

Интеграция вакуумной камеры в одношнековый экструдер для термовакуумной обработки экструдатов

Фролов Д.И., Моторин В.В.

Аннотация. В статье рассмотрены особенности конструкции и функциональных возможностей модернизированного одношнекового экструдера ЭК-40, оснащённого вакуумной камерой на выходе фильеры. Целью работы стало описание модификации оборудования и демонстрация её эффективности для управления структурой зерновых экструдатов. В рамках исследования использованы методы инженерного проектирования, экспериментальной переработки пшеничного крахмала и визуального анализа получаемой продукции. Установлено, что внедрение вакуумной камеры позволяет стабильно получать расширенные экструдаты с коэффициентом расширения до 2,9 при давлении 10 кПа и времени экспозиции 1,1–1,2 с. Конструктивные особенности установки обеспечивают точный контроль параметров вакуумной обработки и исключают необходимость в экстремальных температурных режимах. Полученные результаты подтверждают техническую реализуемость термовакуумной экструзии на базе стандартного оборудования и открывают возможности для её промышленного внедрения. Новизна работы заключается в успешной интеграции вакуумной зоны в компактную шнековую систему с сохранением высокой производительности.

Ключевые слова: термовакуумная экструзия, модернизированный экструдер, зерновой экструдат, коэффициент расширения, вакуумная камера.

Для цитирования: Фролов Д.И., Моторин В.В. Интеграция вакуумной камеры в одношнековый экструдер для термовакуумной обработки экструдатов // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 1. С. 91–94.

Integration of a vacuum chamber into a single-screw extruder for thermal vacuum treatment of extrudates

Frolov D.I., Motorin V.V.

Abstract. The article describes the design features and functional capabilities of a modernized single-screw extruder EC-40 equipped with a vacuum chamber at the die outlet. The aim of the study was to detail the equipment modification and demonstrate its effectiveness in controlling the structure of cereal extrudates. The research employed methods of engineering design, experimental processing of wheat starch, and visual analysis of the resulting products. It was established that the integration of a vacuum chamber enables the consistent production of expanded extrudates with an expansion ratio of up to 2.9 at a pressure of 10 kPa and exposure time of 1.1–1.2 s. The design features of the unit ensure precise control over vacuum treatment parameters and eliminate the need for extreme thermal conditions. The results confirm the technical feasibility of thermovacuum extrusion based on standard equipment and open opportunities for its industrial implementation. The novelty of the work lies in the successful integration of a vacuum zone into a compact screw system while maintaining high productivity.

Keywords: thermovacuum extrusion, modernized extruder, cereal extrudate, expansion ratio, vacuum chamber.

For citation: Frolov D.I., Motorin V.V. Integration of a vacuum chamber into a single-screw extruder for thermal vacuum treatment of extrudates. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 1. pp. 91–94. (In Russ.).

Введение

Экструзионные технологии широко применяются в пищевой промышленности для получения функциональных продуктов с заданной пористой структурой – от завтраков и снеков до ингредиентов для диетического питания [1, 2]. Ключевым параметром качества таких изделий является коэффициент расширения, который напрямую влияет на текстуру, хрусткость и усвояемость [3]. Традиционно расширение достигается за счёт резкого перепада давления при выходе расплава из фильеры в атмосферу. Однако этот подход требует точной настройки температуры и влажности, что ограничивает гибкость технологического процесса [4].

Альтернативным решением является внедрение термовакуумного эффекта на стадии формирования экструдата [5]. Снижение давления в зоне выхода продукта способствует интенсивному испарению влаги и формированию однородной пористой структуры при более мягких температурных условиях. При этом реализация данного метода требует конструктивной модернизации стандартного оборудования [6].

На сегодняшний день недостаточно исследований, посвящённых практическим аспектам интеграции вакуумных систем в промышленные экструдеры, особенно в условиях ограниченного бюджета и компактного пространства. Существующие установки зачастую громоздки, дорогостоящи или требуют полной замены технологической линии [7]. В связи с этим актуальной задачей становится разработка и апробация модернизированных решений на базе серийного оборудования.

Целью данной работы стало описание конструкции и функциональных возможностей модернизированного одношнекового экструдера ЭК-40 с интегрированной вакуумной камерой, а также демонстрация его эффективности на примере получения расширенного зернового экструдата.

Объекты и методы исследования

В качестве базовой платформы использован серийный одношнековый экструдер ЭК-40 с производительностью 40 кг/ч. В ходе модернизации на выходе фильеры была установлена герметичная вакуумная камера цилиндрической формы (диаметр 300 мм, длина 400 мм) из нержавеющей стали (рис. 1).

Камера оснащена:

- регулируемым вакуумным клапаном (диапазон давления 5–50 кПа, точность $\pm 0,5$ кПа);
- пневматическим затвором для контроля времени экспозиции (0,5–10 с);
- системой быстрого подключения к вакуумному насосу (производительность 200 м³/ч).

Объектом исследования служил пшеничный крахмал с начальной влажностью 17 %. Экструзию

проводили при температуре в зоне фильеры 105 °С и частоте вращения шнека 120 об/мин.

Результаты и их обсуждение

Испытания модернизированной установки показали стабильную работу в диапазоне давлений 10–50 кПа. При давлении 10 кПа и времени экспозиции 1,1 с удалось получить однородный расширенный экструдат с гладкой поверхностью и равномерной пористостью (рис. 1, правая часть). Визуально продукт имел характерную «бочкообразную» форму, типичную для процессов интенсивного вспенивания.

Коэффициент расширения в данном режиме составил $2,85 \pm 0,08$. При увеличении времени экспозиции до 4–5 с КР достигал насыщения (~2,9), а дальнейшее увеличение времени не оказывало значимого влияния. При повышении давления до 30 и 50 кПа КР снижался до 1,18 и 0,34 соответственно, что подтверждает критическую роль уровня вакуума в формировании пористой структуры.

Важно отметить, что при использовании вакуумной камеры удалось избежать перегрева продукта: температура на выходе не превышала 65 °С, что сохраняет термолабильные компоненты сырья и снижает энергозатраты по сравнению с классическими режимами экструзии.

Конструктивное решение позволило интегрировать вакуумную зону без изменения габаритов базового экструдера и без снижения производительности. Установка демонстрирует высокую стабильность работы даже при длительных циклах (более 8 часов подряд).

Полученные результаты подтверждают, что модернизированный экструдер ЭК-40 является эффективным инструментом для реализации термовакуумной экструзии. В отличие от дорогостоящих специализированных линий [8], предложенная модификация может быть воспроизведена на большинстве существующих одношнековых установок.



Рис. 1. Модернизированный одношнековый экструдер ЭК-40 с вакуумной камерой

Снижение давления до 10 кПа обеспечивает достаточный перепад между давлением насыщенного пара воды в экструдате (~120 кПа при 105 °С) и внешней средой, что инициирует мгновенное испарение влаги и расширение структуры. Однако при давлениях ниже 8 кПа наблюдается эффект насыщения, обусловленный механическими ограничениями крахмального каркаса, что согласуется с данными, представленными в [9].

Короткое оптимальное время экспозиции (1,1 с) делает процесс совместимым с высокоскоростными производственными линиями и не требует значительного увеличения такта выпуска.

Таким образом, разработанная конструкция сочетает в себе простоту, надёжность и высокую технологическую эффективность.

Литература

- [1] 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.
- [2] Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // Critical reviews in food science and nutrition. – 2019. – Т. 59. – №. 18. – С. 2979-2998.
- [3] Arhaliass A. et al. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking // Food and Bioprocess Technology. – 2009. – Т. 2. – №. 2. – С. 186-193.
- [4] Rokey G.J., Plattner B., Souza E.M. Feed extrusion process description // Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Vol. 39. P. 510–518.
- [5] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Zimnyakov V.M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640. No. 7. P. 072018.
- [6] Фролов, Д. И. Влияние термовакуумной экструзии на физические и физико-химические свойства получаемого продукта / Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, М. А. Потапов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 4. – С. 37-46.
- [7] Kristiawan M., Della Valle G. Transport phenomena and material changes during extrusion // Extrusion Cooking. Woodhead Publishing, 2020. P. 179–204.
- [8] 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.

Выводы

Модернизированный одношнековый экструдер ЭК-40 с вакуумной камерой доказал свою работоспособность в условиях лабораторных и пилотных испытаний. Установка позволяет получать расширенные зерновые экструдаты с коэффициентом расширения до 2,9 при мягких температурных режимах и минимальных энергозатратах.

Практическая значимость работы заключается в возможности ретрофитинга существующего оборудования без полной замены технологической линии, что особенно актуально для малых и средних предприятий.

В дальнейшем планируется адаптация данной конструкции для переработки композитных смесей (крахмал + белок + клетчатка) и исследование влияния вакуумной обработки на функциональные свойства получаемых продуктов.

References

- [1] Bakhchevnikov O. N., Braginets S. V. Extrusion of plant-based raw materials for food products (review) // Food Production Engineering and Technology. - 2020. - Vol. 50. - No. 4. - Pp. 690-706.
- [2] Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review // Critical reviews in food science and nutrition. - 2019. - Vol. 59. - No. 18. - Pp. 2979-2998.
- [3] Arhaliass A. et al. The effect of wheat and maize flours properties on the expansion mechanism during extrusion cooking // Food and Bioprocess Technology. - 2009. - Vol. 2. - No. 2. - Pp. 186-193.
- [4] Rokey G.J., Plattner B., Souza E.M. Feed extrusion process description // Revista Brasileira de Zootecnia. 2010. Vol. 39. P. 510–518.
- [5] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Zimnyakov V.M. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 640. No. 7. P. 072018.
- [6] Frolov, D.I. Effect of thermal vacuum extrusion on the physical and physicochemical properties of the resulting product / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin, M.A. Potapov // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. – 2024. – No. 4. – P. 37–46.
- [7] Kristiawan M., Della Valle G. Transport phenomena and material changes during extrusion // Extrusion Cooking. Woodhead Publishing, 2020. Pp. 179–204.
- [8] 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.
- [9] Kurochkin, A. A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber /

[9] 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.

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.

Сведения об авторах

Information about the authors

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
Моторин Владимир Владимирович студент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 E-mail:	Motorin Vladimir Vladimirovich student of the department «Food productions» Penza State Technological University E-mail: