

Оптимизация параметров экструзии ячменных снеков с добавлением чечевицы и тыквы

Фролов Д.И., Бирюков Д.А.

Аннотация. В статье представлены результаты оптимизации процесса получения многокомпонентных снеков на основе ячменной муки с добавлением чечевицы и тыквы методом экструзии. С применением методологии поверхности отклика исследовано влияние состава сырья (50–90 % ячменя), влажности (13–21 %) и температуры (115–155 °С) на физико-химические и органолептические показатели готового продукта. Установлено, что оптимальные характеристики экструдатов (минимальная насыпная плотность и твердость при максимальном радиальном расширении) достигаются при соотношении компонентов ячмень/чечевица/тыква 80:12,5:7,5 %, влажности смеси 15 % и температуре обработки 125 °С. Полученный функциональный продукт характеризуется сбалансированным составом и высокими потребительскими свойствами, что подтверждает эффективность использования растительных добавок для повышения пищевой ценности зерновых экструдатов.

Ключевые слова: ячмень, чечевица, тыква, экструзия, оптимизация процесса, методология поверхности отклика, функциональные продукты питания, физико-химические показатели качества, обогащенные снеки.

Для цитирования: Фролов Д.И., Бирюков Д.А. Оптимизация параметров экструзии ячменных снеков с добавлением чечевицы и тыквы // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 2. С. 90–95.

Optimization of extrusion parameters for barley snacks with lentils and pumpkin

Frolov D.I., Biryukov D.A.

Abstract. This article presents the results of optimizing the extrusion process for producing multi-component snacks based on barley flour with added lentils and pumpkin. Using response surface methodology, the influence of raw material composition (50–90% barley), moisture content (13–21%), and temperature (115–155°C) on the physicochemical and organoleptic properties of the finished product was studied. It was found that optimal extrudate characteristics (minimum bulk density and hardness at maximum radial expansion) are achieved with a barley/lentil/pumpkin ratio of 80:12.5:7.5%, a mixture moisture content of 15%, and a processing temperature of 125°C. The resulting functional product is characterized by a balanced composition and high consumer properties, confirming the effectiveness of using plant-based additives to enhance the nutritional value of grain extrudates.

Keywords: barley, lentils, pumpkin, extrusion, process optimization, response surface methodology, functional foods, physicochemical quality indicators, fortified snacks.

For citation: Frolov D.I., Biryukov D.A. Optimization of extrusion parameters for barley snacks with lentils and pumpkin. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 2. pp. 90–95. (In Russ.).

Введение

В современной индустрии питания производство снековой продукции занимает значительную долю рынка, однако большинство традиционных изделий характеризуется высоким содержанием углеводов при низком уровне биологически активных веществ [1, 2]. Расширение ассортимента функ-

циональных продуктов питания за счет включения в состав зерновых основ зернобобовых культур и овощных добавок является актуальной задачей пищевых технологий [3].

Потребление цельнозерновых продуктов, фруктов и овощей способствует снижению риска хронических заболеваний и общему укреплению здоровья благодаря наличию антиоксидантов, спо-

Таблица 1 - Сравнение предсказанных и фактических значений показателей качества оптимизированного экструдата

Показатель	Предсказанное значение	Фактическое значение	Отклонение, %
Удельная механическая энергия, Вт·ч/кг	277,67	281,71	3,48
Объемная плотность, г/см ³	0,041	0,04	2,43
Водопоглощательная способность (WAI), г/г	5,6	5,55	0,89
Индекс водорастворимости (WSI), %	0,15	0,15	0
Радиальное расширение, %	70,21	70,8	0,83
Прочность на излом (твердость), Н	187,96	181,41	3,48

собствующих нейтрализации свободных радикалов и стимулирующих защитные ферментативные процессы в организме [4, 5]. Ячмень занимает четвертое место в мире по объемам производства среди зерновых культур и обладает высокой пищевой ценностью [6]. Он содержит значительное количество клетчатки, умеренное количество белков, кальция и фосфора, а также витамины группы В.

Наличие в ячмене бета-глюкана способствует снижению уровня холестерина в крови, что делает его незаменимым компонентом в диетотерапии сердечно-сосудистых заболеваний [7, 8]. Однако для создания нутриентно сбалансированного продукта ячменную основу целесообразно комбинировать с компонентами, богатыми незаменимыми аминокислотами и микронутриентами. Чечевица является одной из старейших возделываемых культур и характеризуется высоким содержанием белка (24–32 %), минеральных веществ (железо, кобальт, йод) и витаминов (лизин, аргинин) [9].

Белки бобовых эффективно дополняют аминокислотный профиль злаков, что позволяет решать проблему белково-калорийной недостаточности [10]. В качестве витаминизирующей добавки перспективно использование тыквы, богатой каротином, минералами и пищевыми волокнами. Бета-каротин, содержащийся в мякоти тыквы, является основным источником витамина А и играет ключевую роль в профилактике различных инфекционных и системных заболеваний.

Метод одношнековой экструзии является эффективным способом получения готовых к употре-

блению продуктов, обеспечивая глубокую деструкцию крахмала, инактивацию антипитательных факторов и формирование пористой структуры изделия [11]. Физико-химические свойства экструдатов зависят от множества факторов, включая рецептурный состав смеси, влажность сырья и температурные режимы обработки.

Целью данной работы является оптимизация параметров процесса одношнековой экструзии многокомпонентных ячменных смесей с добавлением чечевицы и тыквы для получения продукта с высокими физико-химическими и потребительскими характеристиками.

Объекты и методы исследования

В качестве основного сырья для проведения исследований использовали зерно ячменя сорта «Московский 86» (урожай 2023 года, Московская область), соответствующее требованиям ГОСТ 50394-2011 по показателям чистоты и качества. Белковым обогатителем служила красная чечевица сорта «Петровская» (Саратовская область), отвечающая нормам ГОСТ 7066-77. Для повышения содержания микронутриентов и каротиноидов применяли тыкву сорта «Волжская серая 92», отобранную по критериям биологической зрелости и отсутствия повреждений.

Подготовка сырья включала очистку зерновых компонентов от примесей и последующее измельчение на лабораторной мельнице. Ячмень измельчали до размера частиц 0,8 мм, чечевицу – до 0,5

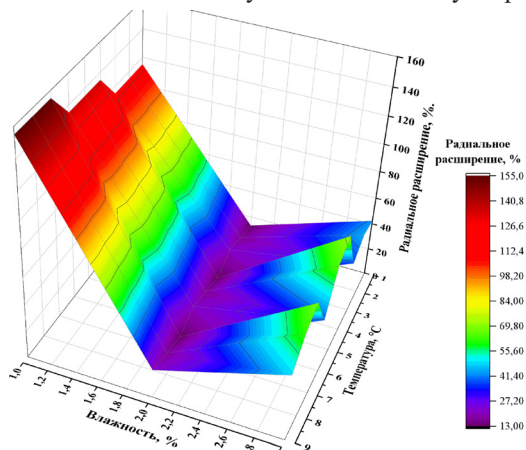


Рис. 1. Поверхность отклика зависимости индекса радиального расширения от температуры матрицы и влажности смеси

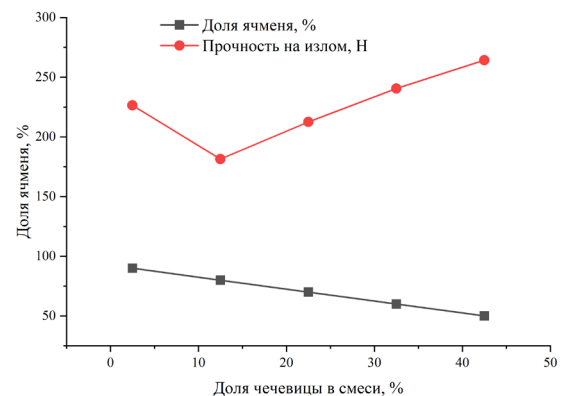


Рис. 2. Влияние рецептурного состава (соотношения ячменной и чечевичной муки) на прочность экструдированных снеков

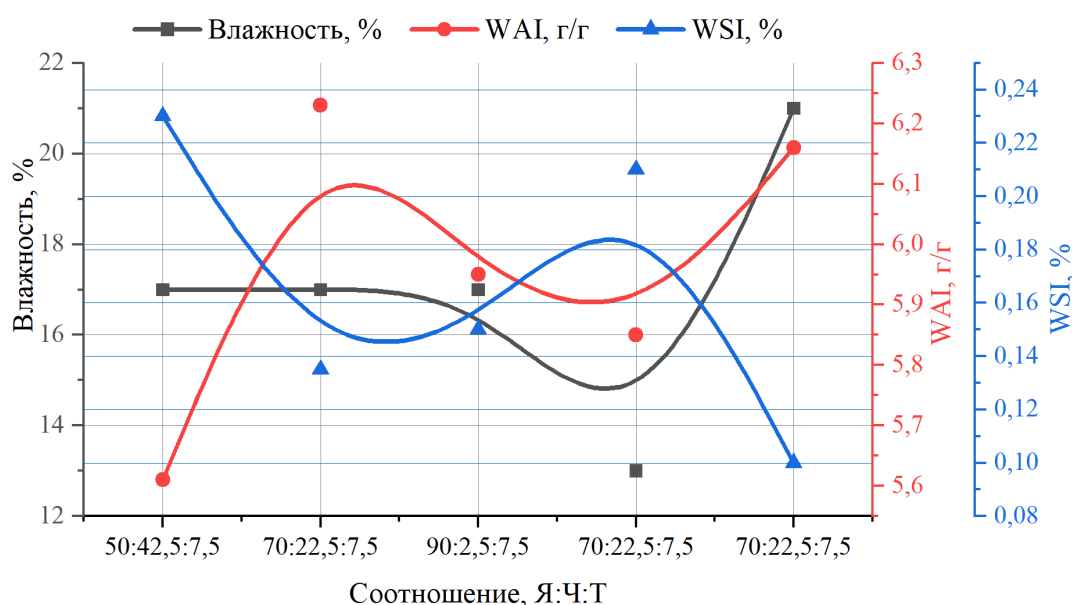


Рис. 3. Динамика WAI и WSI при изменении состава

мм. Мякоть тыквы предварительно подготавливали путем сушки при температуре 60 °С до достижения остаточной влажности 8–10 %, после чего измельчали до размера частиц 0,5 мм. Полученную муку просеивали через сито с размером ячеек 200 мкм для обеспечения однородности рецептурной смеси.

Приготовление экструзионных смесей осуществлялось путем смешивания компонентов в различных пропорциях согласно плану эксперимента. Содержание тыквенного порошка во всех вариантах оставалось неизменным и составляло 7,5 %, в то время как доля ячменной муки варьировалась от 50 до 90 %, а чечевичной – от 2,5 до 42,5 %. Влажность готовых смесей перед обработкой доводили до значений от 13 до 21 % в соответствии с центральным композиционным ротабельным планом.

Процесс экструзии проводили на лабораторном одношнековом экструдере, оснащенный системой регулирования температуры по зонам. Температурные режимы в первых трех зонах поддерживались на уровнях 30, 60 и 90 °С соответственно, тогда как температура в четвертой зоне (матрице) варьировалась в диапазоне от 115 до 155 °С. Диаметр фильеры матрицы составлял 2,5 мм при соотношении длины к диаметру шнека (L/D) 16:1.

Физико-химические показатели сырья и готовых экструдатов определяли по стандартным методикам: влажность по ГОСТ 3626-73, содержание белка по методу Кьельдаля (ГОСТ 10846-91), жира – по ГОСТ 13496.15-97, клетчатки – по ГОСТ 31640-2012 и золы – по ГОСТ 26312.7-88. Специфические свойства экструдатов, такие как объемная плотность, радиальное расширение, водопоглотительная способность (WAI) и индекс водорастворимости (WSI), анализировали по стандартным методам. Измерение твердости (прочности на излом) проводили на текстурном анализаторе с использованием датчика нагрузки.

Органолептическую оценку качества проводили

ла экспертная группа из 10 человек по 5-балльной шкале, оценивая внешний вид, текстуру, аромат и общую приемлемость продукта. Математическую обработку данных и оптимизацию параметров проводили с использованием методов регрессионного анализа и методологии поверхности отклика в программном пакете OriginPro. Уровень значимости для всех статистических тестов был принят $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Варьирование соотношения ячменной, чечевичной и тыквенной муки (Я:Ч:Т) оказало значительное влияние на физико-химические и органолептические свойства готовых снеков. С увеличением доли ячменной муки в смеси (до 90 %) наблюдалось статистически значимое снижение объемной плотности экструдата ($p < 0,05$), что связано с более высокой эластичностью ячменного крахмала по сравнению с белками чечевички и клетчаткой тыквы. Добавление чечевичной муки приводило к закономерному повышению водопоглотительной способности (ВПС) и индекса растворимости в воде (ИРВ) (табл.1). Это обусловлено высоким содержанием в чечевичке растительных белков и растворимых пищевых волокон, обладающих выраженной способностью удерживать влагу и формировать пористую структуру. Текстуальный анализ показал, что образцы с более высоким содержанием тыквенной муки отличались меньшей твердостью, что может быть связано с пластифицирующим действием пектиновых веществ тыквы, способствующих размягчению крахмальной матрицы.

Влажность исходного сырья выступила критическим фактором, определяющим плотность и прочность изделий. Повышение влажности смеси с 13 % до 21 % приводило к увеличению объемной плотности экструдатов ($p < 0,05$). При более высоком содержании воды в экструдере снижает-

ся вязкость расплава и создаваемое механическое напряжение, что приводит к формированию более плотной и менее расширенной структуры (рис.1). Снеки, полученные из смесей с высокой влажностью, характеризовались повышенной твердостью, так как избыток влаги способствует образованию прочных межмолекулярных связей в крахмальной матрице, делая продукт менее хрупким и более грубым при разжевывании.

Температура обработки в четвертой зоне экструдера существенно корректировала показатели ВПС и ИРВ. Повышение температуры с 115 до 155 °С вызывало рост данных показателей, что объясняется интенсивной термической деструкцией высокомолекулярных полисахаридов и белков с образованием более простых водорастворимых фракций (декстринов). Влияние температуры на твердость носило нелинейный характер: при низких температурах (около 115 °С) снеки были излишне твердыми из-за неполной клейстеризации крахмала. Оптимальный нагрев до 125–135 °С способствовал получению хрустящей структуры, в то время как дальнейшее повышение температуры выше 145 °С приводило к некоторому снижению прочности из-за чрезмерной деструкции полимеров.

На основании статистического анализа методом поверхности отклика была проведена оптимизация процесса для получения снеков с наилучшим сочетанием физических свойств. Оптимальные параметры были определены как: соотношение компонентов ячмень/чечевица/тыква – 80:12,5:7,5 %; влажность смеси – 15 %; температура экструзии – 125 °С (рис.2, 3). Снеки, полученные при данных режимах, получили наивысшие баллы дегустационной комиссии (в среднем 4,7 из 5,0). Эксперты отметили привлекательный золотисто-оранжевый цвет, выраженную хрустящую текстуру и гармоничный вкус без посторонних привкусов бобовых.

Сопоставление полученных данных с результатами других исследователей показало, что разработанные ячменные снеки с добавлением чечевицы и тыквы не уступают, а по ряду показателей (содержание каротиноидов и клетчатки) превосходят традиционные кукурузные и пшеничные аналоги. Разработанная технология позволяет эффективно использовать отечественное сельскохозяйственное сырье для производства продуктов здорового питания. Готовый продукт характеризуется сбалансированным аминокислотным профилем и повышенным содержанием минеральных веществ, что позволяет рекомендовать его для питания детей школьного

возраста, спортсменов и людей, придерживающихся принципов рационального питания.

Выводы

В результате проведенных исследований научно обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения обогащенных снеков на основе ячменной муки с добавлением чечевицы и тыквы методом одношнековой экструзии. Использование методологии поверхности отклика (RSM) позволило установить точные количественные зависимости между рецептурным составом, влажностью сырья, температурой обработки и качественными характеристиками готового продукта. Высокая сходимости теоретических и фактических данных, где отклонение не превысило 3,5 %, подтверждает достоверность разработанных математических моделей. Установлено, что оптимальные параметры процесса достигаются при содержании ячменной муки 80 %, чечевичной – 12,5 % и порошка тыквы – 7,5 %. При влажности исходной смеси 15 % и температуре экструзии 125 °С обеспечивается формирование наиболее развитой пористой структуры с максимальным радиальным расширением 70,8 % и минимальной насыпной плотностью 0,040 г/см³. Данные режимы позволяют получить продукт с оптимальными текстурными характеристиками, где прочность на излом составляет 181,41 Н, что соответствует высоким требованиям к хрустящим снекам. Оптимизированный продукт обладает повышенной пищевой ценностью и сбалансированным химическим составом. Включение чечевицы позволило обогатить продукт растительным белком и незаменимыми аминокислотами, а добавление тыквы обеспечило наличие каротиноидов и пищевых волокон (2,42 %). Низкое содержание жира (1,26 %) и сбалансированная зольность (2,03 %) позволяют рекомендовать разработанные снеки для функционального питания различных групп населения. Разработанная технология имеет важное практическое значение для пищевой промышленности, так как позволяет эффективно использовать отечественное растительное сырье для создания продуктов здорового питания. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых видов экструдированных изделий с заданными физико-механическими и потребительскими свойствами. Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть связаны с изучением сохранности биологически активных веществ в процессе хранения готовой продукции.

Литература

- [1] Синявский Ю. А. и др. Анализ современного состояния рынка производства снековой продукции в Казахстане // Научный аспект. – 2021. – Т. 1. – № 4. – С. 28-41.

References

- [1] Sinyavskiy Yu. A. et al. Analysis of the current state of the snack production market in Kazakhstan // Scientific aspect. - 2021. - Vol. 1. - No. 4. - Pp. 28-41.
[2] Asfondyayrova I. V., Abutalimova A. A., Demchenko V.

- [2] Асфондиярова И. В., Абуталимова А. А., Демченко В. А. Пищевые системы и биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ // Новые технологии / New technologies. – 2025. – Т. 21. – №. 1. – С. 11-24.
- [3] Рустимова А. Ж., Ребезов М. Б. Применение зернобобовой смеси для хлебобулочных изделий // Аграрная наука. – 2023. – Т. 1. – №. 8. – С. 137-142.
- [4] Драпкина О. М. и др. Российское общество профилактики неинфекционных заболеваний (РОПНИЗ). Алиментарно-зависимые факторы риска хронических неинфекционных заболеваний и привычки питания: диетологическая коррекция в рамках профилактического консультирования. Методические рекомендации // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2021. – Т. 20. – №. 5. – С. 2952.
- [5] Драпкина О. М. и др. Профилактика хронических неинфекционных заболеваний в Российской Федерации. Национальное руководство 2022 // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2022. – Т. 21. – №. 4. – С. 5-232.
- [6] Донцова А. А. и др. Производство ячменя в мире и России // Зерновое хозяйство России. – 2016. – №. 6. – С. 7-13.
- [7] Полонский В. И., Сумина А. В. Содержание β -глюканов в зерне как перспективный признак при селекции ячменя на пищевое использование (обзор иностранной литературы) // Сельскохозяйственная биология. – 2013. – №. 5. – С. 30-43.
- [8] Лоскутов И. Г., Полонский В. И. Селекция на содержание β -глюканов в зерне овса как перспективное направление для получения продуктов здорового питания, сырья и фуража (обзор) // Сельскохозяйственная биология. – 2017. – Т. 52. – №. 4. – С. 646-657.
- [9] Ипатова И. С. и др. Методы интегрированной защиты зернобобовых культур на примере чечевицы от вредных объектов // Научный журнал молодых ученых. – 2024. – №. 1 (36). – С. 15-19.
- [10] Юшков С. Разработка комплексного состава растительных белков, имеющего полноценный набор аминокислот // Бизнес пищевых ингредиентов. – 2018. – Т. 1. – С. 22-27.
- [11] Бахчевников О. Н., Брагинец С. В. Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор) // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50. – №. 4. – С. 690-706.
- A. Food systems and biotechnology of food products and biologically active substances // New technologies. – 2025. – Vol. 21. – No. 1. – Pp. 11-24.
- [3] Rustemova A. Zh., Rebezov M. B. Use of grain legume mixture for bakery products // Agrarian science. – 2023. – Vol. 1. – No. 8. – Pp. 137-142.
- [4] Drapkina O. M. et al. Russian Society for the Prevention of Non-Communicable Diseases (ROPNIZ). Nutrition-dependent risk factors for chronic non-communicable diseases and eating habits: dietary correction as part of preventive counseling. Guidelines // Cardiovascular Therapy and Prevention. – 2021. – Vol. 20. – No. 5. – P. 29-52.
- [5] Drapkina O. M. et al. Prevention of chronic non-communicable diseases in the Russian Federation. National guidelines 2022 // Cardiovascular Therapy and Prevention. – 2022. – Vol. 21. – No. 4. – P. 5-232.
- [6] Dontsova A. A. et al. Barley production in the world and in Russia // Grain Economy of Russia. – 2016. – No. 6. – P. 7-13.
- [7] Polonsky V. I., Sumina A. V. β -Glucan Content in Grain as a Promising Trait in Barley Breeding for Food Use (Review of Foreign Literature) // Agricultural Biology. – 2013. – No. 5. – P. 30-43.
- [8] Loskutov I. G., Polonsky V. I. Breeding for β -Glucan Content in Oat Grain as a Promising Direction for Obtaining Healthy Food Products, Raw Materials, and Forage (Review) // Agricultural Biology. – 2017. – Vol. 52. – No. 4. – P. 646-657.
- [9] Ipatova I. S. et al. Methods of Integrated Protection of Leguminous Crops from Pests Using Lentils as an Example // Scientific Journal of Young Scientists. – 2024. – No. 1 (36). – P. 15-19.
- [10] Yushkov S. Development of a complex composition of plant proteins with a complete set of amino acids // Business of Food Ingredients. – 2018. – Vol. 1. – P. 22-27.
- [11] Bakhchevnikov O. N., Braginets S. V. Extrusion of plant raw materials for food products (review) // Equipment and technology of food production. – 2020. – Vol. 50. – No. 4. – P. 690-706.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Бирюков Дмитрий Алексеевич магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 E-mail:</p>	<p>Biryukov Dmitry Alekseevich undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University E-mail:</p>