заключается в разрушении внешней клеточной стенки (89), тогда как протеолитические ферменты гидролизуют белок внутри цитоплазмы (79). В исследовании, посвященном экстракции белка с помощью нейтразы, алкалазы и пепсина, наибольшее количество экстрагированного белка удалось получить при использовании алкалазы (67,6 %) и пепсина (64 %) (90). Аналогичным образом был проведен эксперимент с применением экстракции с помощью ферментов алкалазы и нейтразы (по отдельности и в комбинации). Самый высокий выход наблюдался при использовании алкалазы. Вероятно, это связано с тем, что алкалаза представляет собой пищевую эндопротеиназу (91) с широкой специфичностью, позволяет гидролизировать мембраны, окружающие липидные тела, тем самым эффективно высвобождая цитоплазматический белок и более мелкие пептиды (92).

Альтернативный подход заключается в комбинировании водной экстракции и экстракции с помощью ферментов для получения белковых изолятов (81). Эти белковые изоляты благодаря своим основным функциональным параметрам используются в качестве эмульгаторов, стабилизаторов и пенообразователей, а также как фортификаторы для повышения питательной ценности конечного продукта (93, 94). Помимо экстракции цельного белка, все чаще практикуется получение гидролизата из изолятов белка (95, 96).

Применение ферментов для экстракции в промышленных масштабах — относительно новая область. Как правило, экстракция с помощью ферментов проводится в лаборатории и имеет потенциальные коммерческие и технические ограничения, включая стоимость ферментов. Специфичность ферментов ограничена (например, способностью только к частичному гидролизу клеточных стенок растений). Активность ферментов зависит от определенных факторов окружающей среды (температура инкубации, доступность субстрата и pH). Основной проблемой при применении ферментов на промышленных установках становятся эксплуатационные расходы, которые на 28–30 % связаны с сырьем. Синтез новых ферментов наряду с очисткой ферментативных смесей поможет в снижении затрат. Одним из таких примеров может быть производство ферментов с использованием микроорганизмов — бактерий, дрожжей и грибов (97). По сравнению с животными и растительными источниками микробные ферменты коммерчески предпочтительнее в силу их экономической эффективности и стабильного производства (86).

Биоферментация — биохимическая переработка сырья с помощью микроорганизмов и их ферментов. Ферменты вырабатываются микробиотой, в то время как сырье (корм) выступает субстратом. Если ферментация происходит в анаэробной среде, то такую реакцию называют брожением. С. Shi с соавт. (98) провели двухстадийную ферментацию с использованием *Bacillus subtilis* с последующим добавлением *Enterococcus faecium*. В результате бактерии эффективно снизили содержание фитиновой кислоты в комбикорме. Кроме того, высокая концентрация молочной кислоты и низкий pH в ферментированном инокулированном корме препятствовали пролиферации представителей *Enterobacteriaceae*. Результаты переваривания *in vitro* показали, что инокулированный корм, подвергнутый двухстадийной ферментации, имел более высокую усвояемость, чем ферментированный в

одну стадию.

У. Суй с соавт. оценивали способность *Aspergillus niger* и *Trichoderma koningii* улучшать качество чайной гуши посредством твердофазной ферментации, а также ценность ферментированной чайной гуши, полученной для использования в качестве биологических кормовых добавок. Ферментация с *A. niger* и *T. koningii* повышала содержание сырого протеина, сырой клетчатки, нейтрально-детергентной клетчатки и кислотнo-детергентной клетчатки по сравнению с неферментированным образцом. Содержание редуцирующих сахаров, общих флавоноидов, общих полифенолов и теасапонинов было увеличено в варианте, где ферментация проходила с помощью *A. niger*, в то время как при использовании *T. koningii* кофеин полностью расщеплялся, а количество сапонинов снижалось. Твердофазное брожение с *A. niger* и *T. koningii* эффективно повышало пищевую ценность чайной гуши, содержание функциональных веществ и улучшало вкус (99).

Аналогичный подход применили G. Murugesan с соавт. (100), используя биомассу чайного гриба, полученную в процессе ферментации черного чая, как ингредиент в кормах для цыплят-бройлеров. Добавление чайного гриба в количестве 150 г/кг в корм для птицы увеличило потребление корма, массу тела по сравнению с контролем. Гистопатологическое исследование печени не выявило отклонений. С помощью ферментов, выделяемых микроорганизмами, можно перерабатывать огромное количество органических отходов, используя их в качестве дополнительной подкормки для животных. При таком подходе возможно повысить экономическую эффективность животноводческих предприятий, одновременно улучшая экологическое состояние прилегающей территории.

Косточки кислой вишни — отходы производства фруктовых соков. Твердофазная ферментация имеет большой потенциал для переработки подобных агропромышленных остатков. В исследовании E. Gungog с соавт. (101) было изучено влияние скармливания сырых кислых вишневых косточек и ферментированных с помощью *A. niger* вишневых косточек на показатели роста, характеристики туши и качество мяса цыплят-бройлеров. Показана возможность использования в питании ферментированного продукта в количестве 1-2 % в связи с положительным влиянием на цыплят-бройлеров.

Таким образом, очевидно, что существует перспектива для повышения питательности кормов без значимых энергоемких, следовательно, и финансовых затрат при применении биологических и физических методов улучшения питательности кормов.

Итак, рассмотренные физические (замачивание, жарка, экструзия, экспандирование, микронизация, воздействие сверхвысокочастотными волнами, кавитация) и биологические методы (ферментация) подготовки кормов к скармливанию позволяют повысить их усвояемость и общую питательность за счет деградации факторов, препятствующих эффективному пищеварению. Физические методы предполагают воздействие температуры, давления или других факторов, а также их сочетание. Применение методов ферментации позволяет увеличить эффективность использования корма, улучшить его питательную ценность и снизить количество отходов, что приводит к повышению производительности отрасли и качества продукции. Подобная стратегией представляется достаточно выгодной с точки зрения ресурсосбережения в животноводстве. Однако перед выбором того или иного способа следует учитывать ряд факторов, включая энерго- и трудозатраты, степень разрушения биологически активных компонентов и рентабельность. При этом, несмотря на важность и повсеместное использование

рассмотренных методов стоит отметить, что каждый год появляются и развиваются новые технологии, совершенствуя которые можно значительно повысить обеспеченность сельскохозяйственной отрасли кормовыми ресурсами при сохранении существующих темпов потребления растительного сырья.

ФГБНУ ФНЦ биологических систем
и агротехнологий РАН,

460000 Россия, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29,
e-mail: x-bocx1999@yandex.ru, Sizova.L78@yandex.ru ✉,
k.nechit@mail.ru, reger94@bk.ru, ayna.makaeva@mail.ru,
nessi255@mail.ru, daniilshoshin@mail.ru, musabaeva_l@mail.ru,
vshivkovaas@mail.ru

Поступила в редакцию
23 октября 2023 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2024, V. 59, № 3, pp. 411-425

PHYSICAL AND BIOLOGICAL METHODS TO IMPROVE FEED NUTRITION VALUE

(review)

*E.A. Vlasov, E.A. Sizova✉, K.S. Nechitailo, K.V. Ryazantseva, A.M. Kamirova,
A.P. Ivanisheva, D.E. Shoshin, L.L. Musabaeva, A.S. Mustafina*

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies RAS, 29, ul. 9 Yanvary, Orenburg, 460000 Russia,
e-mail x-bocx1999@yandex.ru, Sizova.L78@yandex.ru (✉ corresponding author), k.nechit@mail.ru, reger94@bk.ru,
ayna.makaeva@mail.ru, nessi255@mail.ru, daniilshoshin@mail.ru, musabaeva_l@mail.ru, vshivkovaas@mail.ru

ORCID:

Vlasov E.A. orcid.org/0009-0000-2367-4495

Sizova E.A. orcid.org/0000-0002-5125-5981

Nechitailo K.S. orcid.org/0000-0002-8755-414X

Ryazantseva K.V. orcid.org/0000-0001-5134-0396

Mustafina A.S. orcid.org/0000-0001-9525-2822

Kamirova A.M. orcid.org/0000-0003-1474-8223

Ivanisheva A.P. orcid.org/0000-0001-8264-4616

Musabaeva L.L. orcid.org/0009-0000-2922-0064

Shoshin D.E. orcid.org/0000-0003-3086-681X

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported by the Russian Science Foundation, project No. 20-16-00078-P

Final revision received October 23, 2023

doi: 10.15389/agrobiologia.2024.3.411eng

Accepted December 01, 2023

Abstract

An increase in the productivity of domestic animals by 20-30% over the past 50 years has been achieved due to advances in genetics, intensification of metabolic processes and effects on digestion (M. Georges et al., 2019), as well as due to effective preparation of feed for feeding and ensuring greater availability of nutrients for the body (M. Balehegn et al., 2020). Animal feed must have certain qualitative characteristics: it must be nutritious, tasty, clean, easily digested and well absorbed, free of impurities and substances harmful to health and adversely affecting the quality of livestock products (M. Balehegn et al., 2020). Only a small part of the feed fed in its natural form meets these requirements (R.Sh. Fakhrutdinova, 2009). An important criterion is feed conversion, which determines the economic efficiency of the industry, since 70 % of the costs of raising animals are accounted for by feed. The animal's body processes about 20-25 % of the feed energy into products. Approximately 30-35% of energy is spent for physiological needs, and the rest is released in an undigested form with excrement. The task of preparing feed for consumption is to reduce energy losses by changing the physico-chemical properties of the feed, increasing nutritional value, accessibility to the body, namely digestibility and assimilation by animals (R.V. Karteknova et al., 2013). Various technologies have been developed in the Russian and global production of feedstock to increase the availability of nutritional components. They can be conditionally divided into two groups — physical and biological methods of increasing the nutritional value and availability of feed (A.I., Fitsev 1997). The purpose of this review is to summarize information on the basic (physical and biological) methods of preparing feed for feeding, increasing accessibility, improving their nutritional value and digestibility for farm animals and birds, as well as the principles of their action and application in science and practice. Physical methods involve exposure to temperature, pressure, or other factors, as well as a combination of them. These include both simple methods (for example, soaking with and without germination, frying) and more technologically complex processes — extrusion, expansion (pressure conditioning), micronization, exposure to ultrahigh frequency waves, cavitation (E. Kosmynin, et al., 2006; V.A. Chikulaev, 2020). Biological methods include the use of bacteria, yeast and other microorganisms or their metabolites to break down complex carbohydrates into simpler, easily digestible forms (fermentation) and the production of related substances that can be used by animals (K.S. Krylov et al., 2000; N. Lau et

al., 2022). The use of fermentation methods can increase the efficiency of feed use, improve its nutritional value and reduce waste, which leads to increased animal productivity and product quality (L. Yang et al., 2021; L. Yafetto et al., 2023). The presented physical and biological methods of influencing feed components ensure an increase in their digestibility and overall nutritional value due to the degradation of factors that impede effective digestion. Such a strategy seems to be quite profitable in the field of resource-saving technologies in animal husbandry. However, before choosing one or another method, a number of important factors should be taken into account, including energy and labor costs, the degree of destruction of biologically active components and profitability.

Keywords: feed, preparation for feeding, nutritional enhancement, extrusion, cavitation, digestibility.

REFERENCES

1. Georges M., Charlier C., Hayes B. Harnessing genomic information for livestock improvement. *Nature Reviews Genetics*, 2019, 20: 135-156 (doi: 10.1038/s41576-018-0082-2).
2. Balehegn M., Duncan A., Tolera A., Ayantunde A.A., Issa S., Karimou M., Zampaligré N., André K., Gnanda I., Varijakshapanicker P., Kebreab E., Dubeux J., Boote K., Minta M., Feyissa F., Adesogan A.T. Improving adoption of technologies and interventions for increasing supply of quality livestock feed in low- and middle-income countries. *Global Food Security*, 2020: 26: 100372 (doi: 10.1016/j.gfs.2020.100372).
3. Fakhrutdinova R.Sh. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2009, 4(196): 37-40 (in Russ.).
4. Khmel'nitskiy M.A., Khrustaleva V.N., Shchetinov S.V., Molochkina O.V. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov, molodykh uchenykh fakul'teta agro- i biotekhnologii «Vektor razvitiya nauki»* [Proc. Conf. «Science development vector»]. Balashikha, 2023: 140-146 (in Russ.).
5. Kudasheva A.V., Levakhin G.I., Shirnina N.M., Reznichenko V.G., Rodionova G.B. *Vestnik myasnogo skotovodstva*, 2009, 1(62): 170-174 (in Russ.).
6. Kudasheva A.V., Levakhin G.I., Rodionova G.B., Shirnina N.M., Duskaev G.K. *Kormoproizvodstvo*, 2011, 11: 33-34 (in Russ.).
7. Raza A., Bashir S., Tabassum R. An update on carbohydrases: growth performance and intestinal health of poultry. *Heliyon*, 2019, 5(4): e01437 (doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01437).
8. Popov V.V. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo*, 2020, 1: 79-90 (doi: 10.33814/AFP-2222-5366-2020-1-79-90) (in Russ.).
9. Vasil'eva S.V. *Akademicheskaya publitsistika*, 2019, 11: 295-298 (in Russ.).
10. Umerenkova M.V., Vasil'eva S.V. *Sbornik statey po materialom IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsii v nauke i praktike»* [Proc. Int. Conf. «Innovations in science and practice»]. Ufa, 2017: 32-36 (in Russ.).
11. Popov V.V. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo*, 2018, 3: 63-82 (in Russ.).
12. Fitsev A.I. *Kormoproizvodstvo*, 1997, 5-6: 22-25 (in Russ.).
13. Chikulaev V.A. *Sbornik nauchnykh trudov po rezul'tatam raboty V Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Molodye issledovateli agropromyshlennogo i lesnogo kompleksov — regionam»* [Proc. Int. Conf. «Young researchers of agro-industrial and forestry complexes to regions»]. Vologda, 2020: 222-230 (in Russ.).
14. Kosmyinin E., Lunkov S. *Kombikorma*, 2006, 4: 57-59 (in Russ.).
15. Krylov K.S., Chugunov A.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2000, 1: 99-100 (in Russ.).
16. Su W., Jiang Z., Hao L., Li W., Gong T., Zhang Y., Du S., Wang C., Lu Z., Jin M., Wang Y. Variations of soybean meal and corn mixed substrates in physicochemical characteristics and microbiota during two-stage solid-state fermentation. *Front. Microbiol.*, 2021, 12: 688839 (doi: 10.3389/fmicb.2021.688839).
17. Lau N., Hummel J., Kramer E., Hünerberg M. Fermentation of liquid feed with lactic acid bacteria reduces dry matter losses, lysine breakdown, formation of biogenic amines, and phytate-phosphorus. *Translational Animal Science*, 2022, 6(1): txac007 (doi: 10.1093/tas/txac007).
18. Kartekenova R.V., Sechin V.A., Kapaeva T.V., Kazachkova N.M. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, 6(44): 108-110 (in Russ.).
19. Yang L., Zeng X., Qiao S. Advances in research on solid-state fermented feed and its utilization: the pioneer of private customization for intestinal microorganisms. *Animal Nutrition*, 2021, 7(4): 905-916 (doi: 10.1016/j.aninu.2021.06.002).
20. Yafetto L., Odamtten T.G., Wiafe-Kwagyan M. Valorization of agro-industrial wastes into animal feed through microbial fermentation: a review of the global and Ghanaian case. *Heliyon*, 2023, 9(4): 14814 (doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14814).
21. Parkhomenko G.G., Gromakov A.V. *Khranenie i pererabotka zerna*, 2017, 9(217): 31-36 (in Russ.).

22. Shirnina N.M., Galiev B.Kh., Rakhimzhanova I.A., Baykov A.S. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, 4(90): 266-270 (in Russ.).
23. Bykov A., Kvan O., Gavrish I., Bykova L., Mezhujeva L., Sizentsov A., Rusyaeva M., Korol'kova D. Cavitation treatment as a means of modifying the antibacterial activity of various feed additives. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(3): 2845-2850 (doi: 10.1007/s11356-018-3828-7).
24. Bhat A.P., Holkar C.R., Jadhav A.J., Pinjari D.V. Acoustic and hydrodynamic cavitation assisted hydrolysis and valorisation of waste human hair for the enrichment of amino acids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105368 (doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105368).
25. Gong Q, Liu C, Tian Y, Zheng Y, Wei L, Cheng T, Wang Z, Guo Z, Zhou L. Effect of cavitation jet technology on instant solubility characteristics of soymilk flour: Based on the change of protein conformation in soymilk. *Ultrason Sonochem*, 2023, 96:106421 (doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106421).
26. Bhimrao Muley A., Bhalchandra Pandit A., Satishchandra Singhal R. Govind Dalvi S. Production of biologically active peptides by hydrolysis of whey protein isolates using hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105385 (doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105385).
27. Hassan M.A., Taha T.H., Hamad G.M. Hashem M., Alamri S., Mostafa Y.S. Biochemical characterisation and application of keratinase from *Bacillus thuringiensis* MT1 to enable valorisation of hair wastes through biosynthesis of vitamin B-complex. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 153: 561-572 (doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.03.032).
28. Miroshnikov I.S., Kholodilina T.N., Duskaev G.K., Vasil'chenko A.S. *Vestnik myasnogo skotovodstva*, 2016, 4(96): 131-137 (in Russ.).
29. Galiev B.Kh., Shirnina N.M., Baykov A.S., Miroshnikov I.S., Korneychenko V.I., Sechin V.A. *Vestnik myasnogo skotovodstva*, 2017, 4(100): 190-196 (in Russ.).
30. Kurilkina M.Ya., Muslyumova D.M., Zav'yalov O.A., Atlanderova K.N. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*, 2021, 104(2): 111-119 (in Russ.).
31. Afanas'ev V.A., Ostrikov A.N., Shevtsov A.A., Terekhina A.V., Aleksandrov A.I. *Agrarnyy vestnik Urala*, 2019, 8: 187 (in Russ.).
32. Afanas'ev V.A., Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Frolova L.N., Manuylov V.V. *Kormoproizvodstvo*, 2017, 6: 33-38 (in Russ.).
33. Sitnikov V.A., Popov A.N., Nikolaev S.Yu. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, 1(1): 1703 (in Russ.).
34. Bogomolov I.S., Klyemenova N.L., Kopylov M.V. *Pishchevaya promyshlennost'*, 2022, 1: 32-36 (doi: 10.52653/PPI.2022.1.1.007) (in Russ.).
35. Mar'in V.A., Vereshchagin A.L., Bychin N.V. *Khleboпродукты*, 2012, 11: 58-59 (in Russ.).
36. Afanas'ev V.A., Bogomolov I.S. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2012, 3(53): 27-30 (in Russ.).
37. Abdollahi M.R., Zaefarian F., Hall L., Jendza J.A. Feed acidification and steam-conditioning temperature influence nutrient utilization in broiler chickens fed wheat-based diets. *Poultry Science*, 2020, 99(10): 5037-5046 (doi: 10.1016/j.psj.2020.06.056).
38. Ebbing M.A., Yacoubi N., Naranjo V., Sitzmann W., Schedle K., Gierus M. Towards large particle size in compound feed: using expander conditioning prior to pelleting improves pellet quality and growth performance of broilers. *Animals*, 2022, 12(19): 2707 (doi: 10.3390/ani12192707).
39. Kiarie E.G., Mills A. Role of feed processing on gut health and function in pigs and poultry: conundrum of optimal particle size and hydrothermal regimens. *Front. Vet. Sci.*, 2019, 6: 19 (doi: 10.3389/fvets.2019.00019).
40. Ebbing M.A., Yacoubi N., Naranjo V., Sitzmann W., Gierus M. Influence of expander conditioning prior to pelleting on pellet quality, broiler digestibility and performance at constant amino acids composition while decreasing AMEN. *Animals*, 2022, 12(22): 3126 (doi: 10.3390/ani12223126).
41. Lundblad K.K., Issa S., Hancock J.D., Behnke K.C., McKinney L.J., Alavi S., Prestøkken E., Fledderus J., Sørensen M. Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 169(3-4): 208-217 (doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.06.008).
42. Boroogeni F.G., Svihus B, Reichenbach H., Zentek J. The effects of hydrothermal processing on feed hygiene, nutrient availability, intestinal microbiota and morphology in poultry — a review. *Animal Feed Science and Technology*, 2016, 220: 187-215 (doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.07.010).
43. Pleadin J., Frece J., Markov K. Mycotoxins in food and feed. In: *Advances in Food and Nutrition Research. Vol. 89*. Academic Press, 2019: 297-345 (doi: 10.1016/bs.afnr.2019.02.007).
44. Jedziniak P., Panasiuk L., Pietruszka K., Posyniak A. Multiple mycotoxins analysis in animal feed with LC-MS/MS: comparison of extract dilution and immunoaffinity clean-up. *J. Sep. Sci.*, 2019, 42(6): 1240-1247 (doi: 10.1002/jssc.201801113).
45. Xu H., Wang L., Sun J., Wang L., Guo H., Ye Y., Sun X. Microbial detoxification of mycotoxins in food and feed. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(18): 4951-4969 (doi: 10.1080/10408398.2021.1879730).

46. Vila-Donat P., Marin S., Sanchis V., Ramos A.J. A review of the mycotoxin adsorbing agents, with an emphasis on their multi-binding capacity, for animal feed decontamination. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 114: 246-259 (doi: 10.1016/j.fct.2018.02.044).
47. Janik E., Niemcewicz M., Podogrocki M., Ceremuga M., Stela M., Bijak M. T-2 Toxin-the most toxic trichothecene mycotoxin: metabolism, toxicity, and decontamination strategies. *Molecules*, 2021, 26(22): 6868 (doi: 10.3390/molecules26226868).
48. Oliveira M., Vasconcelos V. Occurrence of mycotoxins in fish feed and its effects: a review. *Toxins*, 2020, 12(3): 160 (doi: 10.3390/toxins12030160).
49. Blagov D.A., Mironova I.V., Mitrofanov S.V., Nigmat'yanov A.A., Sultanbaev U.R. *Kormlenie sel'skokhozyaystvennykh zivotnykh i kormoproizvodstvo*, 2020, 11(184): 68-76 (doi: 10.33920/sel-05-2011-06) (in Russ.).
50. Zambrano Y., Contardo I., Moreno M.C., Bouchon P. Effect of extrusion temperature and feed moisture content on the microstructural properties of rice-flour pellets and their impact on the expanded product. *Foods*, 2022, 11(2): 198 (doi: 10.3390/foods11020198).
51. Yang P., Wang H., Zhu M., Ma Y. Evaluation of extrusion temperatures, pelleting parameters, and vitamin forms on vitamin stability in feed. *Animals*, 2020, 10(5): 894 (doi: 10.3390/ani10050894).
52. Liu Y., Liu M., Huang S., Zhang Z. Optimisation of the extrusion process through a response surface methodology for improvement of the physical properties and nutritional components of whole black-grained wheat flour. *Foods*, 2021, 10(2): 437 (doi: 10.3390/foods10020437).
53. Kurilkina M.Ya., Zav'yalov O.A., Atlanderova K.N., Kholodilina T.N. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*, 2020, 103(1): 8-19 (doi: 10.33284/2658-3135-103-1-8) (in Russ.).
54. Kholodilina T.N., Kurilkina M.Ya., Atlanderova K.N. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*, 2022, 105(1): 74-81 (doi: 10.33284/2658-3135-105-1-74) (in Russ.).
55. Antimonov S.V., Sagitov R.F., Kirilenko A.S., Mustafaev S.K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2010: 2-3(314-315): 5-48 (in Russ.).
56. Santos Pereira C., Cunha S.C., Fernandes J.O. Prevalent mycotoxins in animal feed: occurrence and analytical methods. *Toxins*, 2019, 11(5): 290 (doi: 10.3390/toxins11050290).
57. Tian M., Feng Y., He X., Zhang D., Wang W., Liu D. Mycotoxins in livestock feed in China - current status and future challenges. *Toxicon*, 2022, 214: 112-120 (doi: 10.1016/j.toxicon.2022.05.041).
58. Akinmusire O., El-Yuguda A., Musa J., Oyedele O.A., Sulyok M., Somorin Y.M., Ezekiel C.N., Krska R. Mycotoxins in poultry feed and feed ingredients in Nigeria. *Mycotoxin Research*, 2019, 35(2): 149-155 (doi: 10.1007/s12550-018-0337-y).
59. Biscoto G., Salvato L., Alvarenga É., Dias R.R.S., Pinheiro G.R.G., Rodrigues M.P., Pinto P.N., Freitas R.P., Keller K.M. Mycotoxins in cattle feed and feed ingredients in Brazil: a five-year survey. *Toxins*, 2022, 14(8): 552 (doi: 10.3390/toxins14080552).
60. Fumagalli F., Ottoboni M., Pinotti L., Cheli F. Integrated mycotoxin management system in the feed supply chain: innovative approaches. *Toxins*, 2021, 13(8): 572 (doi: 10.3390/toxins13080572).
61. Hoffmans Y., Schaarschmidt S., Fahl-Hassek C., Van der Fels-Klerx H.J. Factors during production of cereal-derived feed that influence mycotoxin contents. *Toxins*, 2022, 14(5): 301 (doi: 10.3390/toxins14050301).
62. Schaarschmidt S., Fahl-Hassek C. The fate of mycotoxins during the processing of wheat for human consumption. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(3): 556-593 (doi: 10.1111/1541-4337.12338).
63. Schaarschmidt S., Fahl-Hassek C. The fate of mycotoxins during secondary food processing of maize for human consumption. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(1): 91-148 (doi: 10.1111/1541-4337.12657).
64. Ochieng P.E., Scippo M.L., Kemboi D.C., Croubels S., Okoth S., Kang'ethe E.K., Doupovec B., Gathumbi J.K., Lindahl J.F., Antonissen G. Mycotoxins in poultry feed and feed ingredients from Sub-Saharan Africa and their impact on the production of broiler and layer chickens: a review. *Toxins*, 2021, 13(9):633 (doi: 10.3390/toxins13090633).
65. Mamonov R.A., Zbrozhik D.G. *Vestnik Soveta molodykh uchenykh Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva*, 2017, 2(5): 165-169 (in Russ.).
66. Yang C.K., Cheng Y.H., Tsai W.T., Liao R.W., Chang C.S., Chien W.C., Jhang J.C., Yu Y.H. Prevalence of mycotoxins in feed and feed ingredients between 2015 and 2017 in Taiwan. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(23): 23798-23806 (doi: 10.1007/s11356-019-05659-0).
67. Van der Fels-Klerx H.J., Adamse P., Punt A., Punt A., van Asselt E.D. Data analyses and modelling for risk based monitoring of mycotoxins in animal feed. *Toxins*, 2018, 10(2): 54 (doi: 10.3390/toxins10020054).
68. Gajęcki M., Gajęcka M., Zielonka Ł. The presence of mycotoxins in feed and their influence on animal health. *Toxins*, 2020, 12(10): 663 (doi: 10.3390/toxins12100663).
69. Zebiri S., Mokrane S., Verheecke-Vaessen C., Choque E., Reghioui H., Sabaou N., Mathieu F., Riba A. Occurrence of ochratoxin A in Algerian wheat and its milling derivatives. *Toxin Reviews*, 2019, 38: 206-211 (doi: 10.1080/15569543.2018.1438472).

70. Nogueira W.V., de Oliveira F.K., Marimyn Sibaja K.V., Garcia S.O., Kupski L., de Souza M.M., Tesser M.B., Garda-Bufferon J. Occurrence and bioaccessibility of mycotoxins in fish feed. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2020, 13(4): 244-251 (doi: 10.1080/19393210.2020.1766577).
71. Pizzolato Montanha F., Anater A., Burchard J., Luciano F.B., Meca G., Manyes L., Pimpão C.T. Mycotoxins in dry-cured meats: a review. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 111: 494-502 (doi: 10.1016/j.fct.2017.12.008).
72. Ma R., Zhang L., Liu M., Su Y.T., Xie W.M., Zhang N.Y., Dai J.F., Wang Y., Rajput S.A., Qi D.S., Karrow N.A., Sun L.H. Individual and combined occurrence of mycotoxins in feed ingredients and complete feeds in China. *Toxins*, 2018, 10(3): 113 (doi: 10.3390/toxins10030113).
73. Tolosa J., Rodríguez-Carrasco Y., Ruiz M., Vila-Donat P. Multi-mycotoxin occurrence in feed, metabolism and carry-over to animal-derived food products: a review. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, 158: 112661 (doi: 10.1016/j.fct.2021.112661).
74. Juan C., Oueslati S., Mañes J., Berrada H. Multimycotoxin determination in Tunisian farm animal feed. *Journal of Food Science*, 2019, 84(12): 3885-3893 (doi: 10.1111/1750-3841.14948).
75. Magallanes López A., Manthey F.A., Simsek S. Wet milling technique applied to deoxynivalenol-contaminated wheat dry-milled fractions. *Cereal Chem.*, 2019, 96(3): 487-496 (doi: 10.1002/cche.10148).
76. Mrudula Vasudevan U., Jaiswal A., Krishna S., Pandey A. Thermostable phytase in feed and fuel industries. *Bioresource Technology*, 2019, 278: 400-407 (doi: 10.1016/j.biortech.2019.01.065).
77. Peng R.-H., Zhang W.-H., Wang Y., Deng Y.-D., Wang B., Gao J.-J., Li Z.-J., Wang L.-J., Fu X.-Y., Xu J., Han H.-J., Tian Y.-S., Yao Q.-H. Genetic engineering of complex feed enzymes into barley seed for direct utilization in animal feedstuff. *Plant Biotechnol. J.*, 2023, 21(3): 560-573 (doi: 10.1111/pbi.13972).
78. Ward N.E. Debranching enzymes in corn/soybean meal-based poultry feeds: a review. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 765-775 (doi: 10.1016/j.psj.2020.10.074).
79. Pojić M., Mišan A., Tiwari B. Eco-innovative technologies for extraction of proteins for human consumption from renewable protein sources of plant origin. *Trends in Food Science and Technology*, 2018, 75: 93-104 (doi: 10.1016/j.tifs.2018.03.010).
80. de Souza T.P.P., da S. Mariano R.M., Vieira M.S., Andrade S.F.V., Godoi R.R., Gonçalves A.F.A., Naves L.P., Lima W.J.N., Gonçalves D.B., Campos-da-Paz M., Galdino A.S. Biofactories for the production of recombinant phytases and their application in the animal feed industry. *Recent Patents on Biotechnology*, 2018, 12(2): 113-125 (doi: 10.2174/1872208311666170915161848).
81. Golder H.M., Rossow H.A., Lean I.J. Effects of in-feed enzymes on milk production and components, reproduction, and health in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(9): 8011-8026 (doi: 10.3168/jds.2019-16601).
82. Coutinho T.S., Tardioli P.W., Farinas C.S. Phytase immobilization on hydroxyapatite nanoparticles improves its properties for use in animal feed. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2020, 190(1): 270-292 (doi: 10.1007/s12010-019-03116-9).
83. Rangel Pedersen N., Tovborg M., Soleimani Farjam A., Della Pia E.A. Multicomponent carbohydrase system from *Trichoderma reesei*: a toolbox to address complexity of cell walls of plant substrates in animal feed. *PLoS ONE*, 2021, 16(6): e0251556 (doi: 10.1371/journal.pone.0251556).
84. Bakare A.G., Zindove T.J., Iji P.A., Stamatopoulos K., Cowieson A.J. A review of limitations to using cassava meal in poultry diets and the potential role of exogenous microbial enzymes. *Tropical Animal Health and Production*, 2021, 53(4): 426 (doi: 10.1007/s11250-021-02853-6).
85. Ribeiro G.O., Badhan A., Huang J., Beauchemin K.A., Yang W., Wang Y., Tsang A., McAllister T.A. New recombinant fibrolytic enzymes for improved in vitro ruminal fiber degradability of barley straw. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(9): 3928-3942 (doi: 10.1093/jas/sky251).
86. Ferreira A.V.F., Silva F.F., Silva A.A.M., Azevedo L.S., da Fonseca S.T.D., Camilo N.H., Dos Santos K.P.E., de Carvalho L.C., Tarabal V.S., da Silva J.O., Machado J.M., Nogueira L.M., Torres F.A.G., Galdino A.S. Recent patents on the industrial application of alpha-amylases. *Recent Patents on Biotechnology*, 2020, 14(4): 251-268 (doi: 10.2174/1872208314666200722160452).
87. Ahmed U., Pfannstiel J., Stressler T., Eisele T. Purification and characterization of a fungal aspartic peptidase from *Trichoderma reesei* and its application for food and animal feed protein hydrolyses. *J. Sci. Food Agric.*, 2022, 102(12): 5190-5199 (doi: 10.1002/jsfa.11871).
88. Van Dorn R., Shanahan D., Ciofalo V. Safety evaluation of xylanase 50316 enzyme preparation (also known as VR007), expressed in *Pseudomonas fluorescens*, intended for use in animal feed. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2018, 97: 48-56 (doi: 10.1016/j.yrtph.2018.05.016).
89. Jarpa-Parra M. Lentil protein: a review of functional properties and food application. An overview of lentil protein functionality. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(4): 892-903 (doi: 10.1111/ijfs.13685).
90. Mudgil P., Baby B., Ngoh Y.Y., Kamal H., Vijayan R., Gan C.-Y., Maqood S. Molecular binding mechanism and identification of novel anti-hypertensive and anti-inflammatory bioactive peptides from camel milk protein hydrolysates. *LWT*, 2019, 112: 108193 (doi: 10.1016/j.lwt.2019.05.091).
91. Matulessy D.N., Erwanto Y., Nurliyani N., Suryanto E., Abidin M.Z., Hakim T.R. Characterization and functional properties of gelatin from goat bone through alcalase and neutrase enzymatic

- extraction. *Veterinary World*, 2021, 14(9): 2397-2409 (doi: 10.14202/vetworld.2021.2397-2409).
92. Mudgil P., Jobe B., Kamal H., Alameri M., Al Ahababi N., Maqsood S. Dipeptidyl peptidase-IV, α -amylase, and angiotensin I converting enzyme inhibitory properties of novel camel skin gelatin hydrolysates. *LWT*, 2019, 101: 251-258 (doi: 10.1016/j.lwt.2018.11.014).
 93. Kamal H., Jafar S., Mudgil P., Murali C., Amin A., Maqsood S. Inhibitory properties of camel whey protein hydrolysates toward liver cancer cells, dipeptidyl peptidase-IV, and inflammation. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(10): 8711-8720 (doi: 10.3168/jds.2018-14586).
 94. Mudgil P., Omar L., Kamal H., Kilari B.P., Maqsood S. Multi-functional bioactive properties of intact and enzymatically hydrolysed quinoa and amaranth proteins. *LWT*, 2019, 110: 207-213 (doi: 10.1016/j.lwt.2019.04.084).
 95. Jafar S., Kamal H., Mudgil P., Hassan H.M., Maqsood S. Camel whey protein hydrolysates displayed enhanced cholesteryl esterase and lipase inhibitory, anti-hypertensive and anti-haemolytic properties. *LWT*, 2018, 98: 212-218 (doi: 10.1016/j.lwt.2018.08.024).
 96. Bedford M. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: the role of data interpretation. *British Poultry Science*, 2018, 59(5): 486-493 (doi: 10.1080/00071668.2018.1484074).
 97. Raveendran S., Parameswaran B., Ummalyma S., Abraham A., Mathew A.K., Madhavan A., Rebello S., Pandey A. Applications of microbial enzymes in food industry. *Food Technol Biotechnol*, 2018, 56(1): 16-30 (doi: 10.17113/ftb.56.01.18.5491).
 98. Shi C., Zhang Y., Lu Z., Wang Y. Solid-state fermentation of corn-soybean meal mixed feed with *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecium* for degrading antinutritional factors and enhancing nutritional value. *J. Animal Sci. Biotechnol.*, 2017, 8: 50 (doi: 10.1186/s40104-017-0184-2).
 99. Cui Y., Li J., Deng D., Lu H., Tian Z., Liu Z., Ma X. Solid-state fermentation by *Aspergillus niger* and *Trichoderma koningii* improves the quality of tea dregs for use as feed additives. *PLoS ONE*, 2021, 16(11): e0260045 (doi: 10.1371/journal.pone.0260045).
 100. Murugesan G., Sathishkumar M., Swaminathan K. Supplementation of waste tea fungal biomass as a dietary ingredient for broiler chicks. *Bioresource Technology*, 2005, 96(16): 1743-1748 (doi: 10.1016/j.biortech.2005.01.006).
 101. Gungor E., Erener G. Effect of dietary raw and fermented sour cherry kernel (*Prunus cerasus* L.) on growth performance, carcass traits, and meat quality in broiler chickens. *Poultry Science*, 2020, 99(1): 301-309 (doi: 10.3382/ps/pez490).