




Кинетика процесса экструдирования комбикормов для непродуктивных животных




Иван А. Сапелкин	¹	ivan-sapelkin2000@ya.ru	 0009-0006-0202-7700
Александр Н. Остриков	¹	ostrikov27@ya.ru	 0000-0002-2335-0017
Лариса Н. Фролова	¹	fln-84@mail.ru	 0000-0002-6505-4136

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

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена тем, что в российских семьях насчитывалось 75,5 млн кошек и собак. Популяция домашних животных за последние семь лет увеличилась на 35%. Доля полнорационных кормов промышленного производства за три года выросла с 81 до 86% среди владельцев кошек и с 53 до 60% среди владельцев собак. Однако зависимость от импортных компонентов, удорожание сырья и дефицит мощностей сдерживают дальнейшее наращивание производства комбикормов для непродуктивных животных. Поэтому назрела острая необходимость дальнейшего совершенствования технологии и оборудования для производства кормов для собак и кошек и перехода на отечественные компоненты в рамках программы импортозамещения. Оценка гранулометрического состава зерна показало серьезное изменение качества готового экструдированного продукта: снижение размера частиц с 12 мм до 2 мм привело к повышению переваримости крахмала. Выявлен рациональный размер частиц измельченных зерен, составляющий около $3,0 \cdot 10^{-3}$ м. В эксперименте было задействовано восемь самцов и восемь самок породы бигль в возрасте от 12 до 14 месяцев, из которых были сформированы опытная и контрольная группы по восемь животных в каждой. Термовлажностная обработка (пропаривание) зерна влияет на углеводный комплекс зерна, увеличивая содержание легкорастворимых углеводов и повышая усвояемость корма животными. Выявлены рациональные режимы экструдирования, которые составили: для кукурузы $W_n = 12,8\%$, 393-413 К, степень декстринизации и переваримость крахмала составляла 50-60 % и 100-120 мг/г; для зерносмеси $W_n = 12,7\%$: 393-413 К, степень декстринизации и переваримость крахмала для составляла 35 % и 80 мг/г; для пшеницы $W_n = 12,3\%$ и 423-428 К, степень декстринизации и переваримость крахмала для составляла 21-23 % и 60 мг/г.

Ключевые слова: комбикорм, непродуктивные животные, тепловлажностная обработка, экструдирование, кинетика, показатели качества.

Kinetics of the process of extruding compound feed for non-productive animals

Ivan A. Sapelkin	¹	ivan-sapelkin2000@ya.ru	 0009-0006-0202-7700
Alexander N. Ostrikov	¹	ostrikov27@ya.ru	 0000-0002-2335-0017
Larisa N. Frolova	¹	fln-84@mail.ru	 0000-0002-6505-4136

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

Abstract. The relevance of this article is due to the fact that there are 75.5 million cats and dogs in Russian households. The pet population has increased by 35% over the past seven years. The share of industrially produced complete pet food has increased from 81% to 86% among cat owners and from 53% to 60% among dog owners over three years. However, dependence on imported components, rising raw material costs, and capacity shortages are hindering further expansion of compound feed production for non-productive animals. Therefore, there is an urgent need to further improve the technology and equipment for dog and cat food production and to transition to domestic components as part of the import substitution program. An assessment of the grain particle size distribution revealed a significant change in the quality of the finished extruded product: a decrease in particle size from 12 mm to 2 mm led to increased starch digestibility. The rational particle size of crushed grains was revealed to be about $3.0 \cdot 10^{-3}$ m. Eight male and eight female Beagles aged 12 to 14 months were involved in the experiment; experimental and control groups of eight animals each were formed. Heat and moisture treatment (steaming) of grain affects the carbohydrate complex of grain, increasing the content of easily soluble carbohydrates and improving the digestibility of feed by animals. Rational extrusion modes were revealed, which were: for corn $W_n = 12.8\%$, 393-413 K, the degree of dextrinization and starch digestibility was 50-60 % and 100-120 mg/g; for grain mixture $W_n = 12.7\%$: 393-413 K, the degree of dextrinization and starch digestibility was 35 % and 80 mg/g; for wheat $W_n = 12.3\%$ and 423-428 K, the degree of dextrinization and starch digestibility was 21-23 % and 60 mg/g.

Keywords: compound feed, non-productive animals, heat and moisture treatment, extrusion, kinetics, quality indicators.

Введение

Количество домашних животных (кошек и собак) увеличилось с 2018 по 2025 г. на 35 % и достигло в российских семьях в 2025 г. 75,5 млн. Соответственно, доля полнорационных кормов с 2022 по 2025 г. выросла с 81 до 86 % среди владельцев кошек и с 53 до 60 % среди владельцев собак. В 2025 году объём производства кормов для домашних животных, по данным Ассоциации (АПК), составил 1,69 млн тонн, увеличившись на 4,2 %, причём 84 %

производства приходится на корма для кошек, 16 % — для собак.

Аналитическая компания BusinesStat сообщила, что объёмы продаж готовых кормов для кошек в России в 2025 году достигли 805 тыс. тонн — на 8 % больше объёма 2024 года.

Поэтому назрела острая необходимость разработки инновационных технологий и оборудования для производства полнорационных комбикормов нового поколения для кошек и собак.

Для цитирования

Сапелкин И.А., Остриков А.Н., Фролова Л.Н. Кинетика процесса экструдирования комбикормов для непродуктивных животных // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 76–84. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-76-84

For citation

Sapelkin I.A., Ostrikov A.N., Frolova L.N. Kinetics of the process of extruding compound feed for non-productive animals. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 76–84. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-76-84

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Анализ строения желудочно-кишечного тракта плотоядных и травоядных пушных животных, проведенный в работе [1], позволил обосновать потребность последних в комбикормах с высокой степенью усвояемости. Авторы отмечают, что специфика кормления пушных животных обусловлена сезонностью их жизненных функций, которая определяет изменения метаболизма и питательной ценности рациона. В работе приведены соотношения усваиваемых питательных веществ в рационах норок различных пород, а также указана доля обменной энергии, приходящаяся на разные периоды кормления. Рассмотрены виды комбикормов и их преимущества, а также проанализированы технологические методы их производства для пушных животных, в частности экструзия, экструдирование и гранулирование с введением жира в пресс-гранулятор.

Роль питания в профилактике дегенерации суставов исследована в работе [2], где проанализировано влияние баланса макронутриентов, биоактивных соединений и специализированных добавок на сохранение целостности и функции суставов. Авторами получены новые данные о значимости омега-3-жирных кислот, хондропротекторов и рационов, обогащённых антиоксидантами, в регуляции воспалительных процессов и замедлении прогрессирования заболеваний. Установлено, что целенаправленное питание в период роста имеет существенное значение для предупреждения ортопедических патологий, особенно у собак крупных пород. По мнению авторов, пожизненный подход к поддержанию здоровья суставов, основанный на питании и интегрирующий коррекцию рациона с ветеринарным наблюдением, обеспечивает проактивную стратегию повышения подвижности животных, снижения тяжести заболеваний и улучшения качества их жизни.

Особенности питания стареющих собак и кошек охарактеризованы в работе Juan Cai и соавт. [3]. Авторы обозначили основные проблемы кормления животных пожилого возраста и сформулировали рекомендации по организации их рациона с учётом возрастных физиологических изменений.

Влияние беззернового рациона на уровень таурина и общее состояние здоровья собак крупных пород изучено в исследовании Donadelli R.A. и соавт. [4]. Восемь лабрадор-ретриверов (четыре самца и четыре самки, питомник Four Rivers Kennel, штат Миссури) содержались индивидуально и в течение 26 недель получали коммерческий полнорационный сбалансированный беззерновой корм (APS).

Образцы крови натошак отбирали до начала эксперимента (исходный уровень, нулевая неделя), а также на 13-й и 26-й неделях для определения биохимических и гематологических показателей, аминокислотного состава плазмы и содержания таурина в цельной крови. Мочу собирали методом свободного сбора на нулевой и 26-й неделях для анализа таурина и креатинина, а свежие образцы фекалий — в те же сроки для определения желчных кислот. По истечении 26 недель кормления кормом APS выведение желчных кислот с фекалиями возросло; несмотря на это, содержание таурина в плазме и цельной крови за период исследования увеличилось. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение беззернового корма APS в течение 26 недель способствовало повышению уровня таурина у лабрадор-ретриверов и не являлось причиной развития дилатационной кардиомиопатии у животных опытной группы.

Вопросам применения пробиотиков для стимуляции роста, защиты от патогенных инфекций и повышения усвояемости корма посвящена работа Rayshan A.R. и соавт. [5]. Авторы отмечают, что пробиотики, используемые в кормлении домашних животных, преимущественно поддерживают баланс кишечной микробиоты и применяются для противодействия инфекциям. Вместе с тем ряд пробиотических штаммов обладает потенциально неблагоприятными свойствами, к которым относятся устойчивость к противомикробным препаратам, наличие факторов вирулентности, гемолитический потенциал и нежелательное выделение токсичных биохимических соединений. Для исключения причинно-следственных рисков для каждого вида животных и каждой среды были подобраны специфические штаммы пробиотиков. Установлено, что эффективное действие пробиотика и его польза для организма-хозяина достигаются лишь при создании оптимальных условий, учитывающих особенности иммунной системы животных.

Tanprasertsuk J. и др. [6], исследуя усвояемость питательных веществ и оценивая метаболизируемую энергию (МЭ) свежеприготовленных кормов для собак, установили, что они недостаточно изучены. Ими были проведены исследования с различными группами собак, которые получали одну из пяти экспериментальных диет со сравнимым макронутриентным составом: сухой экструдированный корм на основе курицы и свежий корм на основе курицы, говядины, свинины или индейки в течение 10 дней. Ежедневно регистрировались потребление пищи и характеристики фекалий, а также отбирались образцы фекалий для анализа питательных

веществ. Несмотря на сопоставимое потребление сухого вещества (СВ) и калорийности обоих рационов на основе куриного мяса, рацион из свежих продуктов привел к снижению частоты дефекации ($1,2 \pm 0,2$ против $1,7 \pm 0,5$ раз в день), снижению содержания СВ в фекалиях (24 ± 8 против 47 ± 10 г./день) и снижению калорийности фекалий (92 ± 31 против 189 ± 43 ккал / день) по сравнению с рационом из гранулированного корма. Кажущаяся общая переваримость СВ, белка, жира, безазотистого экстракта и калорий в рационе из гранулированного корма была значительно ниже, чем в любом из рационов из свежих продуктов. Измеренная обменная энергия (ОЭ) на единицу сухого вещества корма во всех свежих рационах, за исключением рациона на основе свинины, была значительно выше, чем в сухом корме. Стандартный расчет показал наилучшие результаты для двух свежих рационов с самым высоким содержанием жира (курица, говядина), а расчет NRC 2006 – для свежего рациона с самым высоким содержанием белка (свинина).

Geiger A.K. и Weber L.P. [7], производя оценку источников небелкового азота в сухих кормах для собак, отметили, что часть сырого белка, указанного на упаковке корма для животных, может фактически поступать из неперевариваемого органического азота или потенциально токсичных неорганических источников небелкового азота. Эти соединения могут приводить к неблагоприятным последствиям, таким как образование метгемоглобина и усиление окислительного стресса, или к потенциально полезным эффектам, таким как улучшение эластичности сосудов и снижение воспаления. Для анализа удержания азота и выявления небелкового азота были оценены четыре сухих корма для собак и один лабораторный рацион, которые затем скармливались биглям. В ходе эксперимента собакам назначали каждый рацион и кормили рационами, покрытыми оксидом хрома, в течение 48 часов, после чего проводили сбор мочи и фекалий, а также сбор плазмы для определения общего азота, нитратов, аммиака и мочевины. Количество удержанного азота (93–96%) не различалось между рационами. Общая кажущаяся усвояемость белка в пищеварительном тракте варьировалась от 69% до 84%, при этом показатели высокобелковых диет были значительно выше, чем у диет, приготовленных в лаборатории, и диет со средним содержанием белка. Высокобелковая диета также содержала самую высокую концентрацию нитратов, что привело к повышению уровня нитротирозина в плазме. Во время второго эксперимента восемь собак получали одинаковые диеты в течение 6 дней,

после чего была проведена эхокардиография с забором крови, мочи и кала. Для оценки состояния здоровья измеряли уровни метгемоглобина, нитротирозина в плазме и С-реактивного белка (показатель воспаления). Кроме того, была выявлена положительная взаимосвязь между содержанием сырого белка, сырого жира, ценой и калорийностью. Длительное кормление собак высокобелковыми кормами может привести к избытку калорий без изменения сердечно-сосудистой функции или заметного увеличения воспаления.

Klinmalai P. и соавт. [8] провели анализ альтернативных источников белка для экологически безопасных и питательных кормов для домашних животных, включая растительное, водное, насекомое и клеточное сырьё. Авторы отмечают, что, несмотря на существенные преимущества данных источников, их применение сопряжено с рядом трудностей, связанных с усвояемостью, вкусовыми качествами и получением разрешений регулирующих органов.

В исследовании Banton S. и соавт. [9] установлено, что у собак, получающих рацион с высоким содержанием белка и низким содержанием углеводов, повышается постпрандиальная концентрация глюкозы и аминокислот в плазме крови. Животных кормили тремя видами кормов, различавшихся содержанием белка, углеводов и клетчатки, что позволило получить данные о кардиометаболическом состоянии собак при использовании указанных рационов.

Поэтому дальнейшее ускоренное развитие отечественной комбикормовой индустрии для домашних (непродуктивных) животных является актуальной задачей.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования приняты: зерновое сырьё (пшеница, кукуруза и их смесь), наиболее широко используемое при выработке комбикормов для комнатных животных; полнорационные комбикорма для комнатных животных, приготовленные по рецептам, разработанным, исходя из анализа патентных и информационных данных.

В состав полнорационных комбикормов входили следующие компоненты, содержание которых варьировалось в пределах: кукуруза – 30–70%; пшеница – 30–70%; мясокостная мука – 12–50%; рыбная мука – 2–4%; молоко сухое обезжиренное – 1–5%; дрожжи – 2–5%; жир кормовой – 3–5%; меласса – 2–3%; премикс – 1%.

Для определения и исследования физико-механических свойств и качества компонентов гранулированных комбикормов использовали следующие методы: запах – по ГОСТ 13496.13–2018; зараженность вредителями – по ГОСТ 13496.13–2018 Комбикорма. Методы определения запаха,

зараженности вредителями хлебных запасов; влага – по ГОСТ Р 54951–2012 (ИСО 6496:1999) Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания влаги в кормах для животных; азот и сырой протеин – по ГОСТ 13496.4–93 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина; хлористый натрий – по ГОСТ 13496.1–89 Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения натрия и хлористого натрия; кальций – по ГОСТ 13496.1–98 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения кальция; фосфор – по ГОСТ 26657–85 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения фосфора; металломагнитная примесь – по ГОСТ 13496.9–73 Комбикорма. Методы определения содержания металломагнитной примеси; крошимость – по ГОСТ 28497, ГОСТ 22513 Комбикорма, сырье гранулированные. Метод определения крошимости; определение содержания нитратов и нитритов по ГОСТ 13496.19–2015; метод определения остаточных количеств пестицидов – по ГОСТ 13496.20–2014; методы определения лизина и триптофана по ГОСТ 13496.21–2015; метод определения цистина и метионина по ГОСТ 13496.22–90; определение содержания аминокислот (лизина, метионина, треонина, цистина и триптофана) по ГОСТ 31480–2012 методом капиллярного электрофореза; определение металломагнитной примеси по ГОСТ 31484–2012; определения содержания сухого вещества по ГОСТ 31640–2012; метод определения содержания сырого протеина, сырой клетчатки, сырого жира и влаги с применением спектроскопии в ближней инфракрасной области по ГОСТ 32040–2012.

Исследования процессов экструдирования для получения полнорационных комбикормов для домашних животных проводили на экспериментальной линии в АО «НПЦ "ВНИИКП"». Температуру экструдата определяли с помощью термопар марки Т 49–5 и потенциометра КСП 4. Ток, потребляемый основным приводным двигателем, определяли по амперметру типа Э 8022. Производительность экструдера определяли отвесом на мешок и взвешиванием на весах РН 50Ш13П 1 (± 10 г). Время определяли секундомером «Агат» 4295 по ГОСТ 5072–79. При изучении процесса охлаждения температуру продукта определяли ртутным стеклянным лабораторным термометром ТЛ 3–1 А (ГОСТ 215–73), предназначенным для измерения температуры от 273 до 773 К с допустимой погрешностью ± 2 К, погружением его в продукт. Динамическую составляющую избыточного давления воздуха

во всасывающем трубопроводе вентилятора определяли микроманометром ММ 240.

Исследования влияния условий и сроков хранения проводили в условиях экспериментально-стендового корпуса. Хранение комбикормов осуществляли в осенне-зимний период при температуре воздуха 279–291 К и в весенне-летний период при температуре воздуха 291–296 К и относительной влажности 75–89 %. Комбикорма хранили в металлических силосах и в четырёхслойных бумажных мешках в течение четырёх месяцев.

Было заложено на хранение три варианта комбикормов данного состава, отличающихся тем, что в 1-м варианте применено двухстадийное экструдирование пшеницы и жира, во 2-м варианте — одностадийное экструдирование только пшеницы, в 3-м варианте комбикорм не экструдирован (контрольный комбикорм).

В процессе хранения определяли следующие показатели: влажность, сырой протеин, сырой жир, растворимые углеводы, переваримость крахмала (*in vitro*), кислотность, кислотное число жира, бактериальную и грибную обсеменённость, витамины.

Апробация корма, выработанного на опытно-промышленной линии по рецепту, разработанному АО «НПЦ "ВНИИКП"», проведена в Центральном питомнике лабораторных животных.

В эксперименте было задействовано восемь самцов и восемь самок породы бигль в возрасте от 12 до 14 месяцев, из которых были сформированы опытная и контрольная группы по восемь животных в каждой.

Контрольная группа получала рацион для собак, составленный из натуральных продуктов: овсяная крупа, мясо, молоко (сухое), овощи (морковь, картофель), зелень, рыбий жир, мел, поваренная соль. Корм скармливали два раза в сутки в виде каши. Опытную группу животных в течение предварительного периода (5 дней) приучали к новому корму, постепенно заменяя им натуральные продукты. В опытный период собаки этой группы получали только испытуемый комбикорм из расчёта 50 г на 1 кг живой массы.

В ходе опыта изучали следующие показатели: живая масса в начале и по окончании опытного периода; поедаемость корма (в предварительном периоде); сохранность; концентрация гемоглобина и глюкозы, гематокрит в цельной крови; концентрация общего белка и триглицеридов в сыворотке крови в конце опытного периода.

Результаты

Исследование процесса экструдирования пшеницы, кукурузы и их смеси проводили на экструдере КМЗ-2М с установкой в его рабочий шнек (от входа) греющих шайб, диаметр которых составлял 117, 125 и 119 мм. Им соответствовали кольца диаметром 130, 120 и 128 мм.

Отмечено существенное влияние гранулометрического состава зерна на степень переваримости крахмала (in vitro).

Установлено, что уменьшение размера частиц зерна приводило к повышению переваримости крахмала (in vitro) (рисунок 1).

Выполненные исследования переваримости крахмала (in vitro) в экструдате, полученном из цельного зерна, показали низкую степень переваримости крахмала – 22,3%, в то время как переваримость крахмала в экструдате, полученном из измельченной кукурузы составляла 86,4% (таблица 1), т. е. была в три раза.

Переваримость крахмала в экструдированной пшеницы возросла на 30–35% по сравнению с экструдированной пшеницы из цельного зерна.

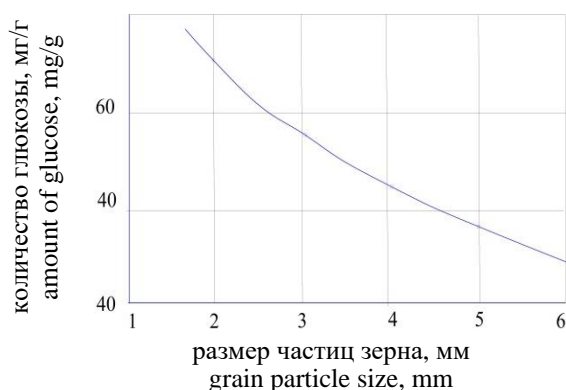


Рисунок 1. Зависимость гранулометрического состава зерна кукурузы с влажностью 13,3% на перевариваемость крахмала (in vitro)

Figure 1. Dependence of the granulometric composition of corn grain with a moisture content of 13.3% on starch variability (in vitro)

Сравнительный анализ позволил определить рациональный размер частиц измельченных зерен, который составлял около $3,0 \times 10^{-3}$ м, который являлся приоритетным при проведении дальнейших исследований.

Известно [10, 11] существенное влияние термовлажностной обработки (увлажнение, пропаривание, кондиционирование) на характер протекания процесса экструзии. Предварительная влаготепловая обработка зерновых культур является одним из важнейших подготовительных этапов проведения процесса экструдирования [13, 14].

Повышению декстринизации крахмала при экструдировании способствовало увеличение начальной влажности зерновых культур (пшеница, кукуруза, зерносмесь) в процессе

термовлажностной обработки. Для достижения начальной влажности в диапазоне от 12 до 25% зерна подвергались увлажнению и пропариванию. При этом возрастание начальной влажности зерен до 18% приводило к заметному росту декстринизации крахмала. Переваримость и степень декстринизации крахмала оценивали по содержанию глюкозы в экструдатах, получаемых из увлажненных зерновых. Предлагаемые режимы экструдирования пропаренных зерен позволили достичь в кукурузе переваримость крахмала 66%, количество глюкозы – 150 мг/г, соответственно в зерносмеси – 44% и 117 мг/г, в пшенице – 33% и 91 мг/г (таблица 1, рисунок 2). При дальнейшем повышении начальной влажности зерен свыше 18% наблюдалась практическая стабилизация декстринизации крахмала в них.

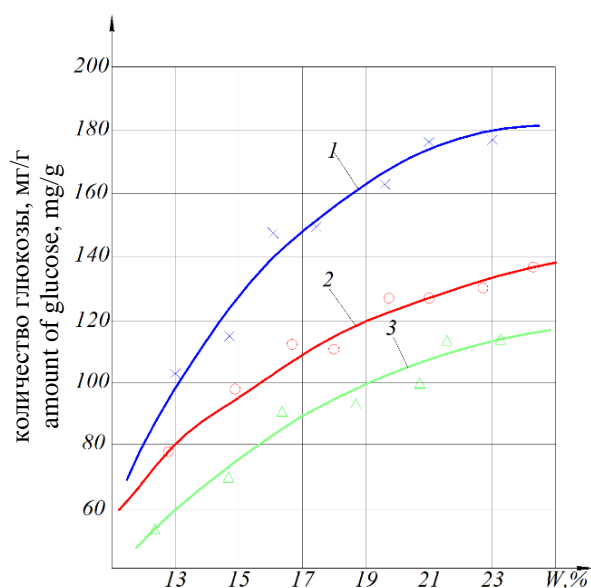


Рисунок 2. Зависимость содержания глюкозы в экструдатах, получаемых из увлажненных зерновых с начальной влажностью: 1 – кукуруза ($W_n = 17,6\%$); 2 – зерносмесь ($W_n = 17,8\%$); 3 – пшеница ($W_n = 18,3\%$)

Figure 2. Dependence of glucose content in extrudates obtained from moistened grains with initial moisture: 1 – corn ($W_n = 17.6\%$); 2 – grain mixture ($W_n = 17.8\%$); 3 – wheat ($W_n = 18.3\%$)

Было отмечено существенное возрастание роли температуры на степень декстринизации крахмала. Выявлено, что при начальной влажности зерна ($W_n = 18,3\%$) увеличение температуры экструдата с 368 до 423 К приводило к возрастанию содержания глюкозы с 52 до 119 мг/г (кривая 1, рисунок 3), увеличение температуры экструдата с 369 до 423 К приводило к возрастанию содержания глюкозы с 52 до 178 мг/г (кривая 2, рисунок 3), увеличение температуры экструдата с 367 до 413 К приводило к возрастанию содержания глюкозы с 53 до 179 мг/г (кривая 3, рисунок 3), что на 40–42% выше, чем в зерне с начальной влажностью $W_n = 12,5\%$.

При дальнейшем повышении начальной влажности зерен свыше 18% не наблюдалось значительного снижения удельных энергозатрат на экструдирование.

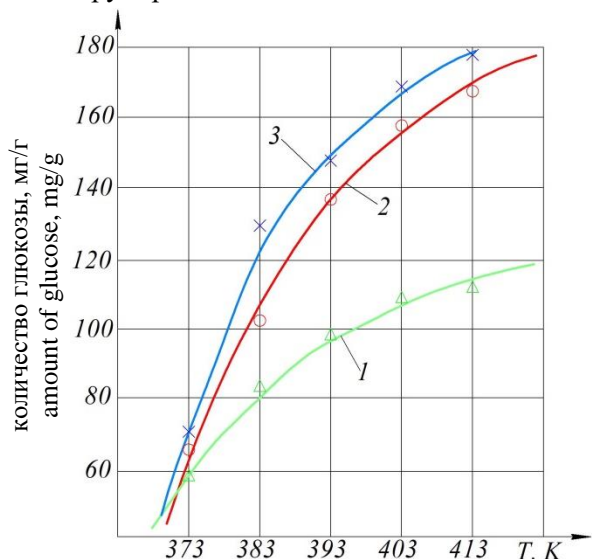


Рисунок 3. Зависимость температуры нагрева экструдруемой кукурузы на изменение переваримости крахмала (in vitro) при экструдировании кукурузы с влажностью, %: 1 – 12,5; 2 – 17,8; 3 – 18,3

Figure 3. The dependence of the heating temperature of the extruded corn on the change in starch digestibility (in vitro) during the extrusion of corn with moisture, %: 1 – 12,5; 2 – 17,8; 3 – 18,3

Установлено, что тепловлажностная обработка зерна паром не оказывает существенного влияния на деструкцию крахмала (таблица 2): пропаривание пшеницы и кукурузы в течение 4 минут незначительно увеличивает переваримость крахмала на 0,1–0,3 мг/г, а в течение 10 минут – на 0,5–0,7 мг/г. Вместе с тем выявлено, что увеличение влажности пропаренного зерна свыше 18% нецелесообразно, так как изменения, происходящие в крахмале, незначительны. Для достижения конечной влажности в 18% пшеница обрабатывалась паром под давлением 0,2–0,3 МПа в течение 10–12 минут, а кукуруза и зерносмесь – в течение 15–16 минут.

Но дальнейшее экструдирование пропаренного зерна значительно интенсифицирует процесс деструкции крахмала. Если переваримость крахмала в экструдате из пшеницы и кукурузы с начальной влажностью $W_n = 12\text{--}13\%$ составляла соответственно 60–65 и 90–110 мг/г, то в экструдате, полученном из пропаренного зерна с $W_n = 18\%$ – соответственно 100 и 160 мг/г (рисунок 4). Переваримость крахмала в экструдате из кукурузы достигалась при температуре экструдирования 398–403 К; для пшеницы – при 413–418 К и для зерносмеси – при 408–413 К (таблица 1).

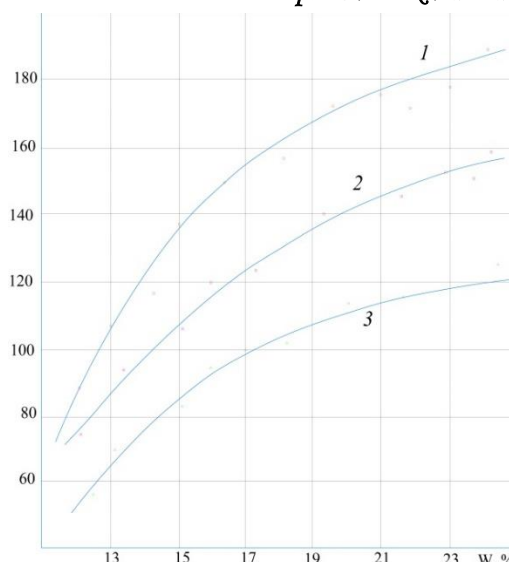


Рисунок 4. Зависимость влияния влажности пропаренного зерна на изменение переваримости крахмала (in vitro) при экструдировании зерновых с влажностью: 1 – кукуруза ($W_n = 18,1\%$); 2 – зерносмесь ($W_n = 18,3\%$); 3 – пшеница ($W_n = 18,6\%$)

Figure 4. The dependence of the influence of steamed grain moisture on the change in starch digestibility (in vitro) during extrusion of grains with moisture content: 1 – corn ($W_n = 18.1\%$); 2 – grain mixture ($W_n = 18.3\%$); 3 – wheat ($W_n = 18.6\%$)

Повышение усвояемости корма и снижение его конверсии обусловлено увеличением содержания легкорастворимых углеводов, получаемых в результате деструкции углеводного комплекса в процессе экструдирования зерна при вышеуказанных температурных режимах. Анализ данных таблицы 1 указывает на доминирующее влияние температуры экструдата на увеличение переваримости крахмала (рисунок 5).

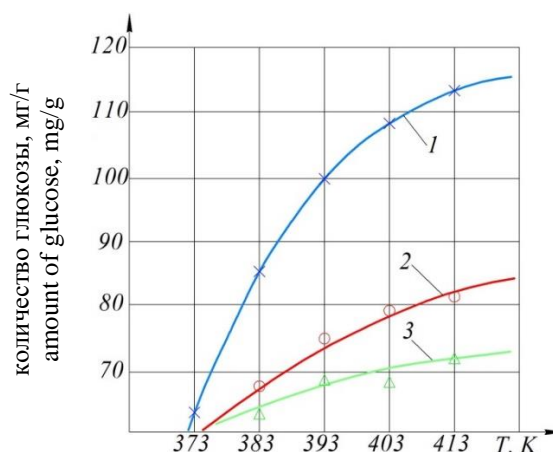


Рисунок 5. Зависимость температуры на переваримость крахмала (in vitro) при экструдировании зерновых с влажностью: 1 – кукуруза ($W_n = 12,8\%$); 2 – зерносмесь ($W_n = 12,7\%$); 3 – пшеница ($W_n = 12,1\%$)

Figure 5. Temperature dependence on starch digestibility (in vitro) during extrusion of grains with moisture content: 1 – corn ($W_n = 12.8\%$); 2 – grain mixture ($W_n = 12.7\%$); 3 – wheat ($W_n = 12.1\%$)

Протекание процесса экструдирования кукурузы и её смеси с пшеницей в диапазоне температур 373–383 К показало переваримость крахмала в экструдатах зерносмеси, кукурузы и пшеницы соответственно 68, 85 и 61 мг

глюкозы на 1 г продукта, а экструдирование кукурузы, зерносмеси и пшеницы при температуре 393–413 К способствовало увеличению переваримости крахмала соответственно до 100–110, 80–83 и 60–65 мг/г.

Таблица 1.

Результаты исследования процесса экструдирования комбикорма для непродуктивных животных

Table 1.

Results of a study on the extrusion process of compound feed for non-productive animals

Продукт Product	W _н , %	W _к , %	T, К	Переваримость крахмала, % Starch digestibility, %	Степень декстринизации, % Degree of dextrinization, %
Кукуруза неизмельченная, неувлажненная Corn, unchopped, undampened	13,3	–	–	22,3	–
Кукуруза неизмельченная экструдированная Corn, unchopped, extruded	13,3	8,4	408	86,4	40,6
Кукуруза измельченная экструдированная Corn, unchopped, extruded	12,8	7,6	411	111,6	57,2
Кукуруза измельченная экструдированная, увлажненная Corn, unchopped, extruded, moistened	17,6	11,2	395	143,4	64,4
Кукуруза измельченная экструдированная, пропаренная, Corn, unchopped, extruded, parboiled	18,1	11,9	400	156,0	68,7
Пшеница неизмельченная, неувлажненная Wheat, unchopped, unchopped	12,3	–	–	12,4	–
Пшеница неизмельченная экструдированная Wheat, unchopped, extruded	12,3	8,1	425	59,3	21,6
Пшеница измельченная экструдированная Wheat, unchopped, extruded	12,1	7,9	428	68,5	29,0
Пшеница измельченная экструдированная, увлажненная Wheat, unchopped, extruded, parboiled	18,3	12,8	413	88,8	32,6
Пшеница измельченная экструдированная, пропаренная Grain mixture, unchopped	18,6	13,2	415	96,5	38,2
Зерносмесь измельченная, неувлажненная Grain mixture, unchopped, extruded	12,7	–	–	19,3	–
Зерносмесь измельченная экструдированная Grain mixture, unchopped, extruded, moistened	12,7	8,9	415	79,5	35,8
Зерносмесь измельченная экструдированная, увлажненная Grain mixture, unchopped, extruded, parboiled	17,8	11,6	306	108,6	44,3
Зерносмесь измельченная экструдированная, пропаренная	18,3	12,3	309	135,4	51,8

Таблица 2.

Изменение переваримости крахмала (in vitro) зерна от продолжительности пропаривания

Table 2.

Change in starch digestibility (in vitro) of grain as a function of steaming duration

Продолжительность обработки зерна паром, с Duration of grain treatment with steam, s	Кукуруза Corn		Пшеница Wheat	
	Влажность, % Moisture, %	Переваримость крахмала, мг глюкозы на 1 г продукта Starch digestibility, mg glucose per 1 g of product	Влажность, % Moisture, %	Переваримость крахмала, мг глюкозы на 1 г продукта Starch digestibility, mg glucose per 1 g of product
0	13,3	21,2	12,3	12,4
120	13,8	21,0	13,7	12,5
240	14,7	21,3	14,6	12,7
360	15,6	21,6	15,3	12,7
480	16,0	21,9	16,7	12,9
600	16,8	22,4	18,3	13,0
720	17,7	23,1	20,1	13,3
840	18,8	23,3	21,8	13,2
960	19,4	23,5	24,6	13,4

В результате проведённых исследований были выявлены рациональные режимы экструдирования, при которых степень декстринизации и переваримость крахмала составляли соответственно:

— 50–60 % и 100–120 мг/г для кукурузы с начальной влажностью W_н = 12,8 % при температуре экструдирования 393–413 К;

— 21–23 % и 60 мг/г для пшеницы с начальной влажностью W_н = 12,3 % при температуре экструдирования 423–428 К;

— 35 % и 80 мг/г для зерносмеси с начальной влажностью W_н = 12,7 % при температуре экструдирования 393–413 К.

Заключение

1. Установлено существенное влияние среднемедианного диаметра частиц зерновых культур (пшеницы, кукурузы и зерносмеси) на перевариваемость крахмала (in vitro): чем меньше размер частиц зерна, тем выше перевариваемость крахмала. Определен рациональный размер частиц измельченных зерен, составляющий около $3,0 \times 10^{-3}$ м.

2. Определено влияние термовлажностной обработки (пропаривания) на углеводный комплекс зерна, которая существенно увеличивала содержание легкорастворимых углеводов, что повышало усвояемость корма животными.

При этом за счет улучшения пластичности экструдированной массы повышаются технико-экономические показатели экструдирования.

3. Отмечена доминирующая роль температуры нагрева зерна в процессе экструдирования на повышение степени декстринизации и переваримости крахмала.

4. Выявлены рациональные режимы экструдирования, в которых степень декстринизации и перевариваемость крахмала соответственно составляла: для кукурузы – 50–60% и 100–120 мг/г; для зерносмеси – 35% и 80 мг/г; для пшеницы – 21–23% и 60 мг/г.

Литература

- Igorov B., Makarynska A., Voietska O., Tsiundyk O. Prospects for the development of feed production for fur animals // Grain Products and Mixed Fodder's. 2021. Vol. 21. No. 2 (82). P. 39–44.
- Guo X., Yuan X., Farooq N., Yang Y. et al. Nutritional strategies for managing joint health in companion animals // Animal Advances. 2025. Vol. 2. Article e022.
- Cai X., Mao H., Zhu L. Nutrition research in aging dogs and cats: what we know and what we need to do // Animals. 2026. Vol. 16. P. 571–591.
- Donadelli R.A., Pezzali J.G., Oba P.M., Swanson K.S. et al. A commercial grain-free diet does not decrease plasma amino acids and taurine status but increases bile acid excretion when fed to Labrador Retrievers // Translational Animal Science. 2020. Vol. 4. P. 1–12.
- Tanprasertsuk J., Perry L.M., Tate D.E., Honaker R.W. et al. Apparent total tract nutrient digestibility and metabolizable energy estimation in commercial fresh and extruded dry kibble dog foods // Translational Animal Science. 2021. Vol. 5. P. 1–9.
- Geiger A.K., Weber L.P. Assessing non-protein nitrogen sources in commercial dry dog foods // Translational Animal Science. 2022. Vol. 6. P. 1–11.
- Klinmalai P., Kamonpatana P., Thongpech A., Sodsai J. et al. Comprehensive review of alternative proteins in pet food: research publications, patents, and product trends in plant, aquatic, insect, and cell-based sources // Foods. 2025. Vol. 14. Article 2640.
- Banton S., Raheb S., Singh P., Cant J.P. et al. Dogs fed a high protein, low carbohydrate diet have elevated postprandial plasma glucagon and amino acid concentrations and tend to have lower glucose concentrations compared to two different moderate protein, moderate carbohydrate diets // Translational Animal Science. 2025. Vol. 9. Article txfaf017.
- Оспанов А.Б., Сидорова В.И., Чижаева А.В., Январёва Н.И. и др. Микробиологические исследования сырья и комбикормов для непродуктивных животных // Кормопроизводство. 2022. № 8. С. 30–36.
- Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Михайлова Н.А., Драган И.В. и др. Создание ресурсосберегающей технологии кормов для непродуктивных животных // Advances in Science and Technology: сборник статей XXIX Международной научно-практической конференции. 2020. С. 10–12.
- Кудинова А.М., Кудинова Н.А. Оценка качества и питательности полнорационных комбикормов для непродуктивных животных // Инновационные научные исследования. 2021. № 12-2 (14). С. 16–21.
- Сидорова В.И., Январёва Н.И., Оспанов А.Б. Продукционные экструдированные комбикорма для непродуктивных животных в Казахстане // Инновационные достижения науки и техники АПК: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Кинель, 2022. С. 325–336.
- Остриков А.Н., Оспанов А.А., Василенко В.Н., Тимурбекова А.К. и др. Математическое моделирование течения расплава мультислакового сырья в процессе коэкструзии // Вестник Алматинского технологического университета. 2024. № 146 (4). С. 105–121.
- Loureiro B.A., Oliveira M.C.C., Peixoto M.C. et al. Starch gelatinization implications for nutrient digestibility and fermentation products in the faeces of Beagle dogs // Animal Feed Science and Technology. 2024. Vol. 309. Article 115894. doi: 10.1016/j.anifeeds.2024.115894
- Corsato Alvarenga I., Lierz R., Chen Y., Lu A. et al. Processing of corn-based dog foods through pelleting, baking and extrusion and their effect on apparent total tract digestibility and colonic health of adult dogs // Journal of Animal Science. 2024. Vol. 102. Article skae067. doi: 10.1093/jas/skae067
- Pescuma M.G., Ximenes T.O., Garcia C.A., Ramos E.C. et al. Dog breed and starch gelatinisation correlation in food digestibility and faecal traits // Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. 2025. Vol. 109. No. 2. P. 243. doi: 10.1111/jpn.14047
- Cho H.-W., Seo K., Chun J.L., Jeon J. et al. Effects of resistant starch on anti-obesity status and nutrient digestibility in dogs // Journal of Animal Science and Technology. 2023. Vol. 65. No. 3. P. 550–561. doi: 10.5187/jast.2023.e11
- Cucinotta S., Oteri M., Baller M.A., Scarpim L.B. et al. Effect of citrus pellet on extrusion parameters, kibble macrostructure, starch cooking and in vitro digestibility of dog foods // Animals. 2023. Vol. 13. No. 4. Article 745. doi: 10.3390/ani13040745
- Zhu D., Che L., Yu B., Chen D. Extruded enzyme-added corn improves the growth performance, intestinal function, and microbiome of weaning piglets // Animals. 2022. Vol. 12. No. 8. Article 1002. doi: 10.3390/ani12081002
- Télez-Morales J.A., Rodríguez-Miranda J., Serrano-Villa F.S., Gutiérrez-López G.F. et al. Impact of extrusion on biofunctional, rheological, thermal, and structural properties of corn starch/whey protein isolate blends during in vitro gastrointestinal digestion // Polymers. 2025. Vol. 17. No. 23. Article 3211. doi: 10.3390/polym17233211

References

- Igorov B., Makarynska A., Voietska O., Tsiundyk O. Prospects for the development of feed production for fur animals. Grain Products and Mixed Fodder's. 2021. vol. 21. no. 2 (82). pp. 39–44.
- Guo X., Yuan X., Farooq N., Yang Y. et al. Nutritional strategies for managing joint health in companion animals. Animal Advances. 2025. vol. 2. e022.
- Cai X., Mao H., Zhu L. Nutrition research in aging dogs and cats: what we know and what we need to do. Animals. 2026. vol. 16. pp. 571–591.

- 4 Donadelli R.A., Pezzali J.G., Oba P.M., Swanson K.S. et al. A commercial grain-free diet does not decrease plasma amino acids and taurine status but increases bile acid excretion when fed to Labrador Retrievers. *Translational Animal Science*. 2020. vol. 4. pp. 1–12.
- 5 Tanprasertsuk J., Perry L.M., Tate D.E., Honaker R.W. et al. Apparent total tract nutrient digestibility and metabolizable energy estimation in commercial fresh and extruded dry kibble dog foods. *Translational Animal Science*. 2021. vol. 5. pp. 1–9.
- 6 Geiger A.K., Weber L.P. Assessing non-protein nitrogen sources in commercial dry dog foods. *Translational Animal Science*. 2022. vol. 6. pp. 1–11.
- 7 Klinmalai P., Kamonpatana P., Thongpech A., Sodsai J. et al. Comprehensive review of alternative proteins in pet food: research publications, patents, and product trends in plant, aquatic, insect, and cell-based sources. *Foods*. 2025. vol. 14. 2640.
- 8 Banton S., Raheb S., Singh P., Cant J.P. et al. Dogs fed a high protein, low carbohydrate diet have elevated postprandial plasma glucagon and amino acid concentrations and tend to have lower glucose concentrations compared to two different moderate protein, moderate carbohydrate diets. *Translational Animal Science*. 2025. vol. 9. txaf017.
- 9 Ospanov A.B., Sidorova V.I., Chizhaeva A.V., Yanvareva N.I. et al. Microbiological studies of raw materials and compound feed for non-productive animals. *Kormoproizvodstvo [Fodder Production]*. 2022. no. 8. pp. 30–36. (in Russian).
- 10 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Mikhailova N.A., Dragan I.V. et al. Development of a resource-saving technology of feed for non-productive animals. *Advances in Science and Technology: collection of articles of the XXIX International Scientific and Practical Conference*. 2020. pp. 10–12. (in Russian).
- 11 Kudinova A.M., Kudinova N.A. Assessment of the quality and nutritional value of complete compound feeds for non-productive animals. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya [Innovative Scientific Research]*. 2021. no. 12-2 (14). pp. 16–21. (in Russian).
- 12 Sidorova V.I., Yanvareva N.I., Ospanov A.B. Production extruded compound feeds for non-productive animals in Kazakhstan. *Innovative achievements of science and technology of the agro-industrial complex: collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. Kinel, 2022*. pp. 325–336. (in Russian).
- 13 Ostrikov A.N., Ospanov A.A., Vasilenko V.N., Timurbekova A.K. et al. Mathematical modeling of the melt flow of multigrain raw materials during coextrusion. *Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Almaty Technological University]*. 2024. no. 146 (4). pp. 105–121. (in Russian).
- 14 Loureiro B.A., Oliveira M.C.C., Peixoto M.C. et al. Starch gelatinization implications for nutrient digestibility and fermentation products in the faeces of Beagle dogs. *Animal Feed Science and Technology*. 2024. vol. 309. 115894. doi: 10.1016/j.anifeeds.2024.115894
- 15 Corsato Alvarenga I., Lierz R., Chen Y., Lu A. et al. Processing of corn-based dog foods through pelleting, baking and extrusion and their effect on apparent total tract digestibility and colonic health of adult dogs. *Journal of Animal Science*. 2024. vol. 102. skae067. doi: 10.1093/jas/skae067
- 16 Pescuma M.G., Ximenes T.O., Garcia C.A., Ramos E.C. et al. Dog breed and starch gelatinisation correlation in food digestibility and faecal traits. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2025. vol. 109. no. 2. p. 243. doi: 10.1111/jpn.14047
- 17 Cho H.-W., Seo K., Chun J.L., Jeon J. et al. Effects of resistant starch on anti-obesity status and nutrient digestibility in dogs. *Journal of Animal Science and Technology*. 2023. vol. 65. no. 3. pp. 550–561. doi: 10.5187/jast.2023.e11
- 18 Cucinotta S., Oteri M., Baller M.A., Scarpim L.B. et al. Effect of citrus pellet on extrusion parameters, kibble macrostructure, starch cooking and in vitro digestibility of dog foods. *Animals*. 2023. vol. 13. no. 4. 745. doi: 10.3390/ani13040745
- 19 Zhu D., Che L., Yu B., Chen D. Extruded enzyme-added corn improves the growth performance, intestinal function, and microbiome of weaning piglets. *Animals*. 2022. vol. 12. no. 8. 1002. doi: 10.3390/ani12081002
- 20 Téllez-Morales J.A., Rodríguez-Miranda J., Serrano-Villa F.S., Gutiérrez-López G.F. et al. Impact of extrusion on biofunctional, rheological, thermal, and structural properties of corn starch/whey protein isolate blends during in vitro gastrointestinal digestion. *Polymers*. 2025. vol. 17. no. 23. 3211. doi: 10.3390/polym17233211

Сведения об авторах

Иван А. Сапелкин аспирант, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ivan-sapelkin2000@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0202-7700>

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

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

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

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

Вклад авторов

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Ivan A. Sapelkin graduate student, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ivan-sapelkin2000@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0202-7700>

Alexander N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@ya.ru

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

Larisa N. Frolova Doc. Sci. (Engin.), professor, food production machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, fln-84@mail.ru

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

Contribution

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 23/02/2026	После редакции 20/04/2026	Принята в печать 22/04/2026
Received 23/02/2026	Accepted in revised 20/04/2026	Accepted 22/04/2026