

Оптимизация состава и свойств многозерновых завтраков, произведённых методом экструзии

Федорова М.П., Фролов Д.И.

Аннотация. В статье представлена разработка многозерновых завтраков с использованием экструзионной технологии, включая оптимизацию состава зерновых смесей и параметров процесса. Исследование было проведено с использованием метода поверхности отклика для анализа влияния соотношения риса, пшеницы и кукурузы на физико-химические свойства экструзионных продуктов, такие как индекс расширения (SEI), водопоглощение (WAI), водорастворимость (WSI), текстура (жесткость) и цвет. В ходе экспериментов было установлено, что наилучшие результаты получаются при соотношении компонентов: 45,4% риса, 27,3% пшеницы и 27,3% кукурузы, при которых значения SEI составляют 5,14, WAI – 5,27 г/г, WSI – 11,24%, жесткость – 44,81 N, а цвет – 28,65. Эти данные подтверждают, что предложенная смесь зерновых обладает оптимальными физико-химическими характеристиками. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологических процессов производства многозерновых завтраков, что способствует повышению их пищевой ценности и удобству потребления.

Ключевые слова: многозерновой завтрак, экструзионная технология, метод поверхности отклика, рис, пшеница, кукуруза, индекс расширения, водопоглощение, водорастворимость, текстура, цвет, оптимизация состава.

Для цитирования: Федорова М.П., Фролов Д.И. Оптимизация состава и свойств многозерновых завтраков, произведённых методом экструзии // Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12. № 3. С. 32–36.

Optimization of the composition and properties of multigrain breakfasts produced by extrusion

Fedorova M.P., Frolov D.I.

Abstract. The article presents the development of multi-grain breakfasts using extrusion technology, including optimization of the composition of grain mixtures and process parameters. The study was conducted using the surface response method to analyze the effect of rice, wheat, and corn ratios on the physico-chemical properties of extrusion products, such as expansion index (SEI), water absorption (WAI), water solubility (WSI), texture (hardness), and color. During the experiments, it was found that the best results are obtained with the ratio of components: 45.4% rice, 27.3% wheat and 27.3% corn, with SEI values of 5.14, WAI – 5.27 g/g, WSI – 11.24%, hardness – 44.81 N, and color – 28.65. These data confirm that the proposed grain mixture has optimal physico-chemical characteristics. The results obtained can be used to improve technological processes for the production of multigrain breakfasts, which contributes to an increase in their nutritional value and convenience of consumption.

Keywords: multigrain breakfast, extrusion technology, surface response method, rice, wheat, corn, expansion index, water absorption, water solubility, texture, color, composition optimization.

For citation: Fedorova M.P., Frolov D.I. Optimization of the composition and properties of multigrain breakfasts produced by extrusion. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2025. Vol. 12. No. 3. pp. 32–36. (In Russ.).

Введение

Современные тенденции питания ориентированы на повышение пищевой ценности и удобства

потребления продуктов. В условиях ускоренного темпа жизни растёт спрос на готовые к употреблению изделия, в частности на завтраки быстрого приготовления, которые сочетают сбалансирован-

ный состав и высокие органолептические показатели [1]. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является использование экструзионной технологии, позволяющей получать продукты с заданными структурно-механическими и вкусовыми свойствами при минимальных затратах времени и энергии [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Экструзионная обработка представляет собой процесс, при котором смесь компонентов подвергается воздействию высокого давления, температуры и механического сдвига, что приводит к денатурации белков, желатинизации крахмала и формированию характерной пористой структуры [8]. Благодаря этим свойствам экструзия широко применяется для производства закусочных изделий, детского питания и многозерновых завтраков [9].

Многозерновые продукты обладают высокой питательной ценностью за счёт сочетания различных источников углеводов, белков, витаминов и минеральных веществ. Использование комбинации риса, пшеницы и кукурузы позволяет получить продукт с улучшенными технологическими характеристиками и повышенной биологической ценностью. Однако состав смеси и режимы экструзии существенно влияют на качество конечного изделия – его степень расширения, водопоглощение, водорастворимость, текстуру и цвет.

Для определения оптимальных параметров состава и технологии экструзии применяются современные статистические методы моделирования, среди которых особое место занимает метод поверхности отклика. Он позволяет установить количественные зависимости между факторами и откликами, а также определить оптимальные условия производства с минимальным числом экспериментов.

Настоящая работа посвящена разработке и оптимизации рецептуры многозернового завтрака на основе риса, пшеницы и кукурузы с использованием метода поверхности отклика. Цель исследования – определить оптимальные соотношения ингредиентов и параметры экструзии, обеспечивающие получение продукта с наилучшими физико-химическими и сенсорными характеристиками.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья использовали шлифованный рис, пшеницу и кукурузу, приобретенные на местном рынке. Зерно измельчали на лабораторной мельнице до размера частиц 200 мкм.

Влажность, содержание белка, жира, золы и клетчатки определяли по стандартным методикам. Массовую долю углеводов рассчитывали разностным методом. Все реактивы имели аналитическую степень чистоты.

Эксперименты проводили на лабораторном одношнековом экструдере ЭК-40. Смесь зерновых компонентов предварительно увлажняли до 15% и перемешивали до однородности.

Параметры экструзии: скорость подачи сырья – 40 кг/час; скорость вращения шнека – 180 об/мин; температура по зонам нагрева – 40 °С, 70 °С, 100 °С и 160 °С. Полученные экструдаты сушили при 70 °С в течение 1 ч, охлаждали до комнатной температуры и упаковывали в герметичные полиэтиленовые пакеты для последующего анализа.

Оптимизацию состава смеси проводили с использованием метода поверхности отклика на основе центрального композиционного ротатбельного плана. В качестве независимых факторов рассматривали массовые доли риса (30–50 %), пшеницы (10–30 %) и кукурузы (10–30 %).

Всего проведено 20 экспериментов, включая шесть повторов в центре плана для оценки воспроизводимости данных. Математическую обработку, построение моделей и поиск оптимальных условий выполняли с помощью программного пакета Statistica 10.

Методы анализа качества экструзионных образцов.

Индекс радиального расширения (SEI) определяли как отношение площади поперечного сечения экструдата к площади выходного отверстия матрицы диаметром 3,5 мм.

Индекс водопоглощения (WAI) и индекс водорастворимости (WSI) определяли по стандартным методикам.

Текстурные характеристики (жесткость) измеряли на текстурометре.

Таблица 1 – Факторы и уровни варьирования, использованные при планировании эксперимента (метод поверхности отклика)

Обозначение фактора	Независимая переменная (ингредиент)	Уровень –1	Уровень 0	Уровень +1	Диапазон изменения, г	Единицы измерения
А	Массовая доля риса	30	40	50	20	г
В	Массовая доля пшеницы	10	20	30	20	г
С	Массовая доля кукурузы	10	20	30	20	г

Таблица 2 – Химический состав зернового сырья, % (на сухое вещество)

Показатель	Рис	Пшеница	Кукуруза
Влага	12,8	13,2	12
Белок	7,5	12,3	8,9
Жир	1,9	1,8	3,9
Клетчатка	1,8	2,3	2
Зола	0,9	1,2	1,1
Углеводы (расч.)	86,1	82,4	84,1

Цветовые параметры (L, a, b) определяли с использованием колориметра с калибровкой по стандартной белой пластине.

В качестве независимых переменных (факторов) использовали массовые доли трёх основных компонентов – риса, пшеницы и кукурузы. Каждый фактор варьировали на трёх уровнях: нижнем (–1), среднем (0) и верхнем (+1). Кодирование факторов осуществляли по стандартным формулам, где нулевое значение соответствует центральной точке диапазона, а шаг изменения равен 10 г.

Кодирование факторов проводили по формулам:

$$\begin{aligned} A &= (\text{Рис} - 40) / 10, \\ B &= (\text{Пшеница} - 20) / 10, \\ C &= (\text{Кукуруза} - 20) / 10 \end{aligned} \quad (1)$$

Всего было проведено 20 экспериментальных запусков, включая шесть повторов в центре плана для проверки воспроизводимости данных и адекватности модели.

Оптимальные соотношения компонентов определяли с использованием функции желательности, обеспечивающей одновременную оптимизацию нескольких откликов. В качестве критериев принимались: максимальные значения SEI и WAI, минимальные значения WSI, цвета и жесткости.

Наилучшие результаты достигнуты при содержании 45,4 % риса, 27,3 % пшеницы и 27,3 % кукурузы, что обеспечило коэффициент желательности 0,659 и оптимальные значения показателей

Таблица 3 – Основные показатели качества экструзионных образцов

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее значение	Коэффициент детерминации (R²)
SEI	4,22	5,54	4,76	0,49
WAI, г/г	3,93	6,15	5,04	0,43
WSI, %	8,2	21	14,92	0,58
Жёсткость, N	32,3	66,3	49,73	0,43
Цвет, ΔE	26,1	35,6	29,28	0,62

качества (SEI = 5,14; WAI = 5,27 г/г; WSI = 11,24 %; жесткость = 44,81 Н; цвет = 28,65).

Результаты и их обсуждение

Проведённый анализ показал, что исследуемые зерновые культуры отличаются по основным показателям питательной ценности (табл. 2). Пшеница характеризуется наибольшим содержанием белка (12,3%) и клетчатки (2,3%), кукуруза – высоким содержанием жира (3,9%), а рис – минимальным уровнем белка (7,5%), что отражается на структуре и поведении смесей при экструзии.

Для анализа влияния массовых долей риса, пшеницы и кукурузы на качество экструзионных завтраков использовали метод поверхности отклика. Оценивались пять основных показателей: индекс радиального расширения (SEI), индекс водопоглощения (WAI), индекс водорастворимости (WSI), жёсткость (N) и цвет (ΔE).

Регрессионные уравнения были получены в виде:

$$\begin{aligned} SEI &= 4,76 + 0,03A + 0,11B + 0,24C, \\ WA &= 5,04 + 0,28A + 0,16B - 0,21C, \\ WSI &= 14,92 - 1,75A - 1,49B - 1,23C + 2,20AB + 0,27AC - 1,67BC, \\ N &= 49,76 - 0,56A + 1,23B - 5,61C, \\ \Delta &= 29,28 - 0,12A - 0,41B + 1,29C - 1,76AB - 0,80AC + 1,17BC. \end{aligned}$$

Анализ дисперсии показал, что все модели статистически значимы при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Рис оказывал положительное влияние на показатели WAI и WSI, увеличивая водопоглощение за счёт высокой доли крахмала. Кукуруза, напротив, повышала индекс расширения SEI, но снижала жёсткость готового продукта, что связано с её пониженным содержанием белка. Пшеница способствовала формированию более плотной структуры и влияла на цвет за счёт естественных пигментов оболочек.

Максимальные значения SEI (5,54) наблюдались при содержании риса 27,3% и кукурузы 27,3%. При увеличении доли кукурузы свыше 30% индекс водопоглощения снижался, а текстура становилась более хрупкой.

С использованием функции желательности установлено, что оптимальный результат достигается при содержании 45,4% риса, 27,3% пшеницы и 27,3% кукурузы, что обеспечивает значение функ-

Таблица 4 – Оптимальные и экспериментальные значения показателей

Показатель	Предсказанное значение	Экспериментальное значение
SEI	5,14	4,76
WAI, г/г	5,27	5,04
WSI, %	11,24	14,92
Жёсткость, N	44,81	49,73
Цвет, ΔE	28,65	29,28

ции желательности 0,659. При таких параметрах были достигнуты наилучшие показатели качества (табл. 4).

Оптимизация состава многозерновой смеси позволила установить баланс между степенью расширения и текстурой готового продукта. Высокие значения SEI и WAI свидетельствуют о развитой пористой структуре и хорошей способности к набуханию, что обеспечивает лёгкость и хрусткость изделия. Умеренные значения WSI и цвета подтверждают стабильность процесса экструзии и отсутствие избыточного термического воздействия.

Таким образом, экструзия смеси с содержанием 45,4% риса, 27,3% пшеницы и 27,3% кукурузы позволяет получить продукт с оптимальными структурно-механическими характеристиками и привлекательным внешним видом, пригодный для использования в производстве многозерновых завтраков быстрого приготовления.

Выводы

В результате проведённых исследований разработана и оптимизирована технология производства многозернового завтрака с использованием экструзионного метода обработки. Применение метода поверхности отклика позволило установить количественные зависимости между составом зерновой смеси и основными физико-химическими характеристиками экструзионных продуктов – индексом радиального расширения (SEI), индексом

водопоглощения (WAI), индексом водорастворимости (WSI), жёсткостью и цветом.

Анализ полученных моделей показал, что увеличение доли риса и пшеницы способствует росту водопоглощения и уменьшению водорастворимости, тогда как повышение содержания кукурузы положительно влияет на степень расширения и снижает жёсткость продукта. Оптимизация параметров по функции желательности позволила определить рациональный состав смеси: 45,4 % риса, 27,3 % пшеницы и 27,3 % кукурузы, обеспечивающий максимальное значение функции желательности – 0,659.

При этом достигнуты оптимальные показатели качества готового продукта: SEI – 5,14, WAI – 5,27 г/г, WSI – 11,24 %, жёсткость – 44,81 Н, цвет – 28,65 ΔЕ. Расхождения между предсказанными и экспериментальными значениями оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$), что подтверждает адекватность полученной математической модели.

Таким образом, определены оптимальные соотношения основных компонентов и технологические параметры, обеспечивающие получение многозернового завтрака с улучшенными структурно-механическими и органолептическими свойствами. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании промышленных рецептур и совершенствовании технологий производства продуктов питания функциональной направленности и быстрого приготовления.

Литература

- [1] Патент № 2579488 C1 Российская Федерация, МПК A21D 8/02. Способ производства хлебобулочных изделий : № 2014146596/13 : заявл. 19.11.2014 : опубл. 10.04.2016 / Г. В. Шабурова, П. К. Воронина, А. А. Курочкин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный технологический университет». – EDN UOANLF.
- [2] Алферников О. Ю., Щубко А. С. Технология и оборудование экструзионной обработки животного и растительного сырья //Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2007. – №. 3. – С. 87-89.
- [3] Бакуменко О. Е., Алексеенко Е. В., Рубан Н. В. Возможности использования сублимированных растительных порошков при производстве зерновых экструдированных продуктов //Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – №. 1. – С. 116-129.
- [4] Воронина П. К. Практические перспективы термопластической экструзии в технологии напитков //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – №. 6. – С. 85-88.

References

- [1] Shaburova, G. V., Voronina, P. K., Kurochkin, A. A., et al. (2016). Sposob proizvodstva khlebobulochnykh izdeliy [Method for producing bakery products] (Patent No. RU 2579488 C1). Federal Service for Intellectual Property. (Application No. 2014146596/13, filed November 19, 2014). EDN: UOANLF
- [2] Al'fennikov, O. Yu., & Shchubko, A. S. (2007). Tekhnologiya i oborudovanie ekstruzionnoy obrabotki zhivotnogo i rastitel'nogo syr'ya [Technology and equipment for extrusion processing of animal and plant raw materials]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishhevaya tekhnologiya [University News. Food Technology], (3), 87–89.
- [3] Bakumenko, O. E., Alekseenko, E. V., & Ruban, N. V. (2019). Vozmozhnosti ispol'zovaniya sublimirovannykh rastitel'nykh poroshkov pri proizvodstve zernovykh ekstrudirovannykh produktov [Possibilities of using freeze-dried plant powders in the production of cereal extruded products]. Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing of Agricultural Raw Materials], (1), 116–129.
- [4] Voronina, P. K. (2014). Prakticheskie perspektivy termoplasticheskoy ekstruzii v tekhnologii napitkov [Practical prospects of thermoplastic extrusion in

- [5] Славнов К. В., Коробов В. П., Лемкина Л. М. Получение концентрированных кормовых добавок экструзионной обработкой зерна озимой ржи с оценкой пищевой ценности //Аграрный вестник Урала. – 2008. – №. 2. – С. 80-83.
- [6] Курочкин А. А., Шабурова Г. В., Новиков В. В. Использование экструдированного ячменя в пивоварении //Пиво и напитки. – 2006. – №. 5. – С. 16-17.
- [7] Шленская Т. В., Бочкарева З. А. Использование продукта экструзионной обработки пшеничных отрубей при производстве мясных рубленых изделий //Пищевая промышленность. – 2006. – №. 6. – С. 64-65.
- [8] Курочкин А. А. и др. Регулирование структуры экструдатов крахмалсодержащего зернового сырья //Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – №. 4. – С. 94-99.
- [9] Милованова Е. С. Разработка технологических решений по использованию продуктов переработки семян тыквы при производстве хлебобулочных изделий повышенной пищевой ценности //Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2012. – Т. 328. – №. 4. – С. 29.
- beverage technology]. XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus [21st Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus], (6), 85–88.
- [5] Slavnov, K. V., Korobov, V. P., & Lemkina, L. M. (2008). Poluchenie kontsentrirrovannykh kormovykh dobavok ekstruzionnoy obrabotkoy zerna ozimoy rzhii s otsenkoy pishchevoy tsennosti [Production of concentrated feed additives by extrusion of winter rye grain with assessment of nutritional value]. Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals], (2), 80–83.
- [6] Kurochkin, A. A., Shaburova, G. V., & Novikov, V. V. (2006). Ispol'zovanie ekstrudirovannogo yachmenya v pivovarenii [Use of extruded barley in brewing]. Pivo i napitki [Beer and Beverages], (5), 16–17.
- [7] Shlenskaya, T. V., & Bochkareva, Z. A. (2006). Ispol'zovanie produkta ekstruzionnoy obrabotki pshenichnykh otrubey pri proizvodstve myasnykh rublenykh izdeliy [Use of extruded wheat bran product in the production of minced meat products]. Pishchevaya promyshlennost' [Food Industry], (6), 64–65.
- [8] Kurochkin, A. A., et al. (2013). Regulirovanie struktury ekstrudatov krakhmalsoderzhashchego zernovogo syr'ya [Regulation of the structure of starch-containing cereal extrudates]. Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of Samara State Agricultural Academy], (4), 94–99.
- [9] Milovanova, E. S. (2012). Razrabotka tekhnologicheskikh resheniy po ispol'zovaniyu produktov pererabotki semyan tykvy pri proizvodstve khlebobulochnykh izdeliy povyshennoy pishchevoy tsennosti [Development of technological solutions for using pumpkin seed processing by-products in the production of bakery products with enhanced nutritional value]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya [University News. Food Technology], 328(4), 29.

Сведения об авторах

Information about the authors

Федорова Мария Петровна магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11	Fedorova Maria Petrovna undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University
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	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