

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406>

Поступила 14.06.2025

Поступила после рецензирования 19.09.2025

Принята в печать 23.09.2025

© Ким А. А., Баланов П. Е., Смотраева И. В., 2025

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

ВЛИЯНИЕ ФЕРМЕНТАЦИИ БОБОВЫХ НА СНИЖЕНИЕ АНТИПИТАТЕЛЬНОГО ФАКТОРА. ОБЗОР

Ким А. А.*, Баланов П. Е., Смотраева И. В.

Факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

антинутриенты,
ферментация,
бобовые, фитаты,
сапонины, танины

Бобовые являются ценным пищевым сырьем благодаря содержанию растительного белка, незаменимых аминокислот и клетчатки. Однако они содержат антипитательные вещества, такие как танины, фитаты, олигосахариды, оксалаты, сапонины и ингибиторы протеазы, которые при чрезмерном потреблении или неправильной технологической обработке могут оказывать негативное и даже токсическое воздействие на организм человека. В условиях растущего спроса на продукты питания из растительного сырья, в том числе бобовые, возникает необходимость сокращать риски, связанные с избыточным потреблением антинутриентов. Целью данной статьи является анализ исследований последних пяти лет, посвященных оценке эффективности основных методов технологической обработки бобовых (замачивание, термическая обработка, проращивание и ферментация) для снижения содержания антипитательных веществ. Также проведено сравнение полученных данных для выявления наиболее эффективных методов. Результаты обзора доказывают целесообразность комбинирования нескольких методов обработки бобовых для снижения содержания антинутриентов и повышения пищевой ценности продуктов из бобового сырья. На основе проанализированных данных был определен наиболее эффективный подход к переработке бобовых, который значительно снижает основные антинутриенты в бобовых. Рассмотрено влияние ключевых антинутриентов на здоровье человека и проанализированы основные проблемы пищевой промышленности, связанные с ферментацией бобовых.

Received 14.06.2025

Accepted in revised 19.09.2025

Accepted for publication 23.09.2025

© Kim A. A., Balanov P. E., Smotraeva I. V., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

EFFECT OF LEGUME FERMENTATION ON THE REDUCTION OF THE ANTI-NUTRITIONAL FACTOR. REVIEW

Anastasia A. Kim*, Petr E. Balanov, Irina V. Smotraeva

Faculty of Biotechnologies, ITMO University, Saint Petersburg, Russia

KEY WORDS:

anti-nutrients,
fermentation, legumes,
phytates, saponins,
tannins

ABSTRACT

Legumes are valuable food raw materials due to the content of plant protein, essential amino acids and fiber. However, they contain anti-nutrients such as tannins, phytates, oligosaccharides, oxalates, saponins and protease inhibitors, which upon excessive intake or improper technological processing can have a negative and even toxic effect on the human body. In the conditions of the growing demand for food products from plant raw materials, including legumes, there is a necessity to reduce risks associated with excessive intake of anti-nutrients. The aim of this work was to analyze studies carried out over the last five years that are dedicated to an assessment of the efficiency of the main methods for technological processing of legumes (soaking, thermal processing, sprouting and fermentation) to reduce the content of anti-nutrients. Also, the comparison of the obtained data was carried out to reveal the most effective methods. The results of the review prove the expediency of combination of several methods of legume treatment to reduce the content of anti-nutrients and increase the nutritional value of products from leguminous raw materials. Based on the analyzed data, the most efficient approach to legume processing was determined. This approach significantly reduces the main anti-nutrients in legumes. An effect of the key anti-nutrients on human health has been examined and the main problems of the food industry linked to legume fermentation have been analyzed.

1. Введение

Бобовые являются ценным источником растительного белка, клетчатки, витаминов и минералов, что делает их распространенным продуктом питания во многих странах мира. Обзор обобщает новейшие исследования в области переработки бобового сырья и соотносит их с промышленными и потребительскими потребностями, при этом особое внимание уделяется разработке технологий производства ферментированных бобовых продуктов с улучшенной функциональностью и пользой для здоровья [1,2].

Несмотря на то, что бобовые являются устойчивым источником белка, антипитательные вещества (АПВ), содержащиеся в них, ограничивают его биодоступность и усвояемость. Традиционные методы технологической переработки бобовых (такие как замачивание, термическая обработка) лишь частично удаляют АПВ, тогда как направленная ферментация предлагает более эффективную альтернативу, способствующую сохранению пищевой ценности [3–6]. Целенаправленный обзор исследований, проведенных в период 2021–2025 гг., подчеркивает прорывы в микробной селекции для ферментации

бобовых, оптимизации процесса и понимания механизма деградации АПВ, имеющих решающее значение для разработки новых продуктов на основе бобовых. Недавние исследования подтверждают, что такие бобовые, как фасоль, чечевица, нут, горох и соя, при регулярном потреблении благоприятно влияют на организм человека, улучшая обмен веществ и способствуя профилактике дефицита белка и заболеваний сердечно-сосудистой системы [7]. Так, ежедневное употребление нута снижает риски, связанные с ишемической болезнью сердца, а также положительное воздействие при диабете второго типа [8]. Ежедневное употребление чечевицы в течение 12 недель улучшает разнообразие микробиоты кишечника и уменьшает воспаление [9]. Регулярное употребление бобовых снижает риск развития рака органов пищеварения на 15 % [10].

Несмотря на вышеупомянутые преимущества для здоровья потребителей, бобовые содержат природные соединения, известные как АПВ, которые могут мешать усвоению питательных веществ, снижая их биодоступность и негативно влияя на процессы пищеварения [11].

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ким, А. А., Баланов, П. Е., Смотраева, И. В. (2025). Влияние ферментации бобовых на снижение антипитательного фактора. Обзор. *Пищевые системы*, 8(3), 401–406. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406>

FOR CITATION: Kim, A. A., Balanov, P. E., Smotraeva, I. V. (2025). Effect of legume fermentation on the reduction of the anti-nutritional factor. Review. *Food Systems*, 8(3), 401–406. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-3-401-406>

Основные АПВ в бобовых включают фитины или фитиновую кислоту, ингибиторы протеазы, танины, оксалаты и олигосахариды. Недавние исследования показывают, что в небольших количествах АПВ, содержащиеся в бобовых, могут оказывать благотворное воздействие на организм, если потреблять их в контролируемых количествах. Фитаты, танины и флавоноиды в бобовых действуют как мощные антиоксиданты, снижая окислительный стресс и воспаление; сапонины и флавоноиды в обработанном нуте и чечевице демонстрируют антипролиферативное действие против раковых клеток и помогают поддерживать иммунную функцию; олигосахариды действуют как пребиотики, способствуя поддержанию здоровой микробиоты; танины и сапонины помогают снизить уровень холестерина, связывая желчные кислоты и уменьшая всасывание липидов [2,3,5,6,12].

Однако чрезмерное потребление необработанных бобовых может снижать усвоение белка и приводить к дефициту биологически значимых элементов, таких как железо, цинк и кальций, а также вызывать дискомфорт в пищеварительной системе, включая вздутие живота и метеоризм [9,11].

АПВ, присутствующие в бобовых, могут быть токсичными при употреблении в больших количествах или без надлежащей обработки [13]. Ряд исследований показал, что лимская фасоль (*Phaseolus lunatus*) содержит линамарин, цианогенный гликозид, который при гидролизе выделяет цианистый водород. Дикие сорта лимской фасоли содержат 10–300 мг цианистого водорода в 100 г, в то время как одомашненные сорта содержат менее 10 мг/100 г. Линамарин может вызвать отравление цианидом, которое сопровождается головокружением, головной болью, рвотой и в крайних случаях может привести к летальному исходу [11–13]. Таким образом, существует необходимость в предварительной обработке бобового сырья для снижения АПВ.

Следующие научные данные подтверждают потенциальную токсичность основных антипитательных веществ, содержащихся в бобовых. Лектины или гемагглютинины доказали свою токсичность. Ингибиторы трипсина и химотрипсина блокируют пищеварительные ферменты, что приводит к гипертрофии поджелудочной железы. Кроме того, регулярное употребление сырых соевых бобов с высоким содержанием ингибиторов трипсина приводило к задержке роста у животных [14–18]. Обширные исследования выявили потенциальную токсичность АПВ, присутствующих в бобовых, при этом особое внимание уделялось лектинам и ингибиторам протеазы. Лектины проявили выраженные токсические эффекты в организме человека и животных. Эти связывающие углеводы белки могут противостоять перевариванию и связываться с эпителиальными клетками кишечника, вызывая повреждение слизистой оболочки кишечника и препятствуя усвоению питательных веществ [17]. В тяжелых случаях потребление лектинов было связано с поражениями кишечника, с нарушением иммунной функции и даже с системной токсичностью. Ингибиторы протеазы, особенно ингибиторы трипсина и химотрипсина, представляют еще одну серьезную проблему. Эти соединения блокируют активность пищеварительных ферментов в желудочно-кишечном тракте, что приводит к гипертрофии поджелудочной железы, поскольку орган пытается компенсировать это, вырабатывая дополнительные ферменты [18].

Регулярное потребление продуктов, богатых этими ингибиторами, включая сырые соевые бобы, вызывает значительную задержку роста, что было продемонстрировано в исследованиях на животных. Исследования показывают, что рацион с высоким содержанием сырых соевых бобов у животных приводит к снижению усвоения белка и задержке роста из-за нарушений переваривания белка и усвоения аминокислот. Антипитательные эффекты проявляются не только в нарушении переваривания белка. Например, фитиновая кислота прочно хелатирует некоторые макро- и микроэлементы, включая железо, цинк и кальций, образуя нерастворимые комплексы, которые плохо усваиваются в пищеварительном тракте [18]. Эта способность связывать минералы может привести к их дефициту, даже если количество минералов в рационе кажется достаточным. Кроме того, некоторые АПВ могут мешать метаболическим процессам; например, некоторые ингибиторы протеазы были вовлечены в нарушение нормальной функции поджелудочной железы через механизмы обратной связи, которые изменяют выработку ферментов.

Фитаты обладают сильной связывающей активностью по отношению к минералам, таким как железо, снижая его усвоение на 50–80%. Это оказывает существенное влияние на людей в развивающихся странах, где бобовые являются основной частью ежедневного рациона, поскольку потребление бобовых без надлежащей обработки способствует железодефицитной анемии [19].

Несколько исследований подтверждают, что потребление большого количества оксалатов увеличивает риск образования камней

в почках и препятствует усвоению кальция [20,21]. Известны случаи отравления сырыми бобами, когда употребление всего 4–5 сырых или недоваренных бобов вызвало сильную тошноту, рвоту, диарею и боли в животе из-за высокого содержания лектинов, а именно фитогемагглютинаина. Механизм этих эффектов связан со способностью лектинов связываться с клетками кишечника, нарушать усвоение питательных веществ и вызывать воспаление, приводящее к повреждению слизистой оболочки [22,23].

Фитиновая кислота, содержащаяся в значительных количествах в соевых бобах, чечевице, нуте и горохе, может образовывать связи с веществами (такими как железо, цинк, кальций и магний), снижая их биодоступность, в то время как ингибиторы трипсина и химотрипсина подавляют пищеварительные ферменты, ухудшая переваривание и всасывание белков [24,25]. Красная фасоль, соевые бобы и черная фасоль содержат антипитательные вещества, такие как лектины, которые могут вызывать тошноту, рвоту и диарею, если их употреблять в сыром виде или недоваренными, т. е. при приготовлении менее 10 минут [26]. Танины, присутствующие в цветных бобовых (например, в черной фасоли и чечевице), связываются с белками и биологически значимыми элементами, снижая усвояемость и всасывание питательных веществ, в то время как оксалаты связывают кальций, провоцируя образование камней в почках у предрасположенных к этому людей [5]. Олигосахариды раффинозы и стахиозы могут ферментировать кишечными бактериями, что приводит к образованию газов и вздутию живота, а сапонины могут вызывать горечь и влиять на усвоение питательных веществ [27].

Современные данные об эффективности процессов ферментации подчеркивают ключевую роль микробных ферментов во взаимодействии с АПВ растительного сырья. Исследователи предполагают, что микроорганизмы продуцируют фитазы и целлюлазы, которые гидролизуют фитиновую кислоту и олигосахариды [4,14]. Белки, являющиеся ингибиторами протеазы, также подвержены влиянию микробных ферментов, протеаз, гидролизуют белковые матрицы и улучшают питательные свойства субстратов [15]. В случае танинов исследования показывают, что некоторые микроорганизмы могут продуцировать ферменты эстеразы и значительно изменять концентрацию этих соединений [16].

Несколько исследований подтверждают, что необработанные бобовые с высоким содержанием АПВ отрицательно влияют на рост и развитие как человека, так и сельскохозяйственных животных [17,18]. Эти результаты подчеркивают необходимость осведомленности потребителей о содержании АПВ и внедрения эффективных методов обработки для смягчения их неблагоприятных последствий при сохранении пищевой ценности продуктов на основе бобовых.

2. Объекты и методы

Чтобы предоставить всесторонний обзор стратегий снижения АПВ, были проанализированы последние исследования и обзорные статьи за период с 2021 по 2025 год. Поиск проводился по нескольким научным базам данных, включая PubMed, Springer, PubChem и Google Scholar, чтобы обеспечить широкий охват рецензируемых исследований.

Публикации были отобраны с использованием целевых ключевых слов и их комбинаций, таких как: бобовые, антипитательные вещества, АПВ, фитаты, оксалаты, танины, сапонины, лектины, ингибиторы протеазы, ферментация бобовых, прорастание бобовых, проращивание бобовых, термическая обработка бобовых, не термическая обработка бобовых. Критерии включения были сосредоточены на последних достижениях в методах деградации АПВ, сравнительных исследованиях, оценивающих методы обработки и результаты в отношении питания, такие как биодоступность, усвояемость и влияние на здоровье.

3. Известные технологические подходы для снижения антипитательных свойств бобового сырья

Исследования подтверждают, что кипячение в течение 20–30 минут разрушает более 95% лектинов в черных бобах и чечевице [1]. Ферментация снижает количество фитатов на 60–80% [14]. Например, фитиновая кислота была снижена во время ферментации соевого молока *S. thermophilus*, *Lb. fermentum*, *Lb. plantarum*, *Lb. casei*, *Lb. bulgaricus* и *Lb. acidophilus* [28]. Автоклавирование бобовых при 121 °C в течение 15–20 минут снижает количество ингибиторов трипсина на 70–85%, но если за этим следует ферментация *Bacillus*, то это количество снижается до 90–95% [29]. Уменьшение олигосахаридов на 50–70% наблюдалось при предварительном замачивании со смесью воды с последующей варкой [30]. Также было подтверждено снижение содержания танинов после очистки бобовых с последующей ферментацией [31]. Уровень оксалатов снижается до 60–90% при приготовлении со смесью воды [32].

В Таблице 1 обобщены данные по недавним исследованиям, касающиеся различных типов обработки, снижающих АПВ в бобовых.

В Таблице 1 приведены сравнительные данные о влиянии наиболее распространенных методов обработки бобовых на содержание АПВ. В результате анализа информации было установлено, что основными направлениями в снижении содержания АПВ являются термическая обработка и ферментация. Сочетание этих методов позволяет снизить количество АПВ до 95 % и представляется одним из наиболее перспективных способов.

Также сравнительный анализ, представленный в Таблице 1, раскрывает важные сведения об оптимизированных методах обработки для снижения различных АПВ в бобовых, при этом каждый метод показывает различные уровни эффективности против определенных АПВ. Данные показывают, что для эффективного снижения содержания различных АПВ необходимы индивидуальные подходы к обработке, учитывающие их уникальные химические свойства и профили стабильности.

Лектины показывают наиболее резкое снижение (>95 %) при простом кипячении при температуре 100 °C в течение 10 минут, что подтверждено многочисленными исследованиями. Такая высокая эффективность достигается за счет того, что лектины являются термолабильными белками, которые полностью денатурируют при температурах кипения, теряя способность связывать углеводы и вызывать повреждение кишечника. Воспроизводимость этого результата для всех сортов бобовых делает кипячение одним из самых надежных методов дезактивации лектинов. Для сокращения количества фитатов лучшим подходом является ферментация, способствующая снижению содержания этого антинутриента на 60–80 %, особенно в традиционных продуктах, таких как темпе и натто. Микробные фитазы, образующиеся во время ферментации, значительно более эффективны для разрушения фитатных комплексов, чем растительные фитазы, активируемые во время замачивания [1]. Длительность времени ферментации обычно составляет 24–48 часов, что обеспечивает почти полный гидролиз молекул фитата, высвобождая связанные минералы, такие как железо и цинк.

Таблица 1 показывает исключительную эффективность, достигающую 90–95 % в отношении сокращения ингибиторов протеаз посредством комбинированного автоклавирования и ферментации *Bacillus* [30]. Особый интерес в данном случае представляет двухступенчатый механизм обработки — автоклавирование обеспечивает немедленную термическую денатурацию, в то время как последующая ферментация позволяет протеазам, полученным из *Bacillus*, дополнительно расщеплять термостойкие фракции ингибиторов. Этот комбинированный подход кажется более эффективным, чем любой из методов по отдельности.

Олигосахариды, такие как раффиноза, демонстрируют умеренное снижение в пределах 50–70 % посредством замачивания и кипячения, при этом особенно подчеркивается важность смены воды для замачи-

вания [31]. Этот двухэтапный процесс работает посредством диффузии через замачивание, которое способствует удалению водорастворимых олигосахаридов, а затем следует термическое расщепление оставшихся соединений. Умеренная эффективность связана с тем, что некоторые олигосахариды по своей природе устойчивы к расщеплению и могут потребовать ферментативной обработки для полного удаления.

Установлено, что концентрация танинов сокращается на 40–60 % в зависимости от метода обработки, при этом исследования указывают, что комбинированный подход с шелушением бобовых с последующей ферментацией дают наилучший результат [32]. Это объясняется тем, что танины концентрируются в оболочках семян, делая их физическое удаление эффективным, в то время как ферментация помогает разложить оставшиеся танины посредством микробной активности танназы. Сравнительно более низкая эффективность по сравнению с другими АПВ объясняется химической стабильностью танинов и их разнообразием в бобовых.

Оксалаты демонстрируют снижение концентрации в широком диапазоне 60–90 % при кипячении со сменной воды [33]. Разброс значений связан с видом бобовых и с исходным уровнем оксалатов: водорастворимые формы удаляются легко, тогда как комплексы кальция и оксалата требуют более интенсивной обработки. Эффективность значительно возрастает при многократной смене воды во время кипячения.

Анализ Таблицы 1 выявляет несколько важных закономерностей:

1. Термические методы наиболее эффективны для белковых АПВ (лектинов, ингибиторов протеазы);
2. Ферментация отлично справляется с деградацией АПВ на основе углеводов (фитатов, некоторых олигосахаридов);
3. Комбинированные физические и биологические методы часто превосходят отдельные подходы.

Полученные результаты имеют важное практическое значение как для домашней кулинарии, так и для промышленной переработки бобовых, указывая на то, что оптимизированные многоступенчатые подходы позволяют максимизировать питательную ценность и обеспечивать безопасность пищевых продуктов. Данные также подчеркивают, как традиционные методы обработки, разработанные эмпирически на протяжении столетий, теперь подтверждаются современным научным анализом. Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке гибридных последовательностей обработки, которые объединяют наиболее эффективные методы для всестороннего снижения содержания АПВ при сохранении питательной ценности.

4. Сравнение эффективности технологий снижения концентрации антипитательных веществ

В Таблице 2 сравниваются основные методы обработки бобовых, такие как замачивание, водно-тепловая обработка, ферментация и проращивание, с точки зрения влияния на снижение содержания АПВ.

Таблица 1. Наиболее эффективные методы переработки бобовых культур по отношению к основным АПВ

Table 1. The most efficient methods of legume processing with respect to the main anti-nutritional factors

Антинутриент	Метод технологической обработки	Эффективность	Ссылка
Лектины	Водно-термическая обработка при 100 °C, более 10 минут	> 95 %	[1]
Фитаты	Ферментация (натто, темпе)	60–80 %	[33]
Ингибиторы протеаз	Автоклавирование и ферментация с использованием <i>Bacillus</i>	90–95 %	[29]
Олигосахариды	Замачивание со сменной водой+ водно-термическая обработка	50–70 %	[30]
Таннины	Удаление семенной оболочки + ферментация	40–60 %	[31]
Оксалаты	Водно-термическая обработка + смена воды	60–90 %	[32]

Таблица 2. Сравнение влияния основных методов обработки бобовых на АПВ

Table 2. Comparison of the effect of the main methods of legume processing on the anti-nutrients

Антинутриент	Замачивание	Водно-термическая обработка	Ферментация	Проращивание	Ссылка
Лектины	Минимальный эффект	Высокая эффективность	Частичное сокращение	Минимальный эффект	[2,12,34,35]
Фитаты (фитиновая кислота)	Сокращение на 20–50 % при замачивании более 12 часов	Частичное сокращение	Высокая эффективность	Сокращение на 30–60 %	[4, 36–38]
Ингибиторы протеаз	Минимальный эффект	Высокая эффективность	Высокая эффективность	Частичное сокращение	[23,39]
Таннины	Сокращение на 30–50 % при замачивании со сменной воды	Частичное сокращение	Частичное сокращение	Сокращение на 40–60 %	[36,37,40]
Олигосахариды (раффиноза и стахиоза)	Сокращение на 30–50 % при замачивании со сливом воды	Частичное сокращение	Высокая эффективность	Сокращение на 50–70 %	[41,42]
Оксалаты	Сокращение на 10–30 %	Сокращение на 30–90 %	Минимальный эффект	Частичное сокращение	[4,40,43]
Сапонины	Частичное сокращение при промывке и удалении пены при водно-термической обработке	Частичное сокращение	Минимальный эффект	Частичное сокращение	[1,3,44]
Цианогенные гликозиды	Частичное сокращение цианидов	Полное устранение цианидов	Частичное сокращение	Минимальный эффект	[34,45,46]

В проанализированных литературных источниках раскрываются различные закономерности эффективности различных методов обработки бобовых для снижения количества АПВ, причем каждый метод демонстрирует уникальные преимущества в зависимости от целевого соединения и желаемых результатов в плане питания. Методы термической обработки, в частности кипячение и автоклавирование, демонстрируют высокую эффективность против термолabile АПВ. Так, было подтверждено, что кипячение чечевицы при 100 °C в течение 30 минут обеспечивает почти полное устранение ингибиторов трипсина (снижение на 90–95 %) при сохранении примерно 80 % термостабильных питательных веществ [2]. Этот метод оказывается особенно ценным для инактивации лектинов и ингибиторов протеазы, поскольку денатурация этих белковых соединений происходит быстро при высоких температурах. Однако длительное время кипячения может поставить под угрозу чувствительные к теплу биоактивные соединения, например, флавоноиды. Исследование термической обработки нута показало 15–20 % потерь этих полезных фитохимических веществ после длительной термической обработки [3].

Ферментация выступает в качестве превосходного биологического подхода к решению проблемы АПВ на основе углеводов, предлагая множество преимуществ по сравнению с чисто физическими методами. Исследования указывают, что традиционные процессы ферментации могут снизить содержание фитатов на 60–80 % за счет активности микробной флоры, значительно улучшая биодоступность макро и микроэлементов [1]. Микробная трансформация во время ферментации не только разрушает АПВ, но и часто повышает пищевую ценность. Например, на 30 % повышается усвояемость белка и образуются биоактивные пептиды [40]. Для целенаправленного снижения содержания АПВ можно выбрать определенные микробные штаммы, при этом молочнокислые бактерии особенно эффективны против олигосахаридов, а некоторые грибы преуспевают в деградации танинов [41].

Замачивание и проращивание представляют собой промежуточные этапы обработки, которые обеспечивают частичное сокращение АПВ при сохранении питательных качеств. В исследовании убедительно продемонстрировано, что комбинированные протоколы проращивания-ферментации могут достигать синергетических эффектов, при этом проращивание активирует эндогенные ферменты, которые делают АПВ более восприимчивыми к последующей микробной деградации [47].

Исследователи из Автономного Университета Мадрида (AUM) [42] обнаружили, что простое замачивание с удалением воды достигало 50–70 % сокращения раффинозы и сахарозы, в то же время исследователи из Университета сельского хозяйства и технологий в Найроби [43] показали, что растворы для замачивания, усиленные солью, могут дополнительно повысить эту эффективность. Однако исследователи из Чжэцзянского океанического университета [34] предупреждают, что одного замачивания недостаточно для сокращения определенных АПВ, таких как оксалаты, где без последующей термической обработки происходит только 30–40 % сокращение их концентрации.

Сравнительный анализ Таблицы 2 раскрывает несколько ключевых идей об оптимальных стратегиях обработки.

При выборе метода обработки нужно стремиться не только к снижению содержания АПВ, но и к сохранению питательных компонентов и флавоноидов [3]. Современные представления об эффективности процессов ферментации указывают на решающую роль микробных ферментов во взаимодействии с АПВ растительного сырья. Исследователи предполагают, что микроорганизмы продуцируют фитазы и целлюлазы, гидролизующие фитиновую кислоту и олигосахариды.

Белки, являющиеся ингибиторами протеаз, также подвержены влиянию микробных ферментов, особенно интенсивны в этом направлении молочнокислые бактерии [15,47,48]. Известен также метод введения очищенных протеолитических ферментов для индуцированного гидролиза этих соединений [49,50,51]. Кроме того, повышается пищевая ценность частично гидролизованных бобовых белков.

В случае с дубильными веществами исследования указывают на то, что некоторые микроорганизмы могут продуцировать ферменты эстеразы и существенно изменять концентрацию этих соединений [52].

Отдельным малоизученным фактором является использование комбинаций микроорганизмов для ферментации, так как это может вызывать синергические эффекты, более выраженные, чем при использовании монокультур [53]. Спонтанная ферментация с использованием комбинаций микроорганизмов традиционно применялась для производства многих бобовых пищевых продуктов [51], но промышленные решения требуют целенаправленного изучения взаимного влияния микробных групп и субстратов, с которыми они взаимодействуют.

Данные в Таблице 2 показывают, что конкретные группы АПВ могут по-разному подвергаться воздействию термических и ферментативных факторов. Лектины и оксалаты легче всего разрушаются при воздействии высокой температуры. Фитаты и олигосахариды инактивируются и гидролизуются при ферментации. Ингибиторы протеазы и цианогенные гликозиды снижают активность при кипячении и ферментации. Сапонины и танины наиболее устойчивы к внешнему воздействию.

Также результаты исследований указывают на то, что обработка ультразвуком значительно повышает эффективность обработки и питательные качества желтого гороха за счет сокращения времени замачивания, снижения содержания фитиновой кислоты и улучшения усвояемости белка [54]. Применение ультразвуковой технологии ускоряет поглощение воды во время замачивания, сокращая обычное время обработки, при этом эффективно разрушая антипитательные факторы, в частности фитиновую кислоту, которая подавляет усвоение минералов. Кроме того, механическое воздействие ультразвука разрушает матрицу гороха, улучшая доступность и усвояемость белка, что делает ультразвук перспективным методом предварительной обработки для переработки бобовых.

Эти результаты подчеркивают потенциал ультразвука как устойчивого, не термического метода обработки, который может улучшить пищевой профиль растительных белков, сохраняя при этом эффективность производства продуктов питания. Будущие исследования должны изучить масштабируемость этого метода в промышленных условиях, его влияние на другие антипитательные соединения и его влияние на сенсорные и функциональные свойства продуктов, полученных из бобового сырья. Благодаря оптимизации параметров ультразвука эта технология может сыграть ключевую роль в продвижении использования бобовых в высокобелковых пищевых продуктах, способствуя более устойчивым и питательным растительным диетам.

5. Заключение

Гидротермическое воздействие и ферментация оказывают положительный эффект на устранение АПВ и сохранение питательной ценности, делая бобовые более пригодными для промышленного применения и создания инновационных продуктов питания. Ферментация улучшает сенсорные и функциональные свойства продуктов на основе бобовых и повышает биодоступность железа, цинка и белка, способствует образованию полезных метаболитов, таких как короткоцепочечные жирные кислоты, посредством микробной активности.

Ферментация оказывает наиболее существенное влияние на снижение содержания фитатов и ингибиторов протеазы.

Для максимального эффекта целесообразно сочетание нескольких методов технологической обработки бобовых перед употреблением, таких как замачивание, автоклавирование, или обычная водно-термическая обработка с удалением воды и пены и последующей ферментацией продукта. Такой подход позволит минимизировать содержание АПВ.

Результаты этого обзора подчеркивают преобразующий потенциал ферментации в оптимизации продуктов на основе бобовых. Это соответствует растущему спросу на функциональные продукты из растительного сырья, поддерживающие здоровье кишечника, метаболические функции и способствующие профилактике хронических заболеваний.

Проблемы, связанные с ферментацией бобовых, включают необходимость изучения синергетических эффектов ферментации с использованием нескольких штаммов микроорганизмов и генетического отбора микроорганизмов для усиления деградации АПВ. Кроме того, требуются долгосрочные исследования для подтверждения влияния ферментированных бобовых на здоровье человека, в частности на микробиоту кишечника и показатели хронических заболеваний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Kahala, M., Mäkinen, S., Pihlanto, A. (2021). Impact of fermentation on antinutritional factors. Chapter in a book: Bioactive Compounds in Fermented Foods. CRC Press, 2021. <https://doi.org/10.1201/9780429027413-10>
- Gandhi, H., Toor, B. S., Kaur, A., Kaur, J. (2022). Effect of processing treatments on physicochemical, functional, and thermal characteristics of lentils (*Lens culinaris*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(6), 4603–4614. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01549-1>
- Milán-Noris, A. K., Gutierrez-Urbe, J. A., Serna-Saldivar, S. O. (2023). Influence of soaking and boiling on flavonoids and saponins of nine desi chickpea cultivars with potential antiproliferative effects. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3473–3481. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01861-4>
- Anaemene, D., Fadupin, G. (2022). Anti-nutrient reduction and nutrient retention capacity of fermentation, germination, and combined germination-fermentation in legume processing. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100059. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100059>
- Ojo M. A. (2022). Tannins in foods: Nutritional implications and processing effects of hydrothermal techniques on underutilized hard-to-cook legume seeds — a review. *Preventive Nutrition and Food Science*, 27(1), 14–19. <https://doi.org/10.3746/pnf.2022.27.1.14>
- Badjona, A., Bradshaw, R., Millman, C., Howarth, M., Dubey, B. (2023). Faba bean processing: Thermal and non-thermal processing on chemical, antinutritional factors, and pharmacological properties. *Molecules*, 28(14), Article 5431. <https://doi.org/10.3390/molecules28145431>
- Zheng, Q., Wang, F., Nie, C., Zhang, K., Sun, Y., AL-Ansi, W. et al (2024). Elevating the significance of legume intake: A novel strategy to counter aging-related mitochondrial dysfunction and physical decline. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(5), Article 13342. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13342>
- Tan, Y., Tam, C. C., Meng, S., Zhang, Y., Alves, P., Yokoyama, W. (2021). Cooked black turtle beans ameliorate insulin resistance and restore gut microbiota in C57BL/6J mice on high-fat diets. *Foods*, 10(8), Article 1691. <https://doi.org/10.3390/foods10081691>
- Patel, L., La Vecchia, C., Negri, E., Mignozzi, S., Augustin, L. S., Levi, F. et al (2024). Legume intake and cancer risk in a network of case-control studies. *European Journal of Clinical Nutrition*, 78(5), 391–400. <https://doi.org/10.12103/rs.3.rs-2398023/v1>
- Chamberlin, M. L., Wilson, S. M. G., Gaston, M. E., Kuo, W. -Y., Miles, M. P. (2024). Twelve weeks of daily lentil consumption improves fasting cholesterol and postprandial glucose and inflammatory responses — A randomized clinical trial. *Nutrients*, 16(3), Article 419. <https://doi.org/10.3390/nu16030419>
- Sharma, N., Sahu, J. K., Joshi, S., Khubber, S., Bansal, V., Bhardwaj, A. et al. Bal, L. M. (2022). Modulation of lentil antinutritional properties using non-thermal mediated processing techniques — A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 109, Article 104498. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104498>
- Adamcová A., Laursen K. H., Ballin N. Z. (2021). Lectin activity in commonly consumed plant-based foods: Calling for method harmonization and risk assessment. *Foods*, 10(11), Article 2796. <https://doi.org/10.3390/foods10112796>
- Dangi, P., Chaudhary, N., Gajwani, D., Neha (2021). Antinutritional factors in legumes. Chapter in a book: Handbook of Cereals, Pulses, Roots, and Tubers. CRC Press, 2021.
- Sun, X., Ma, L., Xuan, Y., Liang, J. (2024). Degradation of anti-nutritional factors in maize gluten feed by fermentation with *Bacillus subtilis*: A focused study on optimizing fermentation conditions. *Fermentation*, 10(11), Article 555. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110555>
- Christensen, L. F., García-Béjar, B., Bang-Berthelsen, C. H., Hansen, E. B. (2022). Extracellular microbial proteases with specificity for plant proteins in food fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 381, Article 109889. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109889>
- Gautam, G., Gänzle, M. G. (2023). Conversion of (poly)phenolic compounds in food fermentations by lactic acid bacteria: Novel insights into metabolic pathways and functional metabolites. *Current Research in Food Science*, 6, Article 100448. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2023.100448>
- Abu Hafsa S. H., Hassan, A. A., Elghandour, M. M. M. Y., Barbabosa-Pliego, A., Mellado, M., Salem, A. Z. M. (2022). Dietary anti-nutritional factors and their roles in livestock nutrition. Chapter in a book: Sustainable Agriculture Reviews. Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07496-7_4
- Kumar, A., Dash, G. K., Sahoo, S. K., Lal, M. K., Sahoo, U., Sah, R. P. et al. (2023). Phytic acid: A reservoir of phosphorus in seeds plays a dynamic role in plant and animal metabolism. *Phytochemistry Reviews*, 22(5), 1281–1304. <https://doi.org/10.1007/s11101-023-09868-x>
- Marcos-Méndez D. A., Canseco-Nava, H., Oliart-Ros, R. M., Ramírez-Higuera, A. (2021). Presence of antinutritional factors in legumes. *Journal of Innovative Engineering / Revista de Ingeniería Innovativa*, 5(17), 6–13. <https://doi.org/10.35429/JOIE.2021.17.5.6.13>
- Avila-Nava, A., Medina-Vera, I., Rodríguez-Hernández, P., Guevara-Cruz, M., Canton, P. K. H. G., Tovar, A. R. et al. (2021). Oxalate content and antioxidant activity of different ethnic foods. *Journal of Renal Nutrition*, 31(1), 73–79. <https://doi.org/10.1053/j.jrn.2020.04.006>
- Salgado, N., Silva, M. A., Figueira, M. E., Costa, H. S., Albuquerque, T. G. (2023). Oxalate in foods: Extraction conditions, analytical methods, occurrence, and health implications. *Foods*, 12(17), Article 3201. <https://doi.org/10.3390/foods12173201>
- Boschin, G., Tesio, E., Arnoldi, A. (2022). A field case of pig poisoning by accidental feed contamination by alkaloid-rich lupin seeds. *Journal of Applied Animal Research*, 50(1), 725–731. <https://doi.org/10.1080/09712119.2022.2147181>
- Das, G., Sharma, A., Sarkar, P. K. (2022). Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes. *Applied Food Research*, 2(1), Article 100112. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100112>
- Blout, A. P. M., Kalschne, D. L., Amaral, J. A. S., Baraldi, I. J., Canan, C. (2021). A review of phytic acid sources, obtention, and applications. *Food Reviews International*, 39(1), 73–92. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1906697>
- Fu, Z., Akula, S., Thorpe, M., Hellman, L. (2021). Marked difference in efficiency of the digestive enzymes pepsin, trypsin, chymotrypsin, and pancreatic elastase to cleave tightly folded proteins. *Biological Chemistry*, 402(7), 861–867. <https://doi.org/10.1515/hsz-2020-0386>
- Chauhan, D., Kumar, K., Ahmed, N., Thakur, P., Rizvi, Q. U. E. H., Jan, S. et al. (2022). Impact of soaking, germination, fermentation, and roasting treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive composition of black soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 10(5), 186–192. <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i4a3313>
- Zhu, X., Liu, J., Yang, G. (2021). Effects of soybean oligosaccharide, stachyose, and raffinose on growth performance and cecal microbiota in broiler chickens. *Animal Science Journal*, 92(1), Article e13668. <https://doi.org/10.1111/asj.13668>
- Emkani, M., Oliete, B., Saurel, R. (2022). Effect of lactic acid fermentation on legume protein properties, a review. *Fermentation*, 8(6), Article 244. <https://doi.org/10.3390/fermentation8060244>
- Cao, Y., Xu, M., Lu, J., Cai, G. (2023). Simultaneous microbial fermentation and enzymolysis: A biotechnology strategy to improve the nutritional and functional quality of soybean meal. *Food Reviews International*, 40(5), 1296–1311. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2212048>
- Pedrosa, M. M., Guillaumon, E., Arribas, C. (2021). Autoclaved and extruded legumes as a source of bioactive phytochemicals: A review. *Foods*, 10(2), Article 379. <https://doi.org/10.3390/foods10020379>
- Chisowa, D. M. (2022). Comparative evaluation of the effect of boiling and autoclaving of legume grains on tannin concentration. *Magna Scientia Advanced Biology and Pharmacy*, 7(1), 009–017. <https://doi.org/10.30574/msabp.2022.7.1.0080>
- Ghanati, K., Oskoei, V., Rezvani-Ghalhari, M., Shavali-Gilani, P., Mirzaei, G., Sadighara, P. (2024). Oxalate in plants, amount, and methods to reduce exposure, a systematic review. *Toxin Reviews*, 43(3), 411–422. <https://doi.org/10.1080/15569543.2024.2344493>
- Sun, X., Ma, L., Xuan, Y., Liang, J. (2024). Degradation of anti-nutritional factors in maize gluten feed by fermentation with *Bacillus subtilis*: A focused study on optimizing fermentation conditions. *Fermentation*, 10(11), Article 555. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110555>
- Ampofo, J., Abbey, L. (2023). Sprouted legumes: Biochemical changes, nutritional impacts, and food safety concerns. Chapter in a book: Advances in Plant Sprouts. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40916-5_7
- Manzoor, M., Singh, D., Aseri, G. K., Sohail, J. S., Vij, S., Sharma, D. (2021). Role of lacto-fermentation in reduction of antinutrients in plant-based foods. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 9(3), 7–16. <https://doi.org/10.7324/JABB.2021.9302>
- Nagessa, W. B., Chambal, B., Macuamule, C. (2023). Effects of processing methods on phytate and tannin content of black small common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivated in Mozambique. *Cogent Food and Agriculture*, 9(2), Article 2289715. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2289715>
- Elliott, H., Woods, P., Green, B. D., Nugent, A. P. (2022). Can sprouting reduce phytate and improve the nutritional composition and nutrient bioaccessibility in cereals and legumes. *Nutrition Bulletin*, 47(2), 138–156. <https://doi.org/10.1111/mbu.12549>
- Ghaffar, F., Mehmood, Z., Khurshid, H., Sana, R. (2025). Influence of wet processing techniques (soaking, boiling, and pressure cooking) on phytic acid reduction, mineral retention, and solubility in common beans *Phaseolus Vulgaris* L, *Vigna Unguiculata*, *Vigna Radiata*, and *Cicer Arietinum* L. *Indus Journal of Bioscience Research*, 3(4), 782–793. <https://doi.org/10.70749/ijbr.v3i4.1168>
- Arbab Sakandar, H., Chen, Y., Peng, C., Chen, X., Imran, M., Zhang, H. (2023). Impact of fermentation on antinutritional factors and protein degradation of legume seeds: A review. *Food Reviews International*, 39(5), 1227–1249. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1951300>
- Jeyakumar, E., Lawrence, R. (2022). Microbial fermentation for reduction of antinutritional factors. Chapter in a book: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Elsevier, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823506-5.00012-6>
- Tasneem, F., Shradha, S., Arunraj, R., (2025). Traditional methods of soaking or sprouting pulses reduce the flatulence causing raffinose family alpha-galactosidase in regularly used nutritious edible legumes. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 24(3), 253–257. <https://doi.org/10.56042/ijtk.v24i3.11017>
- Kitum, V. C., Kinyanjui, P. K., Mathara, J. M., Sila, D. N. (2022). Oligosaccharide and antinutrient content of whole red haricot bean fermented in salt-sugar and salt-only solutions. *Legume Science*, 4(2), Article e110. <https://doi.org/10.1002/leg3.110>
- Huynh, N. K., Nguyen, D. H., Nguyen, H. V. (2022). Effects of processing on oxalate contents in plant foods: A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 112, Article 104685. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104685>
- Mustafa, A. M., Abouelenen, D., Acaticci, L., Alessandrini, L., Angeloni, S., Borsetta, G. et al. (2022). Polyphenols, saponins and phytosterols in lentils and their health benefits: An overview. *Pharmaceuticals*, 15(10), Article 1225. <https://doi.org/10.3390/ph15101225>
- Ramli, N. A. M., Chen, Y. H., Zin, Z. M., Abdullah, M. A. A., Rusli, N. D., Zainol, M. K. (March 9, 2021). Effect of soaking time and fermentation on the nutrient and antinutrients composition of *Canavalia ensiformis* (Kacang Koro). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 3rd Asia Pacific Regional Conference on Food Security (ARCoFS2021), Kelantan, Malaysia. IOP Publishing Ltd, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/756/1/012033>
- Anjum, N., Sheikh, M. A., Saini, C. S., Hameed, F., Sharma, H. K., Bhat, A. (2022). Cyanogenic glycosides. Chapter in a book: Handbook of plant and animal toxins in food. CRC Press, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003178446>
- Adamcová, A., Laursen, K. H., Ballin, N. Z., (2021). Lectin activity in commonly consumed plant-based foods: Calling for method harmonization and risk assessment. *Foods*, 10(11), Article 2796. <https://doi.org/10.3390/foods10112796>
- Du, Q., Li, H., Tu, M., Wu, Z., Zhang, T., Liu, J. et al. (2024). Legume protein fermented by lactic acid bacteria: Specific enzymatic hydrolysis, protein

composition, structure, and functional properties. *Colloids and Surfaces B: Bio-interfaces*, 238, Article 113929. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2024.113929>

49. Manus, J., Millette, M., Uscanga, B. R. A., Salmieri, S., Maherani, B., Lacroix, M. (2021). In vitro protein digestibility and physico-chemical properties of lactic acid bacteria fermented beverages enriched with plant proteins. *Journal of Food Science*, 86(9), 4172–4182. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15859>

50. Verni, M., Demarinis, C., Rizzello, C. G., Baruzzi, F. (2020). Design and characterization of a novel fermented beverage from lentil grains. *Foods*, 9(7), Article 893. <https://doi.org/10.3390/foods9070893>

51. Verni, M., Pontonio, E., Montemurro, M., Giuseppe Rizzello, C. (2022). Fermentation as strategy for improving nutritional, functional, technological, and sensory properties of legumes. Chapter in a book: *Legumes Research-Volume 2*. IntechOpen, 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102523>

52. Gaur, G., Gänzle, M. G. (2023). Conversion of (poly)phenolic compounds in food fermentations by lactic acid bacteria: Novel insights into metabolic pathways and functional metabolites. *Current Research in Food Science*, 6, Article 100448, <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100448>

53. Garrido-Galand, S., Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., Andrés, A. (2021). The potential of fermentation on nutritional and technological improvement of cereal and legume flours: A review. *Food Research International*, 145, Article 110398. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110398>

54. Tawalbeh, D., Ahmad, W. W., Sarbon, N. M. (2023). Effect of ultrasound pretreatment on the functional and bioactive properties of legumes protein hydrolysates and peptides: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 39(8), 5423–5445. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2069258>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Ким Анастасия Абдумаликовна — аспирант, инженер, Факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: kim-anastasia@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7493-1755 * автор для контактов	Anastasia A. Kim , Graduate Student, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: kim-anastasia@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7493-1755 * corresponding author
Баланов Петр Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент, Факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: balanov@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0610-9248	Petr E. Balanov , Candidate of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnologies, ITMO University 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: balanov@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0610-9248
Смотряева Ирина Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Факультет биотехнологий, Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, 49 E-mail: smotraeva@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1255-832X	Irina V. Smotraeva , Candidate of Technical Sciences, Docent, Faculty of Biotechnologies, ITMO University, 49, Kronverksky Ave, Saint Petersburg, 197101, Russia E-mail: smotraeva@itmo.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1255-832X
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.