

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

## TECHNOLOGIES AND MEANS OF MECHANIZATION OF AGRICULTURE

УДК 664.696.1

### Параметры экструзии и производительность при обогащении рисовой муки морковью

*Бирюков Д.А., Фролов Д.И.*

**Аннотация.** В статье исследовано влияние концентрации морковной муки, влажности смеси и частоты вращения шнека на производительность экструзии при получении обогащенных рисовых продуктов. Работа выполнена на базе одношнекового экструдера ЭК-40 при варьировании влажности от 14% до 20% и добавлении до 20% морковной муки. Установлено, что содержание овощной добавки не оказывает существенного влияния на массовый расход, в то время как влажность и скорость шнека являются определяющими факторами. Значения производительности в ходе экспериментов составили от 3,96 до 6,12 кг/ч. Сопоставимое влияние ключевых факторов подтверждается анализом полученной регрессионной модели. Рост выхода продукции обусловлен снижением плотности материала и сокращением времени его обработки в канале экструдера. Результаты важны для точной настройки параметров производства композитных продуктов на основе риса и моркови.

**Ключевые слова:** экструзия, рисовая мука, морковная мука, производительность, ЭК-40, влажность, скорость шнека.

**Для цитирования:** Бирюков Д.А., Фролов Д.И. Параметры экструзии и производительность при обогащении рисовой муки морковью // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 2. С. 71–76.

### Extrusion parameters and productivity in enriching rice flour with carrots

*Biryukov D.A., Frolov D.I.*

**Abstract.** This article examines the influence of carrot flour concentration, mixture moisture content, and screw speed on extrusion productivity in the production of fortified rice products. The study was conducted using an EK-40 single-screw extruder with moisture content varying from 14% to 20% and the addition of up to 20% carrot flour. It was found that the vegetable additive content does not significantly affect mass flow rate, while moisture content and screw speed are the determining factors. Productivity values during the experiments ranged from 3.96 to 6.12 kg/h. The comparable impact of key factors is confirmed by analysis of the resulting regression model. The increase in product yield is due to a decrease in material density and a reduction in its processing time in the extruder channel. The results are important for fine-tuning the production parameters of rice-carrot composite products.

**Keywords:** extrusion, rice flour, carrot flour, productivity, EK-40, moisture content, screw speed.

**For citation:** Biryukov D.A., Frolov D.I. Extrusion parameters and productivity in enriching rice flour with carrots. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 2. pp. 71–76. (In Russ.).

## Введение

В современной пищевой индустрии наблюдается устойчивая тенденция к переходу на технологии, обеспечивающие максимальную сохранность нативных свойств сырья при минимальной интенсивности механического и термического воздействия. Одним из наиболее эффективных и динамично развивающихся методов в этом направлении является экструзионная обработка [1]. Ключевое преимущество данной технологии заключается в кратковременности процесса, что позволяет минимизировать деструкцию термолабильных биологически активных соединений, таких как витамины и антиоксиданты, обеспечивая при этом микробиологическую чистоту и готовность продукта к употреблению [2]. Кроме того, глубокая модификация биополимеров в процессе экструзии способствует существенному повышению усвояемости нутриентов, что увеличивает общую пищевую ценность конечного продукта [3, 4, 5].

Рис традиционно занимает позицию одной из ведущих сельскохозяйственных культур в глобальном рационе питания [6]. С учетом мирового объема производства, превышающего 480 миллионов тонн в год, рис является стратегическим сырьем для пищевой промышленности. Особую актуальность рисовая мука приобретает в сегменте диетического питания, выступая базовым ингредиентом для производства широкого спектра безглютеновых хлебобулочных и кондитерских изделий [7, 8]. Для создания продуктов функциональной направленности перспективно обогащение зерновой основы овощными компонентами.

Морковь – один из наиболее востребованных корнеплодов семейства *Ariaceae*, обладающий высокой нутриентной и лечебно-профилактической ценностью. Она характеризуется высоким содержанием каротиноидов ( $\alpha$ -каротин,  $\beta$ -каротин, лютеин) и является основным источником провитамина А, Таблица 1 – Факторы и уровни варьирования

Фактор	Обозначение	Нижний уровень (-1)	Верхний уровень (+1)
Содержание морковной муки, %	X1	10	20
Влажность исходной смеси, %	X2	14	20
Частота вращения шнека, мин <sup>-1</sup>	X3	180	220

Таблица 2 – Матрица планирования и экспериментальные значения производительности

№ опыта	X1 (Морковь, %)	X2 (Влажность, %)	X3 (Скорость, об/мин)	Q (Производительность, кг/ч)
1	10	14	180	4,59
2	15	14	220	6,09
3	20	17	180	5,01
4	15	20	180	5,9
5	15	17	200	5,21
6	10	20	200	5,8
7	20	14	200	5,01
8	20	20	220	5,73
9	10	17	220	5,96

обеспечивая около 17% его общего потребления в рационе человека [9, 10]. Присутствие значительного количества природной клетчатки в моркови способствует нормализации перистальтики кишечника и эффективному выведению токсинов, что делает ее идеальным компонентом для создания обогащенных экструдатов [11].

Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния ключевых параметров процесса – концентрации морковной муки, влажности исходной смеси и частоты вращения шнека – на производительность оборудования и качественные характеристики получаемого продукта.

## Объекты и методы исследования

Объектами исследования выступали композитные смеси на основе рисовой муки высшего сорта и измельченного порошка моркови. Подготовку овощного компонента осуществляли путем дегидратации свежей моркови в сушильном шкафу при температуре 50 °С в течение 24 часов до достижения остаточной влажности менее 10%. Полученный полуфабрикат измельчали на лабораторной мельнице до гранулометрического состава, сопоставимого с рисовой мукой, что обеспечивало высокую степень гомогенизации системы. Для доведения смесей до заданных технологических параметров использовали питьевую воду, соответствующую государственным гигиеническим нормативам.

Подготовка сырья включала создание двух базовых рецептов с соотношением рисовой и морковной муки 90:10 и 80:20 соответственно. Согласно плану эксперимента, образцы увлажняли до уровней 14% и 20% с последующим интенсивным перемешиванием в лабораторном смесителе в течение 15 минут. Для обеспечения равновесного распределения влаги и завершения процессов диффузии смеси выдерживали в герметичной таре при температуре 4 °С в течение суток, после чего подвергали

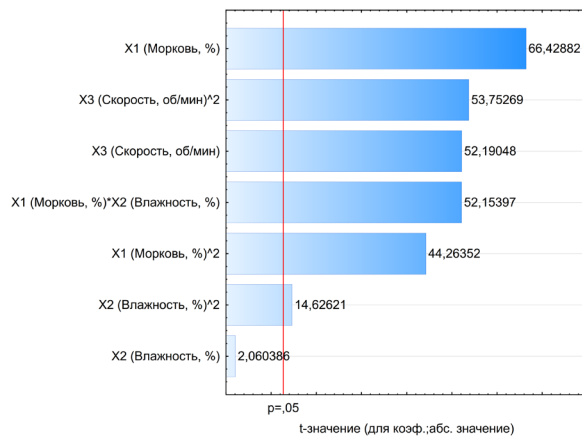


Рис. 1. Диаграмма Парето влияния исследуемых факторов на производительность

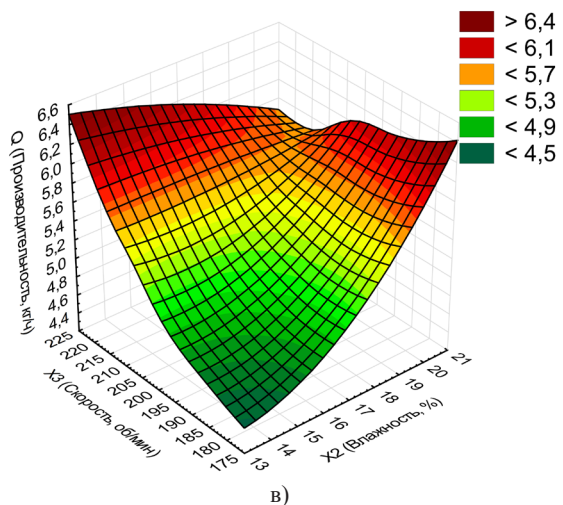
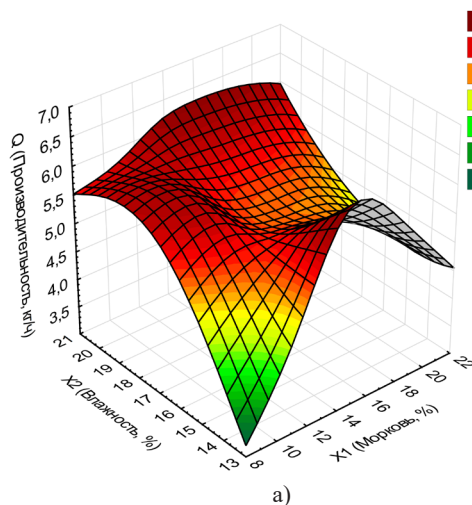
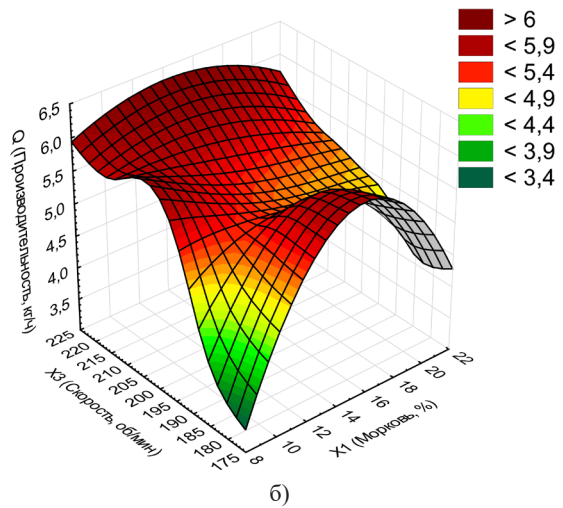


Рис. 2. Поверхности отклика зависимости производительности (Q) от технологических факторов: а) X1-X2; б) X1-X3; в) X2-X3

двухчасовой температурной экспозиции при комнатных условиях непосредственно перед обработкой.

Экспериментальные исследования проводились с использованием одношнекового экструдера ЭК-40, обладающего следующими техническими характеристиками: рабочая скорость шнека составляет  $n=200$  об/мин, геометрическое отношение длины шнека к его диаметру  $L/D=4$ , а диаметр выходного отверстия формующей фильеры – 5 мм. В соответствии с технологическим регламентом, температурный режим по рабочим зонам экструдера поддерживался на уровнях 140 °С, 160 °С и 180 °С. Конструктивные особенности выбранного оборудования в сочетании с варьируемыми параметрами призваны обеспечить научную базу для оптимизации режимов производства инновационных продуктов на основе рисово-морковных смесей.

Оценку эффективности процесса проводили по показателю массового расхода (Q, кг/ч). Производительность определяли гравиметрическим методом, фиксируя массу экструдата, выходящего из матрицы за установленный временной интервал (10 с). Для минимизации погрешности измерения в каждой точке плана выполнялись в трехкратной

повторности с последующим расчетом среднего значения.

Математическое планирование эксперимента осуществлялось по схеме полного факторного эксперимента типа 2<sup>3</sup>. В качестве независимых факторов варьирования выступали концентрация морковной муки (X1), влажность смеси (X2) и частота вращения шнека (X3). Статистическая обработка результатов, включая проведение дисперсионного анализа и построение регрессионной модели, выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения при доверительном уровне  $p < 0,05$ .

Для системного изучения процесса и оценки значимости каждого параметра был реализован план полного факторного эксперимента. В таблице 1 представлены независимые переменные и их соответствующие уровни, выбранные на основании предварительных исследований и анализа существующих технологий экструзии аналогичных смесей.

### Результаты и их обсуждение

В ходе проведения полнофакторного эксперимента были получены данные о производитель-

ности одношнекового экструдера ЭК-40 при переработке рисово-морковных смесей. Суммарный диапазон значений массового расхода варьировался от 3,96 до 6,12 кг/ч, что свидетельствует о высокой чувствительности процесса к выбранным технологическим параметрам. Полная матрица планирования и соответствующие ей экспериментальные значения представлены в таблице 2.

Анализ влияния компонентного состава показал, что содержание морковной муки (X1) не оказывает статистически значимого воздействия на производительность экструдера. Так, при изменении концентрации добавки с 10% до 20% при фиксированной влажности (14%) и минимальной скорости шнека наблюдалось лишь незначительное колебание массового расхода. Это позволяет сделать вывод о возможности варьирования уровня обогащения продукта морковью в указанных пределах без внесения существенных корректив в производственный цикл.

Влажность исходной смеси (X2) и частота вращения шнека (X3) проявили себя как доминирующие факторы. С ростом влажности с 14% до 20% при содержании моркови 10% производительность закономерно увеличивалась, достигая максимальных значений в опытах с высокой частотой вращения. Физически данный эффект объясняется снижением вязкости и плотности тестообразной массы в канале экструдера, что снижает сопротивление потоку и облегчает продвижение материала через фильеру. Аналогично, интенсификация вращения шнека сокращает время пребывания сырья в зоне обработки, что также ведет к росту массового выхода продукции.

Для математического описания процесса была получена адекватная модель в кодированных значениях факторов:

$$Q=58,839+0,95189 \cdot X1-0,0153 \cdot X1^2+0,06981 \cdot X2+0,01407 \cdot X2^2-0,6393 \cdot X3+0,00165 \cdot X3^2-0,0301 \cdot X1 \cdot X2 \quad (1)$$

Анализ полученной математической модели позволил установить степень адекватности описания процесса экструзии. Высокое значение коэффициента детерминации ( $R^2 = 99,9\%$ ) подтверждает отличную сходимость теоретических и экспериментальных данных, указывая на то, что модель объясняет практически всю вариацию исследуемого параметра. Это свидетельствует о высокой точности проведенных измерений и правильности выбора структуры уравнения регрессии. Статистическая оценка значимости коэффициентов модели подчеркивает доминирующую роль влажности смеси (X2) и частоты вращения шнека (X3) в формировании массового потока. Коэффициенты при данных факторах практически идентичны по своей величине, что указывает на их сопоставимое и равнозначное влияние на общую производительность процесса. При этом влияние содержания морковной муки (X1) остается менее выраженным, что подтверждает

возможность варьирования степени обогащения продукта без существенного изменения эффективности работы оборудования. Физическая интерпретация полученных зависимостей указывает на то, что оптимизация производительности экструдера ЭК-40 должна основываться на прецизионном регулировании гидротермического состояния сырья и динамических режимов шнека. Сочетание высокой влажности и максимальных оборотов шнека позволяет достичь пиковых значений массового расхода в 6,12 кг/ч, что обусловлено снижением вязкопластичного сопротивления перемещаемого материала в канале экструдера.

Визуализация результатов в виде поверхностей отклика позволяет наглядно оценить характер взаимодействия факторов. Наибольшее влияние влажности проявляется при низких скоростях вращения шнека, что отражено на соответствующих графиках зависимости. Полученные закономерности служат инструментом для прецизионного управления параметрами экструзии при промышленном производстве функциональных рисовых экструдатов с добавлением моркови.

## Выводы

В ходе проведенного исследования была научно обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения одношнековой экструзии для получения функциональных пищевых продуктов на основе рисовой муки, обогащенной морковью. Использование лабораторного экструдера ЭК-40 позволило установить количественные зависимости между ключевыми технологическими факторами и производительностью процесса. На основании математической обработки данных полнофакторного эксперимента была получена прецизионная регрессионная модель второго порядка. Высокий коэффициент детерминации ( $R^2 = 99,9\%$ ) свидетельствует о достоверности выявленных закономерностей и позволяет использовать данное уравнение для точного прогнозирования массового расхода в производственных условиях.

Установлено, что диапазон производительности системы составляет от 3,96 до 6,12 кг/ч в зависимости от комбинации входных параметров. Ключевыми факторами, определяющими эффективность работы оборудования, являются влажность исходной смеси и частота вращения шнека, оказывающие сопоставимое по величине положительное влияние на выход готовой продукции. Рост производительности при увеличении влажности обусловлен снижением вязкопластичного сопротивления перемещаемого материала, а при увеличении оборотов шнека – интенсификацией его продвижения по рабочему каналу. Важным результатом работы стало подтверждение того, что варьирование концентрации морковной муки в пределах 10–20% не оказывает критического влияния на стабильность массового потока. Это открывает

широкие возможности для гибкого регулирования рецептурного состава без потери производительности линии. Полученные данные служат основой

для промышленного внедрения технологий производства безглютеновых экструдатов с повышенной биологической ценностью.

## Литература

- [1] 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.
- [2] Толмачев О. А., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В. Влияние обработки высоким давлением растительного сырья на экстрагирование биологически активных веществ и сохранность экстракта //Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2016. – №. 5. – С. 40.
- [3] Gao Y. et al. Extrusion modification: Effect of extrusion on the functional properties and structure of rice protein //Processes. – 2022. – Т. 10. – №. 9. – С. 1871.
- [4] De Pilli T., Alessandrino O. Effects of different cooking technologies on biopolymers modifications of cereal-based foods: Impact on nutritional and quality characteristics review //Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2020. – Т. 60. – №. 4. – С. 556-565.
- [5] Verbeek C. J. R., Van Den Berg L. E. Extrusion processing and properties of protein-based thermoplastics //Macromolecular materials and engineering. – 2010. – Т. 295. – №. 1. – С. 10-21.
- [6] Эберхард Ш. и др. Традиционное и органическое сельское хозяйство: анализ сравнительной эффективности с позиции концепции устойчивого развития //Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2015. – №. 4. – С. 4-39.
- [7] Cabral D. et al. Exploring rice consumption habits and determinants of choice, aiming for the development and promotion of rice products with a low glycaemic index //Foods. – 2024. – Т. 13. – №. 2. – С. 301.
- [8] Gul K. et al. Rice bran: Nutritional values and its emerging potential for development of functional food—A review //Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre. – 2015. – Т. 6. – №. 1. – С. 24-30.
- [9] Густинович В. Г. Обоснование применения порошков тыквы и моркови в производстве галет функционального назначения //Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – Т. 79. – №. 4 (74). – С. 152-156.
- [10] Степанова Н. Ю. Технологическая оценка производства цукатов из моркови, свёклы и тыквы //Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2015. – №. 2. – С. 174-178.
- [11] Livny O. et al.  $\beta$ -carotene bioavailability from differently processed carrot meals in human ileostomy volunteers //European journal of nutrition. – 2003. – Т. 42. – №. 6. – С. 338-345.

## References

- [1] Alfernikov O. Yu., Shchubko A. S. Technology and equipment for extrusion processing of animal and plant raw materials // News of higher educational institutions. Food technology. - 2007. - No. 3. - P. 87-89.
- [2] Tolmachev O. A., Tikhonov S. L., Tikhonova N. V. Effect of high-pressure processing of plant raw materials on the extraction of biologically active substances and the preservation of the extract // Technology and commodity science of innovative food products. - 2016. - No. 5. - P. 40.
- [3] Gao Y. et al. Extrusion modification: Effect of extrusion on the functional properties and structure of rice protein // Processes. - 2022. - Vol. 10. - No. 9. – P. 1871.
- [4] De Pilli T., Alessandrino O. Effects of different cooking technologies on biopolymer modifications of cereal-based foods: Impact on nutritional and quality characteristics review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2020. – Vol. 60. – No. 4. – P. 556-565.
- [5] Verbeek C. J. R., Van Den Berg L. E. Extrusion processing and properties of protein-based thermoplastics // Macromolecular materials and engineering. – 2010. – Vol. 295. – No. 1. – P. 10-21.
- [6] Eberhard S. et al. Conventional and organic agriculture: analysis of comparative efficiency from the standpoint of the concept of sustainable development // Bulletin of St. Petersburg University. Economics. – 2015. – No. 4. – P. 4-39.
- [7] Cabral D. et al. Exploring rice consumption habits and determinants of choice, aiming for the development and promotion of rice products with a low glycaemic index // Foods. - 2024. - Vol. 13. - No. 2. - P. 301.
- [8] Gul K. et al. Rice bran: Nutritional values and its emerging potential for the development of functional food - A review // Bioactive Carbohydrates and Dietary Fiber. - 2015. - Vol. 6. - No. 1. - P. 24-30.
- [9] Gustinovich V. G. Rationale for the use of pumpkin and carrot powders in the production of functional biscuits // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. - 2017. - Vol. 79. - No. 4 (74). - P. 152-156.
- [10] Stepanova, N. Yu., “Technological Assessment of the Production of Candied Carrot, Beetroot, and Pumpkin,” in Scientific Journal of the National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Series: “Food Production Processes and Equipment,” 2015, no. 2, pp. 174–178.
- [11] Livny, O. et al., “ $\beta$ -carotene bioavailability from differently processed carrot meals in human ileostomy volunteers,” in European Journal of Nutrition, 2003, no. 6, pp. 338–345.

**Сведения об авторах**

**Information about the authors**

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