

Оптимизация режимов экструзии кукурузной крупы

Фролов Д.И., Алмакаева Е.А.

Аннотация. В работе исследовано влияние параметров термовакуумной обработки на свойства экструдатов из кукурузной крупы. Экспериментальные исследования проводились с использованием одношнекового экструдера ЭК-40, предназначенного для термомеханической обработки крахмалсодержащего сырья. В процессе обработки варьировались основные технологические параметры: температура экструзии, скорость вращения шнека и влажность исходного сырья. Известно, что изменение условий работы экструдера, включая скорость вращения шнека и массовый расход сырья, оказывает существенное влияние на крутящий момент двигателя и величину удельной механической энергии процесса. Для планирования эксперимента применялся метод Бокса–Бенкена. В качестве показателей качества экструдированных продуктов рассматривались индекс расширения (EI), индекс водопоглощения (WAI) и индекс растворимости в воде (WSI). Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием методов регрессионного анализа и функции желательности. Установлено, что наиболее значительное влияние на исследуемые показатели оказывает влажность исходного сырья, в то время как температура обработки оказывает более выраженное влияние на индекс расширения экструдатов. Применение термовакуумной обработки способствует улучшению структуры и технологических свойств экструдированных продуктов. В результате оптимизации технологического процесса определены рациональные параметры обработки кукурузной крупы: скорость вращения шнека - 175 об/мин, влажность сырья - 16 %, температура - 190 °С. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании технологий производства экструдированных зерновых продуктов с применением термовакуумной обработки.

Ключевые слова: экструзия, оптимизация, индекс расширения, индекс водопоглощения, индекс растворимости в воде.

Для цитирования: Фролов Д.И., Алмакаева Е.А. Оптимизация режимов экструзии кукурузной крупы // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 1. С. 68–73.

Optimization of corn groat extrusion modes

Frolov D.I., Almakaeva E.A.

Abstract. This study examines the effect of thermal vacuum processing parameters on the properties of corn grits extrudates. Experimental studies were conducted using an EK-40 single-screw extruder designed for the thermomechanical processing of starch-containing raw materials. During the processing, the key process parameters were varied: extrusion temperature, screw speed, and feedstock moisture content. It is known that changing extruder operating conditions, including screw speed and feedstock mass flow rate, significantly affects motor torque and the specific mechanical energy of the process. The Box-Behnken method was used to design the experiment. The expansion index (EI), water absorption index (WAI), and water solubility index (WSI) were used as quality indicators of the extruded products. The experimental data were processed using regression analysis and a desirability function. It was found that feedstock moisture content has the most significant effect on the studied parameters, while processing temperature has a more pronounced effect on the expansion index of the extrudates. The use of thermal vacuum processing improves the structure and processing properties of extruded products. As a result of process optimization, optimal processing parameters for corn grits were determined: screw speed of 175 rpm, raw material moisture content of 16%, and temperature of 190°C. These results can be used to improve production technologies for extruded grain products using thermal vacuum processing.

Keywords: extrusion, optimization, expansion index, water absorption index, water solubility index.

For citation: Frolov D.I., Almakayeva E.A. Optimization of corn groat extrusion modes. *Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]*. 2026. Vol. 13. No. 1. pp. 68–73. (In Russ.).

Введение

Экструзия является одной из наиболее эффективных и универсальных технологий переработки зернового сырья в пищевой промышленности. Данный процесс широко применяется при производстве различных пищевых продуктов, включая готовые завтраки, закусочные изделия и другие экструдированные продукты на основе кукурузной, рисовой и пшеничной муки, отличающиеся разнообразием форм и текстур [2]. Технология экструзии основана на принудительном перемещении пищевого материала через рабочий канал экструдера в условиях интенсивного перемешивания, нагрева и механического сдвига, что обеспечивает эффективную термомеханическую обработку сырья.

В процессе экструзионной обработки сырье подвергается воздействию высоких температур, давления и механических нагрузок, что приводит к значительным физико-химическим преобразованиям. В частности, происходят желатинизация крахмала, денатурация белков, образование комплексов амилозы с липидами, а также частичная дегградация витаминов и пигментов [4]. Эти процессы оказывают существенное влияние на структуру и функциональные свойства конечного продукта.

Качество экструдированных пищевых продуктов во многом определяется условиями технологического процесса [5]. Такие параметры, как температура экструзии, скорость вращения шнека, конструкция матрицы и тип используемого экструдера, оказывают значительное влияние как на параметры процесса, так и на характеристики получаемого продукта [6]. Важными показателями качества экструдатов являются функциональные свойства, включая индекс водопоглощения, индекс растворимости в воде и индекс расширения.

В связи с этим актуальной задачей является исследование влияния технологических параметров экструзии на функциональные свойства экструдированных продуктов. Целью данного исследования является изучение влияния условий экструзионной обработки, включая скорость вращения шнека, температуру процесса и влажность исходного сырья, на показатели водопоглощения и водорастворимости экструдатов из кукурузной крупы. Для определения оптимальных технологических параметров процесса использован метод оптимизации на основе функции желательности.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья для исследования использовали цельное зерно кукурузы. Перед проведением

экспериментов зерно измельчали на молотковой мельнице, оснащенной ситом с диаметром отверстий 1 мм. Полученный продукт дополнительно просеивали для выделения фракции частиц размером менее 1000 мкм, которая использовалась в дальнейших исследованиях. Подготовленный материал увлажняли до заданного содержания влаги и тщательно перемешивали для обеспечения равномерного распределения воды.

Экструзионную обработку подготовленных образцов проводили на лабораторном одношнековом экструдере [1, 3]. Экструдер имел диаметр цилиндра 1,9 см и соотношение длины цилиндра к диаметру 20:1. Максимальная скорость вращения шнека составляла 275 мин⁻¹, степень сжатия шнека - 1:3, диаметр фильеры - 3 мм.

Перед началом каждого опыта оборудование выводили на стационарный режим работы. В процессе экструзии варьировали основные технологические параметры, включая скорость вращения шнека, температуру обработки и влажность исходного сырья.

Планирование эксперимента осуществлялось с использованием метода Бокса–Бенкена, позволяющего оценить влияние нескольких факторов и их взаимодействий при ограниченном числе опытов. Статистическая обработка результатов выполнялась с использованием программного обеспечения OriginPro.

В качестве независимых факторов рассматривались:

X1 – скорость вращения шнека (175–200 об/мин);

X2 – влажность сырья (16–20 %);

X3 – температура экструзии (170–190 °C).

В качестве параметров отклика использовали: индекс расширения (EI); индекс водопоглощения (WAI); индекс растворимости в воде (WSI).

Для описания зависимости откликов от исследуемых факторов применялись полиномиальные модели первого и второго порядка:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (1)$$

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_{12} + b_{22}X_{22} + b_{33}X_{32} + b_{12}X_{1X_2} + b_{23}X_{2X_3} + b_{13}X_{1X_3} \quad (2)$$

Таблица 1 - Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Наименование	Нижний уровень	Верхний уровень
X1	Скорость вращения шнека (об/мин)	175	200
X2	Влажность (%)	16	20
X3	Температура (°C)	170	190

Таблица 2 - Матрица планирования и результаты эксперимента

Скорость вращения шнека (об/мин)	Влажность (%)	Температура (°C)	EI	WAI, г/г	WSI, %
X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
175	16	180	2,01	5,98	16,31
175	18	170	1,31	5,42	14,18
175	18	190	1,57	5,75	15,07
175	20	180	1,4	6,31	11,35
187.5	16	190	2,3	5,63	17,52
187.5	16	180	2,2	5,32	17
187.5	18	180	1,5	5,9	14,95
187.5	18	180	1,5	5,91	14,92
187.5	18	180	1,5	5,91	14,92
187.5	20	170	1,17	5,2	11,78
187.5	20	190	1,5	6,03	12,58
200	16	180	2,34	5,02	17,65
200	18	170	1,5	5,06	15,24
200	18	190	1,66	5,65	16,08
200	20	180	1,5	5,3	13,5

где Y – прогнозируемый отклик, X1, X2 и X3 соответствуют независимым переменным, b0 – свободный член, b1, b2 и b3 – линейные эффекты, b11, b22 и b33 – квадратичные эффекты, а b12, b23 и b13 – эффекты взаимодействия факторов.

Качество подгонки и значимость всех членов полиномиальных уравнений определялись с помощью соответствующих статистических методов (коэффициент детерминации (R²), F-значение при вероятности P=0,05).

Индекс расширения, представляющий собой отношение диаметра экструдата к диаметру фильеры, использовался для выражения степени расширения экструдата. Для расчета среднего значения для каждого экструдата использовалось шесть образцов.

Индекс водопоглощения (WAI) и индекс растворимости в воде (WSI) определяли по методике: 0,2 г измельченного образца диспергировали в 5 мл дистиллированной воды в взвешенной стеклянной центрифужной пробирке объемом 15 мл. Пробирку перемешивали на вихревом смесителе в течение 2 минут, а затем центрифугировали в течение 20 минут. Надосадочную жидкость сливали в тарированную выпарительную чашку для определения содержания твердых веществ. Оставшийся гель, полученный после удаления надосадочной жидкости, взвешивали, и рассчитывали по формуле:

$$WAI = mg / ms \quad (3)$$

где mg – масса гидратированного геля, г;
ms – масса образца, г.

Индекс растворимости в воде (WSI) – это масса сухих веществ из надосадочной жидкости (mds, г), выраженная в процентах от массы образца (ms, г).

$$WSI = (mds/ms) * 100 \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение

Для обеспечения наилучших качественных характеристик экструдатов необходимо исследовать и оптимизировать параметры экструзии. Матрица планирования и результаты эксперимента показаны в таблице 2. Для аппроксимации функций отклика (Y1-Y3) был проведен множественный регрессионный анализ, в результате которого были получены полиномиальные уравнения (таблица 3). Для определения адекватности и значимости полученных моделей использовался дисперсионный анализ. Анализ проводился с помощью критерия Фишера, результаты представлены в таблице 4. Регрессионные модели оказались значимыми (P<0,05) с удовлетворительными значениями коэффициентов детерминации.

Согласно регрессионной модели (Y1) индекса расширения, значение коэффициента детерминации (R²=0,993) указывает на то, что только 0,7% общей дисперсии не могут быть объяснены моделью. Среди членов модели (Y1) члены X1, X2, X3, X22 являются значимыми с вероятностью 95%. Однако взаимодействия между X1X2, X1X3, X2X3, а также квадратичные члены X12, X32 не оказали существенного влияния на индекс расширения (таблица 4). На индекс расширения положительно повлияли линейные эффекты температуры и влажности. Влияние скорости вращения шнека менее значимо по сравнению с влиянием температуры и влажности (таблица 3).

Аналогичные результаты были получены другими исследователями [7, 8, 9], которые сообщали, что низкое содержание влаги в материале ограничи-

Таблица 3 – Полиномиальные модели второго порядка

Параметр	Уравнение	R2
EI	$Y1=10,2287+0,008303X1-2,4372X2+0,1377X3--0,0023X1X2-0,0002X1X3+0,0009X2X3+0,0002X12+0,0699X22-0,0003X32$	0,993
WAI	$Y2 = 3923 - 0,0243X1 + 0,0727X2 + 0,02739X3$	0,636
WSI	$Y3= 18,31201+0,0556X1-1,1789X2+0,0407X3$	0,978

Таблица 4 – Дисперсионный анализ результатов эксперимента

Источник	Y1	Y2	Y3
Модель	78,29	6,4	165,27
X1	23,81	10,52	37,27
X2	389,87	2,37	421,21
X3	33,94	7,28	10,88

X1 – Скорость вращения (об/мин); X2 – Влажность (%); X3 – Температура (°C); Y1 - EI; Y2 - WAI (г/г); Y3 - WSI (%)

вает текучесть, увеличивая скорость сдвига и время пребывания, что повышает степень желатинизации крахмала, а также его расширение. Увеличение скорости вращения шнека привело к значительному увеличению продольного расширения экструдатов. Увеличение расширения крахмала с повышением температуры было объяснено более высокой степенью его желатинизации.

Индекс водопоглощения (WAI) измеряет количество воды, поглощаемой крахмалом, и может использоваться в качестве показателя желатинизации. Этот параметр указывает на способность макромолекулы взаимодействовать с водой, а также на WAI. WAI зависит от наличия гидрофильных групп, способных связываться с молекулами воды, и гелеобразующая способность макромолекул.

Полученная модель (Y2) с коэффициентом детерминации $R^2=0,64$ признана значимой ($P<0,05$). Члены модели X1 и X3 значимы на уровне 0,05 ($P<0,05$), в то время как член X2 не оказывает значимого влияния на WAI (таблица 4). На WAI положительно влияли температура и влажность, а отрицательно – скорость вращения шнека.

Настоящее исследование подтверждает выводы о том, что индекс водопоглощения экструдированной кукурузной крупы увеличивается с повышением температуры и увеличением влажности корма.

Наше исследование согласуется с результатами работы других исследователей [10, 11], которые утверждали, что индекс водопоглощения снижается с увеличением скорости вращения шнека. Результаты данного исследования подтверждают идею о том, что более высокая скорость вращения шнека, как правило, увеличивает скорость сдвига, но уменьшает время пребывания, что приводит к получению менее желатинизированного продукта.

Индекс водорастворимости (WSI), часто используемый в качестве индикатора деградации молекулярных компонентов, измеряет количество малых молекул, растворенных в воде и выделяющихся из крахмала после экструзии. WSI действительно связан со степенью трансформации крахмала. WSI уменьшался с увеличением влажности исходного сырья, но повышение температуры ока-

зывало обратный эффект (Таблица 3). Согласно коэффициенту детерминации $WSI R^2=0,9783$, можно заключить, что только 2,17 % общей дисперсии не могут быть объяснены моделью Y3, которая оказалась значимой ($P<0,05$). Значимость на уровне 0,05 ($P<0,05$) связана со следующими членами модели: X1, X2, X3. Видно, что на WSI положительно влияли скорость вращения шнека и температура, и отрицательно – влажность (Таблица 3).

Увеличение скорости вращения шнека привело к резкому увеличению удельной механической энергии. Высокое механическое сдвиговое напряжение разрушало макромолекулы, в результате чего молекулярная масса крахмальных гранул уменьшалась. Следовательно, индекс водорастворимости (WSI) увеличивался, поскольку крахмальные гранулы становились более растворимыми в воде.

Оптимизация проводилась с использованием концепции функции желательности, которая объединяет несколько параметров в один, присваивая значение от 0 (одна или несколько характеристик неприемлемы) до 1 (все характеристики процесса соответствуют целевым значениям). После преобразования оценочных параметров в индивидуальные значения желательности (от 0 до 1) общая желательность процесса рассчитывается как геометрическое среднее индивидуальных функций желательности. Все переменные процесса поддерживались в пределах заданного диапазона, в то время как параметры максимизировались (EI и WAI) или оставались в пределах заданного диапазона (WSI). Окончательные оптимизированные параметры экструзии, составили 175 об/мин, 190 °C и влажность 16%, что должно обеспечить следующие уровни исследуемых параметров: EI- 2,17, WAI - 6,04 г/г; WSI - 16,91%. В этих условиях было получено высокое значение функции желательности (0,821).

Выводы

Параметры растворимости и водопоглощения характеризуют экструдированный продукт и часто важны для прогнозирования того, как экструдированный материал может вести себя при дальнейшей

обработке. Мы пришли к выводу, что влажность оказывает наиболее сильное влияние на индекс расширения, WAI и WSI. Температура оказывала слабое влияние на WSI и WAI, в то время как более сильное влияние наблюдалось на индекс расширения ($p < 0,05$). Скорость вращения шнека оказывает

наиболее сильное влияние на WSI. Оптимальные уровни исследуемых параметров были определены с помощью метода функции желательности. Было установлено, что оптимальными параметрами являются: скорость вращения шнека: 175 об/мин, влажность 16% и температура 190 °C.

Литература

- [1] Потапов, М. А. Оптимизация количества отверстий в матрице одношнекового экструдера для переработки птичьего помета / М. А. Потапов, Д. И. Фролов, А. А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4. – С. 42-48. – EDN AFMRPP.
- [2] Патент № 2579488 С1 Российская Федерация, МПК А21D 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.
- [3] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 26–29 февраля 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 072018. – DOI 10.1088/1755-1315/640/7/072018. – EDN CHLIKW.
- [4] Шариков А. Ю., Амелякина М. В. Модификация углеводов сельскохозяйственного сырья в процессе термопластической экструзии (обзор) //Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2021. – Т. 22. – №. 6. – С. 795-803.
- [5] Шариков А. Ю., Степанов В. И., Иванов В. В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии //Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2019. – Т. 9. – №. 3 (30). – С. 447-460.
- [6] Фролов Д. И., Курочкин А. А., Потапов М. А. Влияние термовакуумной экструзии на физические и физико-химические свойства получаемого продукта //Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – №. 4. – С. 37-46.
- [7] Xie F., Halley P. J., Avérous L. Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials // Progress in Polymer Science. – 2012. – Т. 37. – №. 4. – С. 595-623.
- [8] Xie F. et al. Starch Gelatinization under Shearless and Shear Conditions //International Journal of Food Engineering. – 2006. – Т. 2. – №. 5.

References

- [1] Potapov, M. A. Optimization of the Number of Holes in the Die of a Single-Screw Extruder for Processing Poultry Manure / M. A. Potapov, D. I. Frolov, A. A. Kurochkin // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. - 2020. - No. 4. - Pp. 42-48. - EDN AFMRPP.
- [2] Patent No. 2579488 C1 Russian Federation, IPC A21D 8/02. Method for the Production of Bakery Products: No. 2014146596/13: declared 19.11.2014: published 10.04.2016 / G. V. Shaburova, P. K. Voronina, A. A. Kurochkin [et al.]; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Penza State Technological University». – EDN UOANLF.
- [3] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A. A. Kurochkin, D. I. Frolov, V. M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, February 26–29, 2020. – Voronezh, 2021. – P. 072018. – DOI 10.1088/1755-1315/640/7/072018. – EDN CHLIKW.
- [4] Sharikov, A. Yu., Amelyakina, M. V. Modification of carbohydrates of agricultural raw materials during thermoplastic extrusion (review) // Agrarian Science of the Euro-North-East. – 2021. – Vol. 22. – No. 6. – P. 795-803.
- [5] Sharikov A. Yu., Stepanov V. I., Ivanov V. V. Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes // News of universities. Applied chemistry and biotechnology. – 2019. – Vol. 9. – No. 3 (30). – P. 447-460.
- [6] Frolov D. I., Kurochkin A. A., Potapov M. A. Influence of thermal vacuum extrusion on the physical and physicochemical properties of the resulting product // News of the Samara State Agricultural Academy. – 2024. – No. 4. – P. 37-46.
- [7] Xie F., Halley P. J., Avérous L. Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials // Progress in Polymer Science. – 2012. – Т. 37. – No. 4. – pp. 595-623.
- [8] Xie F. et al. Starch Gelatinization under Shearless and Shear Conditions //International Journal of Food Engineering. – 2006. – Т. 2. – No. 5.
- [9] Montemurro M. et al. Plant-based alternatives to yogurt: State-of-the-art and perspectives of new biotechnological challenges //Foods. – 2021. – Т. 10. – No. 2. – P. 316.
- [10] Fallahi P. et al. Effects of steam, moisture, and screw speed on physical properties of DDGS-based extrudates // Cereal Chemistry. – 2013. – Т. 90. – No. 3. – pp. 186-197.

- [9] Montemurro M. et al. Plant-based alternatives to yogurt: State-of-the-art and perspectives of new biotechnological challenges //Foods. – 2021. – Т. 10. – №. 2. – С. 316.
- [10] Fallahi P. et al. Effects of steam, moisture, and screw speed on physical properties of DDGS-based extrudates //Cereal Chemistry. – 2013. – Т. 90. – №. 3. – С. 186-197.
- [11] Ab Ghani M. H. et al. The effects of antioxidants content on mechanical properties and water absorption behaviour of biocomposites prepared by single screw extrusion process //Journal of Polymers. – 2014. – Т. 2014. – №. 1. – С. 243078.

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>Алмакаева Елена Анатольевна магистрант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11</p>	<p>Almakaeva Elena Anatolyevna undergraduate of the department «Food productions» Penza State Technological University</p>