

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

TECHNOLOGIES AND MEANS OF MECHANIZATION OF AGRICULTURE

УДК 631.53:664.7

Влияние экструзии и рецептуры на энергозатраты при производстве безглютеновых продуктов

Варламова Т.С., Фролов Д.И.

Аннотация. В статье рассматривается влияние экструзионной обработки и состава рецептуры на эффективность процесса и энергозатраты при производстве безглютеновых продуктов из риса и бобовых. В ходе исследования были изучены различные параметры экструзии, такие как содержание влаги в сырье (28-32%), скорость вращения шнека (60-100 об/мин). Результаты показали, что скорость шнека оказывает значительное влияние на производственные показатели: эффективность процесса (Q) варьировалась от 10,56 до 16,8 кг/ч, потребление энергии (SME) – от 0,14 до 0,35 кВт·ч/кг. При повышении содержания влаги в сырье процесс эффективности увеличивался, в то время как энергозатраты снижались. Влияние состава рецептуры на параметры процесса было минимальным, с диапазоном значений Q от 12,00 до 12,96 кг/ч и SME от 0,25 до 0,27 кВт·ч/кг. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации производственных процессов в пищевой промышленности, направленных на производство безглютеновых продуктов с минимальными энергозатратами.

Ключевые слова: экструзия, безглютеновые продукты, эффективность процесса, энергозатраты, рецептура, шнек.

Для цитирования: Варламова Т.С., Фролов Д.И. Влияние экструзии и рецептуры на энергозатраты при производстве безглютеновых продуктов // Инновационная техника и технология. 2025. Т. 12. № 3. С. 40–44.

The effect of extrusion and formulation on energy consumption in the production of gluten-free products

Varlamova T.S., Frolov D.I.

Abstract. The article examines the effect of extrusion processing and formulation composition on process efficiency and energy consumption in the production of gluten-free products from rice and legumes. During the study, various extrusion parameters were studied, such as the moisture content in the raw material (28-32%) and the screw rotation speed (60-100 rpm). The results showed that the screw speed has a significant impact on production performance: process efficiency (Q) ranged from 10.56 to 16.8 kg/h, and energy consumption (SME) from 0.14 to 0.35 kWh/kg. With an increase in the moisture content of the raw materials, the efficiency process increased, while energy consumption decreased. The effect of the formulation on the process parameters was minimal, with a range of Q values from 12.00 to 12.96 kg/h and an SME from 0.25 to 0.27 kWh/kg. The data obtained can be used to optimize production processes in the food industry aimed at producing gluten-free products with minimal energy consumption.

Keywords: extrusion, gluten-free products, process efficiency, energy consumption, formulation, auger.

For citation: Varlamova T.S., Frolov D.I. The effect of extrusion and formulation on energy consumption in the production of gluten-free products. *Innovative Machinery and Technology* [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2025. Vol. 12. No. 3. pp. 40–44. (In Russ.).

Введение

Спрос на безглютеновые продукты растет, что связано с увеличением числа людей, страдающих от заболеваний, таких как целиакия, а также с растущей популярностью безглютеновых диет [1, 2]. Однако безглютеновые продукты часто имеют недостаточную питательную ценность, в частности, низкое содержание белка и клетчатки [3, 4]. В этой связи существует потребность в разработке более питательных и функциональных безглютеновых продуктов, в том числе за счет добавления бобовых культур, таких как горох, нут и чечевица [5, 6]. Экструзия, как высокотемпературный процесс короткого времени, является эффективным методом обработки для производства таких продуктов. Она позволяет не только улучшить текстуру и вкусовые характеристики, но и повысить их пищевую ценность [7, 8].

Однако экструзионный процесс также является энергоемким, и его эффективность напрямую зависит от множества факторов, таких как состав сырья, содержание влаги и скорость вращения шнека. В предыдущих исследованиях отмечено, что различные условия экструзии могут существенно влиять на потребление энергии и производственные характеристики. Например, увеличение скорости шнека и уровня влажности в сырье, как правило, повышает эффективность процесса, однако повышает и энергозатраты. В то же время, влияние состава рецептуры на эти параметры остается малоизученным.

Целью настоящего исследования является анализ влияния экструзионных условий (влажности сырья и скорости шнека) и состава рецептуры на эффективность процесса (Q) и энергозатраты (SME) при производстве безглютеновых продуктов из риса и бобовых. Ожидается, что результаты этого исследования помогут оптимизировать параметры экструзионного процесса, минимизируя энергозатраты при обеспечении высокого качества конечного продукта.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья для экструзии использовались рисовая мука и мука из бобовых культур (жёлтый горох, нут и красная чечевица). Сырьё было измельчено в лабораторной мельнице и просеяно до гранулометрии менее 0,5 мм.

Были подготовлены несколько рецептурных смесей, состоящих из рисовой муки и муки из бобовых в различных пропорциях: рис/жёлтый горох (2/1), рис/нут (2/1) и рис/чечевица (2/1). Муки смешивались с разными уровнями влаги: 28%, 30% и 32%. Смеси подвергались экструзионной обработке

на одноморозной экструдерной установке с применением скорости шнека в диапазоне от 60 до 100 об/мин.

Эффективность экструзионного процесса (Q) определялась путём измерения массы полученного экструзиата за определённый промежуток времени. Этот параметр рассчитывался по формуле:

$$Q=m/t \quad (1)$$

где m — масса продукта (кг), t — время (ч). Измерения проводились в трёх репликациях для каждой комбинации параметров экструзии.

Энергозатраты при экструзии определялись с использованием специфической механической энергии (SME), которая рассчитывалась по следующей формуле:

$$SME=((n \cdot N \cdot L)/100) \cdot (P/Q) \quad (2)$$

где n — скорость вращения шнека (об/мин),

N — максимальная скорость шнека (об/мин),

L — нагрузка на мотор (%),

P — электрическая мощность двигателя (кВт),

Q — эффективность процесса (кг/ч).

Энергозатраты были измерены с помощью стандартного регистратора, подключённого к двигателю экструдера.

Все результаты были обработаны с использованием анализа дисперсии для выявления значимости различий между различными условиями экструзии и составами рецептур. Статистический анализ был выполнен с использованием программного обеспечения Statistica 10 при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Экструзия проводилась с использованием экструдерной установки с одним шнеком типа. Температурный режим установки был следующим: 90°C — в первой секции, 100°C — во второй, 70°C — в финальной секции экструдера. Полученные спагетти-подобные изделия высушивались до влажности менее 12%.

Результаты и их обсуждение

В результате проведённых экспериментов были получены данные о влиянии различных условий экструзии (скорости вращения шнека и содержания влаги в сырье) на эффективность процесса (Q) и энергозатраты (SME) при производстве безглютеновых продуктов из риса и бобовых культур. Ниже представлены результаты для различных рецептур и параметров экструзии.

Влияние скорости шнека на эффективность процесса и энергозатраты

Измерения показали, что скорость вращения шнека оказывает существенное влияние на эффективность процесса экструзии и энергозатраты. В таблице 1 приведены данные о процессе экструзии

Таблица 1 – Влияние скорости шнека и содержания влаги на эффективность процесса (Q) и энергозатраты (SME)

Содержание влаги (%)	Скорость шнека (об/мин)	Эффективность процесса (Q, кг/ч)	Энергозатраты (SME, кВт·ч/кг)
28	60	10,56	0,14
28	80	12,36	0,21
28	100	16,8	0,35
30	60	11,2	0,13
30	80	13,05	0,19
30	100	15,45	0,3
32	60	12,05	0,12
32	80	13,75	0,18
32	100	14,6	0,28

для различных скоростей шнека и содержания влаги в сырье.

При увеличении скорости шнека наблюдается рост как эффективности процесса, так и энергозатрат. Это объясняется тем, что при повышении скорости шнека увеличивается интенсивность механической обработки сырья, что способствует лучшему усвоению влаги и улучшению текстуры конечного продукта.

Увлажнение сырья также оказывает влияние на эффективность экструзии. При повышении содержания влаги в сырье, эффективность процесса возрастала, однако энергозатраты на единицу продукции снижались, что может быть связано с уменьшением трения и уменьшением усилий, необходимых для прохождения сырья через экструдер.

Далее была исследована зависимость эффективности экструзии и энергозатрат от состава рецептуры (добавление бобовых мук). Результаты приведены в таблице 2.

Из данных таблицы видно, что добавление бобовых культур в рецептуру не оказывало значительного влияния на эффективность экструзии и энергозатраты. Все смеси с бобовыми имели аналогичные показатели по эффективности процесса (Q) и энергозатратам (SME).

Литература

- [1] Щербакова А. Ю., Бурова Н. О. Обзор безглютеновых продуктов, а также продуктов с пониженным содержанием глютена // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – 2018. – №. 20. – С. 128-131.
- [2] Хорошун В. Н., Синкевич Е. В. Глютен и его роль в питании человека //Международный студенческий научный вестник. – 2020. – №. 2. – С. 7-7.
- [3] Сабыржанова А. Е. и др. Сравнительный анализ химического состава безглютеновых

Таблица 2 – Влияние состава рецептуры на эффективность процесса (Q) и энергозатраты (SME)

Рецептура (рис/бобовые)	Процент бобовых (%)	Эффективность процесса (Q, кг/ч)	Энергозатраты (SME, кВт·ч/кг)
Рис / Жёлтый горох	0	12,48	0,26
Рис / Жёлтый горох	10	12	0,27
Рис / Жёлтый горох	20	12	0,27
Рис / Жёлтый горох	30	12,48	0,26
Рис / Нут	10	12	0,27
Рис / Нут	20	12	0,27
Рис / Нут	30	12	0,27
Рис / Чечевица	10	12	0,27
Рис / Чечевица	20	12,96	0,25
Рис / Чечевица	30	12	0,27

В частности, рецептура с чечевицей показала несколько более высокую эффективность процесса ($Q = 12,96$ кг/ч при 20% чечевицы), однако изменения в энергозатратах были незначительными.

Результаты статистической обработки данных с использованием анализа дисперсии показали, что скорость шнека и содержание влаги в сырье имеют статистически значимое влияние на эффективность процесса и энергозатраты ($p < 0,05$).

Выводы

Наибольшее влияние на эффективность процесса и энергозатраты оказывает скорость вращения шнека: с её увеличением как эффективность, так и энергозатраты растут. Содержание влаги в сырье также оказывает влияние, улучшая эффективность процесса при увеличении влажности, но снижая энергозатраты. Состав рецептуры (добавление бобовых культур) не оказывал значимого влияния на параметры экструзии в рамках изученных условий.

References

- [1] Shcherbakova, A. Yu., & Burova, N. O. (2018). Obzor bezglyutenovykh produktov, a takzhe produktov s ponizhennym soderzhaniem glyutena [Review of gluten-free and reduced-gluten products]. Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaystva [Current Issues in Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products], (20), 128–131.
- [2] Khoroshun, V. N., & Sinkevich, E. V. (2020). Glyuten i ego rol' v pitanii cheloveka [Gluten and its role in human nutrition]. Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik [International Student Scientific Bulletin], (2), 7.

- продуктов //Иноватика в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития. – 2023. – С. 62-69.
- [4] Урубков С. А., Хованская С. С., Смирнов С. О. Содержание основных нутриентов в продуктах переработки безглютеновых зерновых культур при производстве продукции для детского питания //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – Т. 7. – №. 4. – С. 32-38.
- [5] Дубцова Г. Н., Кусова И. У., Чикалов А. А. Разработка рецептуры безглютеновых снеков //Пищевые ингредиенты и биологически активные добавки в технологиях продуктов питания и парфюмерно-косметических средств. – 2019. – С. 79-84.
- [6] Абуова А. Б., Муслимов Н. Ж., Кабылда А. И. Показатели качества и безопасности нетрадиционных видов муки для производства безглютеновых макаронных изделий // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2022. – №. 3. – С. 40-55.
- [7] Гуляева А. Н., Бахарев В. В. Анализ изобретений, продуктов, технологий и оборудования процесса экструзии растительного сырья //Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. – Т. 84. – №. 2 (92). – С. 39-45.
- [8] Мартинчик А. Н., Шариков А. Ю. Влияние экструзии на сохранность аминокислот и пищевую ценность белка //Вопросы питания. – 2015. – Т. 84. – №. 3. – С. 13-21.
- [3] Sabyrjanova, A. E., et al. (2023). Srovnitel'nyy analiz khimicheskogo sostava bezglyutenovykh produktov [Comparative analysis of the chemical composition of gluten-free products]. In *Innovatika v sovremennom mire: Opyt, problemy i perspektivy razvitiya* [Innovatics in the Modern World: Experience, Problems and Development Prospects] (pp. 62–69).
- [4] Urubkov, S. A., Khovanskaya, S. S., & Smirnov, S. O. (2019). Soderzhanie osnovnykh nutriyentov v produktakh pererabotki bezglyutenovykh zernovykh kul'tur pri proizvodstve produktsii dlya detskogo pitaniya [Content of major nutrients in processed gluten-free cereal crops for children's food production]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii* [Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology], 7(4), 32–38.
- [5] Dubtsova, G. N., Kusova, I. U., & Chikalov, A. A. (2019). Razrabotka retseptury bezglyutenovykh snekov [Development of gluten-free snack formulations]. In *Pishchevye ingredienty i biologicheski aktivnye dobavki v tekhnologiyakh produktov pitaniya i parfyumerno-kosmeticheskikh sredstv* [Food Ingredients and Bioactive Additives in Food and Cosmetic Technologies] (pp. 79–84).
- [6] Abuova, A. B., Muslimov, N. Zh., & Kabylda, A. I. (2022). Pokazateli kachestva i bezopasnosti netraditsionnykh vidov muki dlya proizvodstva bezglyutenovykh makaronnykh izdeliy [Quality and safety indicators of non-traditional flours for gluten-free pasta production]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and Processing of Agricultural Raw Materials], (3), 40–55.
- [7] Gulyayeva, A. N., & Bakharev, V. V. (2022). Analiz izobreteniy, produktov, tekhnologiy i oborudovaniya protsessa ekstruzii rastitel'nogo syr'ya [Analysis of inventions, products, technologies, and equipment for plant raw material extrusion]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies], 84(2(92)), 39–45.
- [8] Martinchik, A. N., & Sharikov, A. Yu. (2015). Vliyanie ekstruzii na sokhrannost' aminokislot i pishchevuyu tsennost' belka [Effect of extrusion on amino acid retention and protein nutritional value]. *Voprosy pitaniya* [Problems of Nutrition], 84(3), 13–21.

Сведения об авторах

Information about the authors

Варламова Татьяна Сергеевна магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11	Varlamova Tatiana Sergeevna 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