
ЗООТЕХНИЯ, БИОЛОГИЯ И ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

**Влияние дозозависимого применения комплекса протеаз
в низкопротеиновых рационах с перьевой мукой
на продуктивность и физиологию пищеварения цыплят-бройлеров**

Мохамад Навар Хамви✉

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

✉ Автор, ответственный за переписку: nawarhamwi95@mail.ru

Аннотация

Целью исследований являлась комплексная оценка влияния разных повышенных доз (от рекомендованных в 4–7 раз) комплекса экзогенных протеаз (0, 500 и 1000 г/т) в составе низкопротеиновых рационов с включением 6% перьевой муки на продуктивность и протеолитическую активность в желудочно-кишечном тракте цыплят-бройлеров. Эксперимент выполнен на 400 суточных цыплятах-бройлерах кросса Ross 308 (44-суточный период откорма). Птиц разделили на 4 группы: контроль (высокопротеиновый рацион), опытные группы (низкопротеиновые рационы, сбалансированные по аминокислотам) без протеаз (ОП-I), с добавлением 500 г/т (ОП-II) и 1000 г/т (ОП-III) комбинаторного протеазного комплекса. Установлено, что введение протеаз в дозах 500 и 1000 г/т достоверно повышало конечную живую массу на 3,2% ($p<0,05$), снижало конверсию корма на 3,0% ($p<0,05$) и увеличивало европейский индекс эффективности производства на 10,8–12,1% ($p<0,05$). Максимальная доза (1000 г/т) обеспечила повышение протеолитической активности в химусе тощей и подвздошной кишок на 24,3–26,9% ($p<0,001$), а также активацию пристеночных пептидаз на 70,3% ($p<0,05$) без достоверного изменения активности поджелудочной железы. Исключение ферментов из финишных рационов позволило подтвердить пролонгированный эффект: в группе ОП-III активность протеаз в подвздошной кишке сохранялась на уровне, сопоставимом с двенадцатиперстной кишкой, что свидетельствует о выравнивании проксимально-дистального градиента протеолиза. Предложенная стратегия, объединяющая снижение уровня сырого протеина, балансировку кристаллическими аминокислотами, включение перьевой муки (6%) и применение мегадоз протеаз (1000 г/т), позволяет эффективно утилизировать кератин, повысить переваримость кормов и улучшить продуктивные показатели бройлеров без дополнительной нагрузки на поджелудочную железу.

Ключевые слова

цыплята-бройлеры, низкопротеиновый рацион, перьевая мука, экзогенные протеазы, дозозависимый эффект, продуктивность, протеолитическая активность, пищеварение

Для цитирования

Хамви М. Влияние дозозависимого применения комплекса протеаз в низкопротеиновых рационах с перьевой мукой на продуктивность и физиологию пищеварения цыплят-бройлеров // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2026. № 4. С. 173-191.

Dose-dependent effect of a protease complex in low-protein diets with feather meal on broiler productivity and digestive physiology

Mohamad Nawar Hamwi✉

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russia

✉ **Corresponding author:** nawarhamwi95@mail.ru

Abstract

The aim of the study was to comprehensively assess the effect of different increased doses (4 to 7 times the recommended level) of an exogenous protease complex (0, 500, and 1000 g/t) in low-protein diets containing 6% feather meal on productivity and proteolytic activity in the gastrointestinal tract of broilers. The experiment was carried out on 400 day-old Ross 308 broilers (44 days of age). The birds were divided into four groups: control (high-protein diet), experimental groups (low-protein diets balanced for amino acids) without proteases (Exp-I), with the addition of 500 g/t (Exp-II) and 1000 g/t (Exp-III) of a combinatorial protease complex. It was found that the use of proteases at doses of 500 and 1000 g/t significantly increased final body weight by 3.2% ($p<0.05$), reduced feed conversion ratio by 3.0% ($p<0.05$), and increased the European Production Efficiency Factor by 10.8–12.1% ($p<0.05$). The maximum dose (1000 g/t) increased proteolytic activity in the jejunal and ileal digesta by 24.3–26.9% ($p<0.001$) activated brush border peptidases by 70.3% ($p<0.05$), without significant changes in pancreatic protease activity. Withdrawal of enzymes from the finisher diets revealed a prolonged effect: in the Exp-III group, proteolytic activity in the ileum remained comparable to that in the duodenum, indicating an equalisation of the proximal-distal proteolysis gradient. The proposed strategy combining reduced crude protein level, crystalline amino acid balancing, inclusion of feather meal (6%) and megadoses of proteases (1000 g/t) allows for effective keratin utilization, improves nutrient digestibility and enhances broiler performance without additional stress on the pancreas.

Keywords

broilers, low-protein diet, feather meal, exogenous proteases, dose-dependent effect, productivity, proteolytic activity, digestion

For citation

Hamwi M.N. Dose-dependent effect of a protease complex in low-protein diets with feather meal on broiler productivity and digestive physiology. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2026;(4):173-191.

Введение Introduction

В условиях современного промышленного птицеводства ключевыми вызовами являются повышение экономической эффективности производства, снижение экологической нагрузки и обеспечение продовольственной безопасности [1, 2]. В этом контексте кормовая индустрия и научное сообщество находятся в постоянном поиске оптимальных технологических решений, направленных на рациональное использование белковых ресурсов. Традиционные подходы, основанные на включении дорогостоящих компонентов животного и растительного происхождения (рыбная мука,

соевый шрот), все чаще уступают место альтернативным стратегиям, среди которых выделяются два перспективных направления.

Первое направление базируется на использовании кристаллических аминокислот, получаемых современными биотехнологическими методами (микробиологический синтез), что позволяет точно балансировать рационы по незаменимым аминокислотам при снижении уровня сырого протеина. Как показано в исследовании Belloir et al. [3, 4], снижение содержания сырого протеина в рационах бройлеров до 17% при оптимизированном аминокислотном профиле не оказывает негативного влияния на продуктивность и качество мяса, одновременно снижая экскрецию азота. Мета-анализ de Rauglaudre et al. [5, 6] подтверждает, что при соблюдении концепции идеального протеина с использованием кормовых аминокислот каждый процент снижения сырого протеина уменьшает суточную экскрецию азота на 10,4% при сохранении показателей роста.

Второе направление предполагает применение экзогенных протеаз, способных гидролизовать труднорасщепляемые белковые субстраты, повышая общую переваримость кормов и усвояемость аминокислот. Современные исследования демонстрируют, что использование протеаз с кератинолитической активностью позволяет эффективно утилизировать белковые отходы птицеперерабатывающей промышленности [7, 8].

Особую актуальность приобретает поиск альтернативных источников протеина, способных частично заместить дорогостоящие традиционные компоненты. В этом отношении перьевая мука представляет собой перспективный, экономически доступный ресурс, характеризующийся высоким содержанием сырого протеина (до 80–85%). Однако протеин перьевой муки представлен преимущественно кератином – фибриллярным белком с высокой плотностью дисульфидных связей, что обуславливает его исключительную устойчивость к действию эндогенных протеаз желудочно-кишечного тракта птицы. Эффективная утилизация кератина требует либо введения специфических ферментов (кератиназ), либо существенного повышения дозировок классических протеазных комплексов [7, 8].

В работах Riessen et al. и Nam et al. [9, 10] показано, что предварительная обработка перьевой муки бактериальными кератиназами (*Streptomyces* sp. MSM5) позволяет повысить ее питательную ценность и использовать для замены до 33% соевого шрота в рационах бройлеров без снижения продуктивных показателей. Биотехнологическая обработка способствует увеличению содержания доступных аминокислот и повышает переваримость сухого вещества и протеина [9]. При этом важно отметить, что эффективность протеаз не ограничивается лишь нивелированием последствий дефицита белка.

В работе Peñuela-Sierra et al. (2024) показано, что даже при скормливание полноценного по протеину рациона (21% СР) добавление мультипротеазы не оказывало значимого влияния на показатели роста птицы, однако достоверно ($p < 0.01$) повышало обменную энергию (на 71 ккал/кг), переваримость сырого протеина (с 59.45 до 63.51%) и сухого вещества (с 67.08 до 73.49%). Этот факт подчеркивает, что основной потенциал экзогенных протеаз в стандартных рационах реализуется не через прямое увеличение приростов, а через повышение эффективности использования питательных веществ. Тем не менее потенциал применения сверхвысоких доз (мегадоз) комбинаторных протеазных комплексов, особенно в условиях одновременного снижения уровня сырого протеина и использования трудноутилизуемых источников белка (перьевой муки), изучен недостаточно [16].

Таким образом, перед исследователями поставлена дилемма: с одной стороны, балансировка рационов кристаллическими аминокислотами позволяет снизить

уровень сырого протеина, но не решает проблему переваримости трудногидролизуемых белков; с другой стороны, применение стандартных доз протеаз не всегда обеспечивает достаточную степень деградации кератина. В связи с этим возникает необходимость разработки комплексной стратегии, объединяющей оба подхода. В современных обзорах [1–8] подчеркивается, что интеграция подходов низкопротеинового питания и применения экзогенных ферментов открывает новые возможности для повышения эффективности использования кормов и снижения экологической нагрузки птицеводства.

Предлагаемая в исследовании стратегия занимает центральное положение между двумя обозначенными направлениями. С одной стороны, рационы балансируют по кристаллическим аминокислотам (лизин, метионин, треонин, валин, изолейцин) до уровня полноценных высокопротеиновых кормов, что обеспечивает организм птицы необходимым пулом субстратов для протеинсинтеза. С другой стороны, в состав рационов вводят супердозы (мегадозы) комплекса экзогенных протеаз, превышающие рекомендованные производителями значения в 4–7 раз, что позволяет достичь максимальной деградации кератина перьевой муки и повысить общую переваримость белковых компонентов рациона. Синергическое сочетание этих подходов направлено на обеспечение эффективного поступления аминокислот для их последующего использования в процессах *de novo* синтеза белка.

Цель исследований: комплексная оценка влияния разных повышенных доз (от рекомендованных в 4–7 раз) комплекса экзогенных протеаз (0, 500 и 1000 г/т) в составе низкопротеиновых рационов с включением перьевой муки на продуктивность и протеолитическую активность в желудочно-кишечном тракте бройлеров.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Оценить влияние различных доз протеаз на рост, сохранность, конверсию корма и интегральный индекс эффективности производства бройлеров за 44-суточный период откорма.
2. Определить влияние введения экзогенных протеаз на общую протеолитическую активность (экзогенных и эндогенных протеаз) в химусе ключевых отделов тонкого кишечника.
3. Оценить потенциальное влияние экзогенных протеаз на ферментативный потенциал поджелудочной железы, определяя ее протеолитическую активность.
4. Оценить возможность использования новой кормовой стратегии рационов с перьевой мукой на основании повышенных доз применения экзогенных протеаз.

Методика исследований

Research method

Эксперимент был проведен в соответствии с принципами Европейской конвенции о защите позвоночных животных (ETS № 123). Протокол исследований одобрен локальной биоэтической комиссией РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Все процедуры в отношении животных выполняли в соответствии с руководящими принципами и правилами; исследования описаны в соответствии с рекомендациями ARRIVE [11, 12].

Дизайн эксперимента и характеристика групп: исследования выполнены на 400-суточных цыплятах-бройлерах кросса Ross 308 в условиях вивария кафедры кормления животных РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Птицу методом аналогов (по живой массе и полу) разделили на 4 группы ($n = 100$), каждая из которых включала в себя 10 повторностей (по 10 гол. в клетке). Средняя исходная живая масса составила $45,0 \pm 0,5$ г. Период выращивания (44-суточный) был подразделен на две

фазы: старт (1–21 день) и рост (22–44 дня). Содержание птицы осуществляли в клеточных батареях с контролируемыми параметрами микроклимата (температура, влажность, скорость движения воздуха) и световым режимом (23 ч света/1 ч темноты), соответствующими рекомендациям руководства по выращиванию кросса Ross 308 [13]. Доступ к корму и воде был свободным в течение всего эксперимента.

Были сформированы четыре группы, получавшие градиент доз комплекса экзогенных протеаз в составе низкопротеиновых рационов. Контрольная группа получала стандартный высокопротеиновый рацион (21,0 и 19,0% сырого протеина в периоды старта и роста соответственно), сбалансированный по всем питательным веществам. Опытные группы (I, II, III) получали низкопротеиновые рационы (19,0 и 17,5% сырого протеина), в состав которых вводили 6% перьевого муки гидролизованной (сп 84%). Рационы всех опытных групп были сбалансированы по кристаллическим аминокислотам (лизин, метионин, треонин, валин, изолейцин) до уровня контрольной группы. Отличительной особенностью опытных групп являлась дозировка вводимого комплекса протеаз (табл. 1): группа ОП-I – без добавления протеаз (контроль низкопротеинового рациона); группа ОП-II – с добавлением протеаз в суммарной дозе 500 г/т (250 г/т Стеллар про + 250 г/т KEMZYME™ Protease); группа ОП-III – с добавлением протеаз в суммарной дозе 1000 г/т (500 г/т Стеллар про + 500 г/т KEMZYME™ Protease). Дозы протеаз превышали рекомендованные производителями (150 г/т для Стеллар про и 50–100 г/т для KEMZYME™) в 4–7 раз. Детальная схема эксперимента и рецепты комбикормов представлены в таблицах 1–3, характеристика ферментов – в таблице 4.

Характеристика питательности экспериментальных рационов: рецепты комбикормов для всех групп были разработаны с учетом фаз выращивания (старт – 1–21 сут., рост – 22–44 сут.) и сбалансированы по основным питательным веществам, обменной энергии и аминокислотному составу в соответствии с рекомендациями кросса Ross 308 [13]. Детальный состав рационов представлен в таблице 2, а их питательная характеристика – в таблице 3.

Анализ данных таблицы 3 показывает, что рационы контрольной и опытных групп в соответствующие фазы выращивания были изоэнергетичны. Уровень обменной энергии (ОЭ) для бройлеров с учетом ферментов (ОЭ бройлеров +Ф) в фазу старта составил 290 ккал/100 г, в фазу роста – 302 ккал/100 г, в фазу финиша – 313 ккал/100 г. Значения ОЭ без учета ферментного воздействия (ОЭ бройлеров) были ниже на 9 ккал/100 г во все периоды, что соответствует стандартным подходам к оценке энергетической питательности комбикормов при использовании экзогенных ферментов.

Ключевым отличием опытных групп (ОП-I, ОП-II, ОП-III) от контроля являлся сниженный уровень сырого протеина. В фазу старта содержание сырого протеина в опытных рационах составило 19,00% (с учетом ферментов – 19,38%), что на 2,0% ниже, чем в контрольной группе (21,0%). В фазу роста данный показатель был снижен с 19,0% (контроль) до 17,28% (опыт), а в фазу финиша – с 17,5% (контроль) до 16,51% (опыт). При этом во всех опытных группах (ОП-I, ОП-II, ОП-III) показатели сырого протеина, жира, клетчатки и обменной энергии были идентичными, что позволило оценить влияние именно дозозависимого эффекта протеаз, исключив влияние вариабельности питательности.

Содержание сырого жира в рационах всех групп увеличивалось от фазы старта к финишу: с 3,81–3,87 до 6,29%, что связано с введением подсолнечного масла для поддержания энергетической ценности. Уровень сырой клетчатки был стабильным – в пределах 2,38–2,75%, что соответствует физиологическим нормам для цыплят-бройлеров данного кросса.

Аминокислотный состав рационов был выровнен между контрольной и опытными группами. Уровень лизина в фазу старта составил 1,15–1,16%,

метионина+цистина – 0,89%, треонина – 0,83% во всех группах, что обеспечивало сопоставимый аминокислотный профиль.

Таким образом, различия в продуктивности между опытными группами (ОП-I, ОП-II, ОП-III) обусловлены именно включением и дозировкой экзогенного комплекса протеаз, а не уровнем протеина или аминокислотного баланса.

Научная значимость дизайна эксперимента заключалась в применении дифференцированного режима ферментативной поддержки: комплексы экзогенных протеаз (Стеллар про и KEMZYME™ Protease) вводили только в рационы фаз старта (1–21 сут.) и роста (22–42 сут.), тогда как в финишный период (43–44 сут.) их добавление прекращали. Такое методологическое решение позволило: оценить пролонгированный эффект ферментного воздействия, сформированный на ранних этапах онтогенеза, на конечные показатели продуктивности и качество мяса; исключить прямое ферментативное влияние в предубойный период, что обеспечило корректную оценку резидуальной протеолитической активности в желудочно-кишечном тракте и эндогенного ферментативного потенциала; смоделировать производственную ситуацию, при которой использование дорогостоящих ферментных препаратов оптимизировано по периодам выращивания, что имеет практическое значение для оценки экономической эффективности.

Таким образом, представленный дизайн позволил дифференцировать вклад экзогенных протеаз в процессы пищеварения на этапах активного роста и их последствия для физиологического статуса птицы после отмены ферментной поддержки.

Определение продуктивных показателей. Оценка продуктивных показателей выполняли путем индивидуального еженедельного взвешивания птицы с использованием электронных весов (Mettler Toledo, Швейцария) с точностью до 0,1 г. Групповой учет потребленного корма осуществляли ежедневно с последующим пересчетом на каждую повторность в конце каждого недельного интервала. На основе полученных данных рассчитывали следующие показатели: среднесуточный прирост (ADG, г/сут.) – как отношение разницы между конечной и начальной живой массой к продолжительности периода выращивания; конверсия корма (FCR, кг/кг) – как отношение валового потребления корма к общему приросту живой массы за период, с учетом падежа; Европейский индекс эффективности производства (EPEF) – по формуле: $EPEF = (\text{Сохранность, \%} \times \text{Живая масса, кг}) / (\text{FCR} \times \text{Возраст убоя, дни}) \times 100$; сохранность поголовья (%) определяли ежедневно путем регистрации падежа с последующим расчетом процента выжившей птицы (гол.) к концу каждого периода.

Определение протеолитической активности. Для изучения влияния на пищеварение на момент убоя (44 сут.) отбирали образцы химуса двенадцатиперстной, тощей и подвздошной кишок, ткань поджелудочной железы и гомогенат апикальной мембраны энтероцитов.

Методика отбора и пробоподготовки биологических образцов поджелудочной железы и кишечника. В рамках исследований были проведены стандартные процедуры отбора и гомогенизации тканей поджелудочной железы и кишечника, а также содержимого кишечника (химуса). Поджелудочную железу выделяли, после чего отбирали навески массой от 50 до 100 мг, которые немедленно подвергали механической гомогенизации в соответствующем буферном растворе (в ледяном фосфатно-солевом буфере, pH 7,4) с использованием гомогенизатора Allsheng (Bioprep-24R), Yocell (Китай). Для анализа кишечного содержимого тонкий кишечник вскрывали продольным разрезом с помощью стерильного хирургического скальпеля. Химус массой приблизительно 100 мг аспирировали или аккуратно отбирали тем же скальпелем из различных анатомических отделов (двенадцатиперстная, тощая, подвздошная кишки). После отбора химуса просвет кишечника тщательно промывали охлажденным

физиологическим раствором (0,9% NaCl). Далее проводили отбор пристеночной (мукозной) ткани кишечника. С помощью скальпеля осторожно отделяли фрагменты слизистой оболочки массой от 10 до 50 мг, избегая включения мышечных слоев.

Протеолитическую активность (в пересчете на мг трипсина/мин/г ткани) определяли спектрофотометрическим методом, основанным на измерении количества пептидов и свободных аминокислот, высвобождаемых при гидролизе стандартного белкового субстрата – казеина – под действием ферментов тканевого гомогената [14, 15]. Активность оценивали при различных значениях pH, соответствующих физиологическим условиям: pH 6,2–6,4 (химус), pH 6,4 (пристеночные пептидазы) и pH 7,2–7,4 (поджелудочная железа).

Анализ проводили в трех параллельных пробах для каждого образца: опытной, контрольной и холостой. В опытной пробе 0,2 мл гомогената инкубировали с 0,8 мл 1%-ного раствора казеина (pH 7,4) в течение 60 мин при температуре 37°C. Реакцию останавливали добавлением 4,0 мл 10%-ной трихлоруксусной кислоты (ТХУ). Контрольную пробу готовили аналогично, но ТХУ вносили до инкубации. В холостой пробе гомогенат заменяли дистиллированной водой. После осаждения пробы центрифугировали (3000 об/мин, 10 мин). Оптическую плотность надосадочной жидкости измеряли при 280 нм против холостой пробы. Активность фермента (А) рассчитывали по формуле, выражая ее в микрограммах тирозиновых эквивалентов, высвобождаемых за 1 мин инкубации 1 г ткани:

$$A = \frac{\Delta E \times V \times 30}{0,290 \times V_1 \times M \times t},$$

где ΔE – разность оптических плотностей опытной (E₁) и контрольной (E₂) проб; V – общий объем гомогената (5 мл); V₁ – объем гомогената, взятый в анализ (0,2 мл); M – масса навески ткани (0,5 г); t – время инкубации (60 мин); 30 – количество тирозина, мкг, соответствующее оптической плотностью 0,290 при 280 нм (использовали для пересчета в тирозиновые эквиваленты).

Статистическую обработку данных производили в программе IBM SSPS STATISTICS26. Различия считали достоверными при p < 0,05. Данные представлены как m±SEM.

Таблица 1

Схема эксперимента и характеристика рационов

Table 1

Experimental design and diet characteristics

Группа	Уровень сырого протеина, % (Старт/Рост)	Доза протеаз, г/г		
		Кемзайм	Стеллар про	Всего
Контроль	21.0/19.0	0	–	–
Опытная I	19.0/17.5	0	–	–
Опытная II	19.0/17.5	250	250	500
Опытная III	19.0/17.5	500	500	1000

Характеристика рационов

Diet characteristics

[illegible]

Наименование	Контроль			Опыт I			Опыт II			Опыт III		
	Старт	Рост	Финиш	Старт	Рост	Финиш	Старт	Рост	Финиш	Старт	Рост	Финиш
МОНОКАЛЬ-ЦИЙФОСФАТ	0,33	0,07	0,01	0,48	0,10	0,02	0,48	0,10	0,02	0,48	0,10	0,02
ТРИКАЛЬ-ЦИЙФОСФАТ	1,76	1,81	1,27	1,73	1,84	1,28	1,73	1,84	1,28	1,73	1,84	1,28
СОДА ПИЩЕВАЯ	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05%	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
АКСТРА РНУ 10000 г/т	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Стеллар про	–	–	–	–	–	–	0,025	0,025	–	0,050	0,050	–
Кемзайм	–	–	–	–	–	–	0,025	0,025	–	0,050	0,050	–
Премикс бр. 0,25%	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Характеристика ферментов: препарат «Стеллар Про» представляет собой мультикомпонентную протеазную систему, продуцируемую штаммами *Bacillus subtilis* и *Bacillus licheniformis*. Согласно представленным данным активность препарата складывается из трех типов ферментов: кислая протеаза (50 000 ед/г); щелочная протеаза (100 000 ед/г); кератиназа (50 000 ед/г). Наличие кератиназы является ключевой характеристикой данного продукта, поскольку обеспечивает гидролиз труднорасщепляемого кератина, входящего в состав перьевой муки (6% рациона). Термостабильность препарата (сохранение эффективности при температуре 85°C в течение 3 мин) гарантирует его активность в условиях гранулирования комбикормов.

Препарат KEMZYME™ Protease (Kemin Industries, Inc., США) представляет собой протеазный комплекс на основе продуцента *Bacillus amyloliquefaciens*. Данный препарат характеризуется сбалансированным профилем трех типов протеолитической активности: кислая, нейтральная и щелочная протеазы, каждая из которых заявлена на уровне не менее 17 000 ед/г. Присутствие нейтральной протеазы является специфической особенностью этого препарата, дополняющей спектр действия «Стеллар Про». Термостабильность KEMZYME™ (85–90% сохранения активности при температуре 80°C в течение 3–5 мин) также позволяет использовать его в технологии производства гранулированных комбикормов.

В опытных группах ОП-II и ОП-III ферментные препараты вводили в составе комбикормов в равных пропорциях (1:1), что обеспечило формирование комбинированного протеазного комплекса, объединяющего ферментативные потенциалы обоих производителей.

Таблица 3

**Характеристика комбикормов в опытных группах
с разным уровнем сырого протеина, аминокислот и ферментов**

Table 3

**Characteristics of compound feeds in experimental groups
with different levels of crude protein, amino acids, and enzymes**

Наименование	Старт I	Рост I	Финиш I	Старт II	Рост II	Финиш II	Старт III	Рост III	Финиш III
ОЗ БРОЙЛЕРОВ + Ф	290	302	313	290	302	313	290	302	313
ОЗ БРОЙЛЕРОВ	281	293	304	281	293	304	281	293	304
ОЗ ПТИЦЫ ТАБЛ	295	305	315	295	305	315	295	305	315
СЫРОЙ ПРОТЕИН + Ф	19,38	17,67	16,89	19,39	17,66	16,89	19,38	17,67	16,89
СЫРОЙ ПРОТЕИН	19,00	17,28	16,51	19,00	17,28	16,51	19,00	17,28	16,51
СЫРОЙ ЖИР	3,81	4,93	6,29	3,84	4,96	6,29	3,87	4,98	6,29
СЫРАЯ КЛЕТЧАТКА	2,75	2,46	2,38	2,75	2,46	2,38	2,75	2,46	2,38
FTU	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
ЛИЗИН	1,16	1,08	1,00	1,16	1,08	1,00	1,15	1,08	1,00
МЕТИОНИН	0,44	0,40	0,29	0,44	0,40	0,29	0,44	0,40	0,29
ЦИСТИН	0,45	0,42	0,41	0,44	0,42	0,41	0,44	0,42	0,41
МЕТИОНИН + ЦИСТИН	0,89	0,82	0,70	0,89	0,82	0,70	0,89	0,82	0,70
ТРЕОНИН	0,83	0,76	0,70	0,83	0,76	0,70	0,83	0,76	0,70
ТРИПТОФАН	0,24	0,22	0,20	0,24	0,22	0,20	0,24	0,22	0,20
АРГИНИН	1,09	0,95	0,91	1,09	0,95	0,91	1,10	0,95	0,91
ИЗОЛЕЙЦИН	1,05	1,01	0,93	1,05	1,01	0,93	1,05	1,01	0,93
ЛЕЙЦИН	1,51	1,39	1,36	1,51	1,39	1,36	1,51	1,39	1,36
ВАЛИН	1,14	1,10	0,98	1,14	1,10	0,98	1,14	1,10	0,98

Таким образом, в опытных группах II и III суммарно использовались четыре типа протеолитических ферментов. Такое комбинирование обеспечивает синергизм ферментативного действия: кератиназа направленно гидролизует кератин перьевой муки, разрушая дисульфидные связи и повышая доступность аминокислот; комплекс кислых, нейтральных и щелочных протеаз обеспечивает эффективный протеолиз в широком диапазоне pH желудочно-кишечного тракта птицы – от кислой среды железистого желудка (pH 2,5–3,5) через нейтральную зону двенадцатиперстной кишки (pH 5,5–6,0) до щелочных условий в дистальных отделах тонкого кишечника (pH 7,0–8,0). Разнообразие продуцентов (*Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus amyloliquefaciens*) создает широкий спектр ферментных изоформ с различной субстратной специфичностью, что повышает эффективность гидролиза как растительных белков (соевый шрот), так и белков животного происхождения (перьевая мука). Примененные дозы превышали рекомендованные производителями значения (150 г/т для «Стеллар Про» и 50–100 г/т для KEMZYME™) в 4–7 раз, что позволило оценить дозозависимый эффект и выявить потенциальные преимущества высоких дозировок для обеспечения максимальной деградации кератина и эффективного протеолиза в условиях низкопротеинового рациона.

Таким образом, ферментная система, примененная в опытных группах, представляет собой уникальный комбинаторный комплекс, объединяющий кислые, нейтральные, щелочные протеазы и кератиназу, что обеспечивает полноценный гидролиз белковых субстратов различного происхождения на всех этапах пищеварения.

Следует отметить некоторые ограничения дизайна исследований. Например, в работе не предусмотрена группа с добавлением протеаз в высокопротеиновый рацион (положительный контроль), что не позволяет оценить эффект ферментов на фоне полноценного по протеину кормления. Также группы с раздельным применением каждого из двух протеазных препаратов отсутствуют, поэтому утверждение о синергизме их действия носит предварительный характер и требует дальнейшей верификации. Основной целью проведенной работы являлось изучение комбинаторного комплекса в условиях низкопротеинового рациона с перьевой мукой, что и определило принятую схему эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Результаты, представленные в таблице 4, демонстрируют выраженное дозозависимое влияние экзогенного комплекса протеаз на эффективность производства бройлеров при использовании низкопротеиновых рационов с включением 6% перьевой муки.

Конечная живая масса. Введение протеаз в дозе 500 г/т (ОП-II) и 1000 г/т (ОП-III) обеспечило достоверное ($p < 0,05$) увеличение конечной живой массы на 3,2% (3164 против 3066 г) и 3,2% (3165 г) соответственно по сравнению с контрольной группой, получавшей высокопротеиновый рацион. В группе ОП-I (низкопротеиновый рацион без протеаз) наблюдалось незначительное снижение живой массы (3016 г, –1,6% относительно контроля), что подтверждает необходимость ферментативной поддержки для эффективной утилизации трудногидролизующихся белков (кератина перьевой муки) при сниженном уровне сырого протеина. Отсутствие статистически значимых различий между показателями групп ОП-II и ОП-III указывает на достижение плато эффекта при дозировке

500 г/т, однако численное преимущество по ряду показателей сохраняется в пользу максимальной дозы.

Среднесуточный прирост (ADG). Показатели среднесуточного прироста варьировали в узком диапазоне (67,81–68,43 г/сут.) без статистически значимых межгрупповых различий ($p > 0,05$). Наибольшее значение отмечено в группе ОП-III (68,43 г/сут.), что на 0,9% выше показателей контроля и на 0,9% выше показателей группы ОП-I. Относительная стабильность ADG на фоне значимых различий в конечной живой массе может быть обусловлена компенсаторными механизмами роста в разные возрастные периоды, а также тем, что ферменты исключали из финишных рационов (43–44 сут.), что нивелировало их прямое влияние на прирост в завершающую фазу откорма.

Конверсия корма (FCR). Наиболее значимый эффект зафиксирован по показателю затрат корма на единицу прироста. В группах ОП-II и ОП-III конверсия корма составила 1,59 кг/кг, что на 3,0% ниже ($p < 0,05$) по сравнению с контролем (1,64) и на 4,8% ниже по сравнению с показателями группы ОП-I (1,67). Ухудшение FCR в группе ОП-I на 1,8% относительно контроля подтверждает, что простая аминокислотная балансировка низкопротеинового рациона без протеаз недостаточна для поддержания эффективности использования корма. Снижение FCR в опытных группах с протеазами свидетельствует о повышении переваримости и усвояемости питательных веществ, особенно протеина, что согласуется с данными о стимуляции протеолитической активности в тонком кишечнике.

Европейский индекс эффективности производства (EPEF). Интегральный показатель EPEF, объединяющий живую массу, сохранность, конверсию корма и возраст убоя, продемонстрировал ярко выраженный дозозависимый эффект. В группе ОП-II индекс увеличился на 10,8% ($p < 0,05$) относительно контроля (427,3 против 385,6), а в группе ОП-III – на 12,1% ($p < 0,05$) (432,3). В группе ОП-I наблюдалось снижение EPEF на 4,0% (370,3). Повышение EPEF в группах с протеазами обусловлено синергичным действием улучшенной конверсии корма и повышенной сохранности, что указывает на потенциальную экономическую целесообразность применения протеаз даже при снижении уровня сырого протеина в рационе.

Сохранность поголовья. Данный показатель имел тенденцию увеличения в группах с протеазами: 96,3% (ОП-II) и 97,0% (ОП-III) против 95,6% в контроле и ОП-I. Максимальная сохранность в группе ОП-III свидетельствует о положительном влиянии ферментной поддержки на гомеостаз и резистентность птицы, что может быть связано с улучшением барьерной функции кишечника и снижением метаболической нагрузки на органы пищеварения.

Интерпретация в контексте дозозависимости. Несмотря на то, что между группами ОП-II и ОП-III не выявлено статистически значимых различий по большинству показателей, наблюдается устойчивая тенденция улучшения всех параметров при увеличении дозы протеаз с 500 до 1000 г/т: EPEF – +1,2%; сохранность – +0,7%; FCR – идентичен; конечная масса – идентична. Отсутствие линейного дозозависимого эффекта по живой массе и FCR связано, вероятно, с тем, что исключение ферментов из финишных рационов (43–44 сут.) нивелировало потенциальные преимущества максимальной дозы в завершающий период откорма. Тем не менее численное преимущество EPEF и сохранности в группе ОП-III позволяет рекомендовать дозу 1000 г/т как наиболее физиологически обоснованную для обеспечения максимальной эффективности производства при использовании низкопротеиновых рационов с перьевой мукой.

Анализ протеолитической активности представлен в таблице 5.

Таблица 4

Влияние разных доз протеаз на продуктивность бройлеров (44 сут.)

Table 4

Effect of different protease doses on broiler productivity (44 days of age)

Показатель	Контроль (К)	ОП-I (0 г/т)	ОП-II (500 г/т)	ОП-III (1000 г/т)
Конечная живая масса, г	3066 ± 56	3016 ± 87	3164 ± 45*	3165 ± 45*
Среднесуточный прирост, г/сут.	68.34 ± 1.46	67.81 ± 2.41	68.11 ± 3.45	68.43 ± 2.35
Конверсия корма (FCR), кг/кг	1.64	1.67	1.59*	1.59*
Индекс EPEF	385.6	370.3	427.3*	432.3*
Сохранность, %	95.6	95.6	96.3	97.0

* $p < 0,05$ относительно контроля (К).

Таблица 5

**Протеолитическая активность в отделах кишечника
и в поджелудочной железе цыплят бройлеров на момент убоя в 44 сут.,
мг трипсина/мин/г**

Table 5

**Proteolytic activity in intestinal sections and the pancreas of broilers
at slaughter (44 days of age), mg trypsin/min/g**

Локализация и тип активности	Контроль (К)	ОП-I (0 г/т)	ОП-II (500 г/т)	ОП-III (1000 г/т)
Химус, полостное пищеварение (pH 6.2–6.4)				
Двенадцатиперстная кишка	75.8 ± 14.3	65.9 ± 10.3	80.4 ± 3.4	85.4 ± 9.3
Тошая кишка	64.3 ± 3.2	70.5 ± 9.4	77.3 ± 4.9***	79.9 ± 6.2***
Подвздошная кишка	60.2 ± 7.4	66.7 ± 2.9	71.2 ± 1.6**	76.4 ± 3.8***
Пристеночное пищеварение (pH 6.4)				
Гомогенат энтероцитов	10.1 ± 7.4	10.3 ± 1.1	14.4 ± 1.4	17.2 ± 2.1*
Поджелудочная железа (pH 7.2–7.4)				
Гомогенат ткани	256 ± 34.3	273 ± 15.8	240 ± 21.7	264 ± 20.5

*Различия достоверны при $p < 0,05$ относительно контроля.**Различия достоверны при $p < 0,01$.***Различия достоверны при $p < 0,001$.

Двенадцатиперстная кишка. В контрольной группе активность составила 75,8 мг трипсина/мин/г, что отражает нормальный уровень протеолиза при высокопротеиновом рационе. В группе ОП-I (низкопротеиновый рацион без протеаз) отмечено снижение активности на 13,1% (65,9), что, вероятно, обусловлено уменьшением субстратной стимуляции секреции эндогенных протеаз. В группах ОП-II и ОП-III активность возрастает до 80,4 (+6,1% относительно контроля) и 85,4 (+12,7%) соответственно, однако высокая вариабельность (SEM 3,4–14,3) нивелирует статистическую значимость различий. Внутри группы ОП-III наблюдается наибольшая активность, что свидетельствует о дозозависимом усилении протеолиза в начальном отделе тонкой кишки при добавлении протеаз.

Тощая кишка. Этот отдел демонстрирует наиболее выраженный дозозависимый эффект. В контроле активность составляет 64,3. В группе ОП-I наблюдается незначительное повышение (+9,6%) без статистической значимости, что может отражать начальную компенсаторную реакцию на поступление труднорасщепляемого кератина. Введение протеаз в дозе 500 г/т (ОП-II) приводит к достоверному ($p < 0,001$) увеличению активности на 20,2% (77,3), а при дозе 1000 г/т (ОП-III) – на 24,3% (79,9). Между группами ОП-II и ОП-III разница составляет 2,6 единицы, что указывает на тенденцию дальнейшего повышения при максимальной дозе. Внутри каждой опытной группы (ОП-II, ОП-III) активность в тощей кишке достоверно превышает таковую в двенадцатиперстной ($p < 0,05$), что отражает смещение зоны максимального протеолиза дистальнее по ходу кишечника при использовании протеаз.

Подвздошная кишка. В контрольной группе активность минимальна среди отделов (60,2), что соответствует физиологическому затуханию полостного пищеварения. В группе ОП-I отмечено повышение до 66,7 (+10,8%), без достоверности. Добавление протеаз в дозе 500 г/т (ОП-II) повышает активность на 18,3% ($p < 0,01$) до 71,2, а в группе ОП-III – на 26,9% ($p < 0,001$) до 76,4. Разница между ОП-III и ОП-II составляет 5,2 единицы, что подчеркивает преимущество максимальной дозы в поддержании протеолиза в дистальных отделах тонкой кишки. Внутри группы ОП-III активность в подвздошной кишке не уступает таковой в тощей кишке, что свидетельствует о пролонгированном действии экзогенных ферментов и сохранении высокой гидролитической способности, вплоть до терминального отдела тонкого кишечника.

Пристеночное пищеварение (гомогенат энтероцитов). Активность пристеночных пептидаз в контрольной группе составила 10,1, что является характерным фоновым уровнем. В группе ОП-I показатель практически не изменился (10,3), что указывает на отсутствие компенсаторной активации мембранного гидролиза при исключительно аминокислотной балансировке низкопротеинового рациона. Введение протеаз вызвало значительное повышение активности: в ОП-II – до 14,4 (+42,6% относительно контроля); в ОП-III – до 17,2 ($p < 0,05$) +70,3%. Разница между ОП-III и ОП-II составляет 2,8 единицы, что подтверждает дозозависимый характер стимуляции пристеночного пищеварения. Данный эффект может быть обусловлен поступлением большего количества низкомолекулярных пептидов, образующихся под действием экзогенных протеаз, которые служат субстратом и индуктором апикальных пептидаз энтероцитов.

Поджелудочная железа (гомогенат ткани). Активность протеаз в ткани поджелудочной железы отражает синтетический и секреторный потенциал органа. В контрольной группе активность составила 256. В группе ОП-I отмечено незначительное повышение – до 273 (+6,6%), что может свидетельствовать о компенсаторной гипертрофии или гиперплазии ацинарных клеток в ответ на снижение протеина

и поступление кератина. В группах ОП-II и ОП-III активность составляет 240 (–6,3%) и 264 (+3,1%) соответственно, причем ни одно из различий не достигает статистической значимости. Отсутствие достоверного увеличения активности поджелудочной железы при добавлении протеаз (особенно в дозе 1000 г/т) является критически важным физиологическим фактом, свидетельствующим о том, что экзогенные ферменты не вызывают гиперстимуляции панкреатической секреции, работая по механизму «ассистированного пищеварения» и не создавая избыточной нагрузки на поджелудочную железу.

Сравнительный анализ внутри групп (градиент активности по отделам). Контроль: классический проксимально-дистальный градиент – активность снижается от 12-перстной кишки (75,8) к тощей (64,3) и подвздошной (60,2) кишкам. Это отражает последовательное всасывание продуктов гидролиза и затухание ферментативной активности. ОП-I (без протеаз): градиент менее выражен (12-перстная – 65,9; тощая – 70,5; подвздошная – 66,7). Относительное повышение активности в дистальных отделах может указывать на компенсаторное замедление пассажа химуса или адаптацию микробиоты, но без статистической поддержки. ОП-II (500 г/т): активность в тощей (77,3) и подвздошной (71,2) превышает таковую в 12-перстной (80,4) незначительно, формируя «плато» протеолиза по всей длине тонкой кишки. Это свидетельствует о том, что экзогенные ферменты сохраняют активность на всем протяжении кишечника. ОП-III (1000 г/т): активность в тощей (79,9) и подвздошной (76,4) кишках практически не уступает активности в 12-перстной (85,4). Более того, активность в подвздошной кишке в этой группе на 26,9% выше контроля и на 14,5% выше, чем в группе ОП-II. Это указывает на максимальную эффективность дозы 1000 г/т в обеспечении протеолиза в дистальных отделах, что имеет ключевое значение для утилизации труднорасщепляемых белков (кератин перьевой муки).

Межгрупповые различия выражены преимущественно в тощей и подвздошной кишках, где протеазы в дозах 500 и 1000 г/т вызывают достоверное повышение активности (на 20–27%) относительно контроля. В двенадцатиперстной кишке и пристеночном пищеварении наблюдается дозозависимая тенденция, достигающая значимости для максимальной дозы в пристеночном пуле. Внутригрупповая структура протеолиза в группах с протеазами характеризуется выравниванием градиента активности по отделам тонкой кишки, что свидетельствует о пролонгированном действии экзогенных ферментов. Отсутствие достоверных изменений активности в поджелудочной железе во всех опытных группах подтверждает физиологическую безопасность применения повышенных доз протеаз (до 1000 г/т) и отсутствие риска гиперстимуляции панкреатической секреции.

Наиболее выраженный и статистически обоснованный эффект зафиксирован в группе ОП-III (1000 г/т), что позволяет рассматривать данную дозировку как оптимальную для максимальной активации как полостного, так и пристеночного протеолиза при использовании низкопротеиновых рационов с перьевой мукой.

Выводы

Conclusions

1. Введение комбинаторного комплекса протеаз (кислые, нейтральные, щелочные протеазы и кератиназа) в низкопротеиновые рационы с 6% перьевой муки обеспечило дозозависимое улучшение ключевых продуктивных показателей. При суммарной дозировке 500 и 1000 г/т конечная живая масса бройлеров достоверно

возросла на 3,2% ($p < 0,05$) относительно контроля, конверсия корма снизилась на 3,0% ($p < 0,05$), а европейский индекс эффективности производства (ЕРЕФ) увеличился на 10,8–12,1% ($p < 0,05$). Максимальная доза (1000 г/т) обеспечила наивысшую сохранность поголовья (97,0%) и численное преимущество по ЕРЕФ, что указывает на перспективность с экономической точки зрения

2. Применение протеаз в дозе 1000 г/т способствовало достоверному повышению общей протеолитической активности в химусе тощей и подвздошной кишок на 24,3–26,9% ($p < 0,001$) относительно контроля, а также активации пристеночных пептидаз на 70,3% ($p < 0,05$). При этом активность протеаз в ткани поджелудочной железы не имела статистически значимых отличий между группами, что указывает на отсутствие гиперстимуляции панкреатической секреции и реализацию механизма «ассистированного пищеварения» без истощения ферментативного потенциала экзокринной железы.

3. Исключение ферментов из финишных рационов (43–44 сут.) позволило оценить пролонгированный эффект предшествующего применения протеаз. В группе с дозой 1000 г/т активность протеаз в подвздошной кишке сохранялась на уровне, сопоставимом с таковым в двенадцатиперстной кишке, что свидетельствует о выравнивании проксимально-дистального градиента протеолиза и обеспечении гидролиза труднопереваримых белков (кератина) на всем протяжении тонкой кишки. Данный эффект обусловлен наличием в составе ферментного комплекса термостабильной кератиназы и сбалансированного пула протеаз, активных в широком диапазоне рН желудочно-кишечного тракта.

4. Комплексный подход, объединяющий снижение уровня сырого протеина (на 2,0–2,5 п.п.), балансировку рационов кристаллическими аминокислотами до уровня полноценных кормов, включение 6% перьевой муки как экономически доступного источника протеина и применение мегадоз (500–1000 г/т) комбинаторного протеазного комплекса, позволяет достичь синергического эффекта. Эта стратегия обеспечивает эффективную деградацию кератина, повышение переваримости и усвояемости аминокислот, стимуляцию эндогенного протеолиза без дополнительной нагрузки на поджелудочную железу, что в совокупности приводит к росту продуктивности и улучшению конверсии корма. Рекомендуемая доза протеазного комплекса – 1000 г/т – является оптимальной для реализации потенциала продуктивности бройлеров при использовании низкопротеиновых рационов с перьевой мукой.

Список источников

1. Henchion M., Hayes M., Mullen A., Fenelon M. et al. Future Protein Supply and Demand: Strategies and Factors Influencing a Sustainable Equilibrium. *Foods*. 2020;9(7):839. <https://doi.org/10.3390/foods9070839>
2. Hyland J.J., Henchion M., McCarthy M., McCarthy S.N. The role of meat in strategies to achieve a sustainable diet lower in greenhouse gas emissions: A review. *Meat Science*. 2017;132:189-195.
3. Belloir P., Méda B., Lambert W., Corrent E. et al. Reducing the CP content in broiler feeds: impact on animal performance, meat quality and nitrogen utilization. *Animal*. 2017;11(11):1881-1889. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000660>
4. van Harn J., Dijkslag M.A., van Krimpen M.M. Effect of low protein diets supplemented with free amino acids on growth performance, slaughter yield, litter quality, and footpad lesions of male broilers. *Poultry Science*. 2019;98(10):4868-4877. <https://doi.org/10.3382/ps/pez229>

5. de Rauglaudre T., Méda B., Fontaine S., Lessire M. et al. Meta-analysis of the effect of low-protein diets on the growth performance, nitrogen excretion, and fat deposition in broilers. *Frontiers in Animal Science*. 2023;4:1214076. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1214076>
6. Nanto-Hara F., Ema T., Ohtsu H. Amino-Acid-Balanced Low-Protein Diets Reduce Nitrogen Excretion Without Affecting Growth Performance in Broilers. *Animals*. 2026;16(3):494. <https://doi.org/10.3390/ani16030494>
7. Fitriyanto N.A., Ramadhanti Y., Rismiyati, Prasetyo A., Pertiwinigrum A. Enzymatic activity and amino acid production by indigenous keratinolytic strains on the various poultry feather substrate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;980(1):012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/980/1/012026>
8. Abdelmoteleb A., Gonzalez-Mendoza D., Tzintzun-Camacho O., Grimaldo-Juárez O. et al. Keratinases from *Streptomyces netropsis* and *Bacillus subtilis* and Their Potential Use in the Chicken Feather Degrading. *Fermentation*. 2023;9(2):96. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020096>
9. Riessen S., Antranikian G. Isolation of *Thermoanaerobacter keratinophilus* sp. nov., a novel thermophilic, anaerobic bacterium with keratinolytic activity. *Extremophiles*. 2001;5(6):399-408. <https://doi.org/10.1007/s007920100209>
10. Nam G.W., Lee D.W., Lee H.S., Lee N.J. et al. Native-feather degradation by *Fervidobacterium islandicum* AW-1, a newly isolated keratinase-producing thermophilic anaerobe. *Archives of Microbiology*. 2002;178(6):538-547. <https://doi.org/10.1007/s00203-002-0489-0>
11. Percie du Sert N., Ahluwalia A., Alam S., Avey M.T. et al. Reporting animal research: Explanation and elaboration for the ARRIVE guidelines 2.0. *PLoS Biology*. 2020;18(7): e3000411. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000411>
12. Percie du Sert N., Hurst V., Ahluwalia A., Alam S. et al. The ARRIVE guidelines 2.0: updated guidelines for reporting animal research. *The Journal of Physiology*. 2020;598(18):3793-3801. <https://doi.org/10.1113/JP280389>
13. Aviagen. Ross 308: Nutrition Specifications. 2022. URL: https://aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_Broiler/Ross308BroilerNutritionSpecs2022-EN.pdf (дата обращения: 15.03.2026)
14. Коврижных А.В., Афанасьев Д.А., Ахангаран М., Гаравири М. и др. Определение протеолитической активности молочнокислых бактерий и выявление генов протеиназ // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2022. № 4. С. 113-127. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.341>
15. Ковалев Н.Н., Позднякова Ю.М., Панчишина Е.М., Кращенко В.В. Ферментативная активность культивируемых микроорганизмов кишечника трепанга // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2019. № 1. С. 91-100. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-1-91-100>
16. Peñuela-Sierra L.M., Aragão-Neto V.L., Lozano-Cruz P., Mejia-Abaunza J.N. et al. Multiprotease improves amino acid release in vitro, energy, and nutrient utilization in broilers fed diets varying in crude protein levels. *Poultry Science*. 2024;103(5):103546. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103546>

References

1. Henchion M., Hayes M., Mullen A., Fenelon M. et al. Future Protein Supply and Demand: Strategies and Factors Influencing a Sustainable Equilibrium. *Foods*. 2020;9(7):839. <https://doi.org/10.3390/foods9070839>

2. Hyland J.J., Henchion M., McCarthy M., McCarthy S.N. The role of meat in strategies to achieve a sustainable diet lower in greenhouse gas emissions: A review. *Meat Science*. 2017;132:189-195.
3. Belloir P., Méda B., Lambert W., Corrent E. et al. Reducing the CP content in broiler feeds: impact on animal performance, meat quality and nitrogen utilization. *Animal*. 2017;11(11):1881-1889. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000660>
4. van Harn J., Dijkslag M.A., van Krimpen M.M. Effect of low protein diets supplemented with free amino acids on growth performance, slaughter yield, litter quality, and footpad lesions of male broilers. *Poultry Science*. 2019;98(10):4868-4877. <https://doi.org/10.3382/ps/pez229>
5. de Rauglaudre T., Méda B., Fontaine S., Lessire M. et al. Meta-analysis of the effect of low-protein diets on the growth performance, nitrogen excretion, and fat deposition in broilers. *Frontiers in Animal Science*. 2023;4:1214076. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1214076>
6. Nanto-Hara F., Ema T., Ohtsu H. Amino-Acid-Balanced Low-Protein Diets Reduce Nitrogen Excretion Without Affecting Growth Performance in Broilers. *Animals*. 2026;16(3):494. <https://doi.org/10.3390/ani16030494>
7. Fitriyanto N.A., Ramadhanti Y., Rismiyati, Prasetyo A., Pertiwinigrum A. Enzymatic activity and amino acid production by indigenous keratinolytic strains on the various poultry feather substrate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;980(1):012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/980/1/012026>
8. Abdelmoteleb A., Gonzalez-Mendoza D., Tzintzun-Camacho O., Grimaldo-Juárez O. et al. Keratinases from *Streptomyces netropsis* and *Bacillus subtilis* and Their Potential Use in the Chicken Feather Degrading. *Fermentation*. 2023;9(2):96. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020096>
9. Riessen S., Antranikian G. Isolation of *Thermoanaerobacter keratinophilus* sp. nov., a novel thermophilic, anaerobic bacterium with keratinolytic activity. *Extremophiles*. 2001;5(6):399-408. <https://doi.org/10.1007/s007920100209>
10. Nam G.W., Lee D.W., Lee H.S., Lee N.J. et al. Native-feather degradation by *Fervidobacterium islandicum* AW-1, a newly isolated keratinase-producing thermophilic anaerobe. *Archives of Microbiology*. 2002;178(6):538-547. <https://doi.org/10.1007/s00203-002-0489-0>
11. Percie du Sert N., Ahluwalia A., Alam S., Avey M.T. et al. Reporting animal research: Explanation and elaboration for the ARRIVE guidelines 2.0. *PLoS Biology*. 2020;18(7): e3000411. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000411>
12. Percie du Sert N., Hurst V., Ahluwalia A., Alam S. et al. The ARRIVE guidelines 2.0: updated guidelines for reporting animal research. *The Journal of Physiology*. 2020;598(18):3793-3801. <https://doi.org/10.1113/JP280389>
13. Aviagen. Ross 308: Nutrition Specifications. 2022. URL: https://aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_Broiler/Ross308BroilerNutritionSpecs2022-EN.pdf (accessed: March 15, 2026).
14. Kovrijhnykh A.V., Afanasyev D.A.2, Ahangaran M., Gharaviri M. et al. Determination of the proteolytic activity of lactic acid bacteria and identification of proteinase genes. *Storage and Processing of Farm Products*. 2022;(4):113-127. <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.341>
15. Kovalev N.N., Pozdnyakova Yu.M., Panchishina E.M., Krashchenko V.V. Enzymatic activity of cultivated microorganisms in trepang intestine. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2019;(1):91-100. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-1-91-100>

16. Peñuela-Sierra L.M., Aragão-Neto V.L., Lozano-Cruz P., Mejia-Abaunza J.N. et al. Multiprotease improves amino acid release in vitro, energy, and nutrient utilization in broilers fed diets varying in crude protein levels. *Poultry Science*. 2024;103(5):103546. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103546>

Сведения об авторе

Мохамад Навар Хамви, аспирант кафедры кормления животных, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: nawarhamwi95@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1786-0862>

Information about the author

Mohamad Nawar Hamwi, postgraduate student of the Department of Animal Feeding, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: nawarhamwi95@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1786-0862>