УДК 664.696

Прогнозирование свойств функциональных экструдированных пищевых систем на основе цифровой модели термовакуумного экструдера

Шканов Д.М., Фролов Д.И.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения концептуальной цифровой модели термовакуумного экструдера для оценки и прогнозирования функционально-технологических свойств влагосодержащих экструдированных пищевых систем. Методы включают критический анализ данных о термовакуумной экструзии, цифровых двойниках оборудования и гибридных подходах к моделированию структурообразования. Установлено, что существующие эмпирические регрессионные модели обладают ограниченной прогностической способностью за пределами исследованных диапазонов. Показано, что цифровая модель должна объединять физическое моделирование гидродинамики и теплообмена в вакуумной камере с гибридной архитектурой «процесс – состояние – качество», где промежуточными переменными выступают удельная механическая энергия, давление на матрице и температура расплава. Обоснована необходимость перехода от локальных регрессионных зависимостей к цифровым двойникам, прогнозирующим расширение, плотность и прочность экструдата. Новизна работы заключается в систематизации требований к цифровой модели термовакуумного экструдера как инструменту прогнозирования функциональных свойств пищевых систем.

Ключевые слова: термовакуумная экструзия, цифровая модель, прогнозирование, функциональные свойства, экструдат, вакуумная камера.

Для цитирования: Шканов Д.М., Фролов Д.И. Прогнозирование свойств функциональных экструдированных пищевых систем на основе цифровой модели термовакуумного экструдера // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 4. С. 89–93.

Predicting the properties of functional extruded food systems based on a digital model of a thermo-vacuum extruder

Shkanov D.M., Frolov D.I.

Abstract. This article examines the development of a conceptual digital model of a thermal vacuum extruder for assessing and predicting the functional and technological properties of moisture-containing extruded food systems. The methods include a critical analysis of thermal vacuum extrusion data, digital equipment twins, and hybrid approaches to modeling structure formation. It is established that existing empirical regression models have limited predictive ability outside the studied ranges. It is demonstrated that the digital model should combine physical modeling of hydrodynamics and heat transfer in a vacuum chamber with a hybrid «process-state-quality» architecture, where the intermediate variables are specific mechanical energy, die pressure, and melt temperature. The need for a transition from local regression dependencies to digital twins predicting the expansion, density, and strength of the extrudate is substantiated. The novelty of this work lies in its systematization of the requirements for a digital model of a thermal vacuum extruder as a tool for predicting the functional properties of food systems.

Keywords: thermo-vacuum extrusion, digital model, prediction, functional properties, extrudate, vacuum chamber.

For citation: Shkanov D.M., Frolov D.I. Predicting the properties of functional extruded food systems based on a digital model of a thermo-vacuum extruder. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 4. pp. 89–93. (In Russ.).

Введение

Термовакуумная экструзия представляет собой направление экструзионной обработки пищевого сырья, при котором экструдат выходит из матрицы не в атмосферу, а в камеру пониженного давления [1]. Такое техническое решение позволяет обрабатывать сырьё повышенной влажности без характерного для традиционной «сухой» экструзии перегрева, а также интенсифицировать удаление влаги за счёт вскипания жидкости при пониженном давлении. Практическая ценность технологии подтверждается данными о том, что создание вакуума в зоне выхода экструдата из матрицы существенно повышает скорость сушки и индекс расширения продукта [2].

Вместе с тем управление свойствами экструдата в термовакуумной экструзии остаётся преимущественно эмпирическим. Опубликованные математические модели описывают отдельные зависимости, например влияние влажности сырья и времени выдержки в вакуумной камере на температуру экструдата, с высоким коэффициентом объяснённой дисперсии в пределах исследованных диапазонов [2]. Однако такие модели не позволяют прогнозировать функциональные свойства продукта – расширение, плотность, пористость, прочность – при изменении конструкции экструдера или переходе к иному сырью. Иными словами, накопленные знания описывают поведение системы, но не объясняют его через механизмы, что ограничивает возможность целенаправленного проектирования функциональных пищевых систем.

Разрыв между эмпирическими зависимостями и потребностью в прогнозировании может быть преодолён средствами цифрового моделирования. Современные исследования экструзии всё чаще рассматривают цифровой двойник как инструмент, связывающий рецептуру, режимные параметры и свойства готового продукта [3]. Для термовакуумной экструзии такая постановка задачи осложняется наличием вакуумной камеры, в которой одновременно протекают процессы интенсивного испарения, охлаждения и структурообразования, а также работой системы удаления пара, включающей эжектор и вакуумный насос [4]. Соответственно, цифровая модель должна учитывать не только течение и теплообмен в экструдере, но и газодинамику вакуумной подсистемы.

Цель работы – определить концептуальные требования к цифровой модели термовакуумного экструдера, ориентированной на прогнозирование функциональных свойств экструдированных пищевых систем, и обосновать её архитектуру на основе анализа опубликованных данных [5]. Для достижения цели решаются задачи: критически оценить существующие подходы к моделированию термовакуумной экструзии; выделить ограничения эмпирических моделей; предложить гибридную структуру цифровой модели, связывающую параметры оборудования с промежуточными состояниями материала и целевыми свойствами продукта.

Объекты и методы исследования

Работа носит обзорно-аналитический характер и не содержит оригинальных экспериментальных данных. Методологическую основу составляет критический анализ рецензируемых публикаций по трём направлениям: математическому описанию термовакуумной экструзии пищевого сырья, компьютерному моделированию вакуумных камер и эжекторных систем экструдеров, а также разработкам в области цифровых двойников экструзионного оборудования.

Отбор источников осуществлялся по принципу наличия количественных данных о связи параметров процесса (влажность, давление, время, температура) со свойствами экструдата либо описания архитектуры моделей, применимых к экструзии. Приоритет отдавался работам, в которых рассматривается именно термовакуумная обработка, а не экструзия в атмосферных условиях [6]. Кроме того, привлекались публикации по гибридным моделям экструзии, поскольку они задают методическую рамку для построения цифровой модели.

Методологическое ограничение обзора состоит в том, что круг работ, непосредственно посвящённых цифровым двойникам термовакуумных экструдеров, крайне узок. Поэтому предлагаемая концепция формулируется как синтез данных о физике процесса и общих принципов цифрового моделирования экструзии, а не как верифицированная модель конкретной установки. Это ограничение определяет характер выводов: они касаются требований к модели и её структуры, а не численных значений прогнозируемых свойств.

Результаты и их обсуждение

Анализ опубликованных данных показывает, что наиболее разработанным элементом математического описания термовакуумной экструзии является регрессионная связь температуры экструдата с режимными параметрами. В частности, для смеси зерна пшеницы и семян расторопши получены уравнения, описывающие температуру на выходе из вакуумной камеры в зависимости от влажности сырья и времени экструзии, а также от давления в камере и времени [5]. Модели объясняют значительную долю дисперсии отклика, однако их прогностическая ценность ограничена областью варьирования факторов: экстраполяция за пределы исследованных диапазонов влажности (14–36%) и времени (8–32 с) не обоснована.

Компьютерное моделирование вакуумной камеры экструдера выполнено в работах, использующих осреднённые уравнения Навье–Стокса с добавлением напряжений Рейнольдса и законы сохранения массы, импульса и энергии [7]. Расчёты

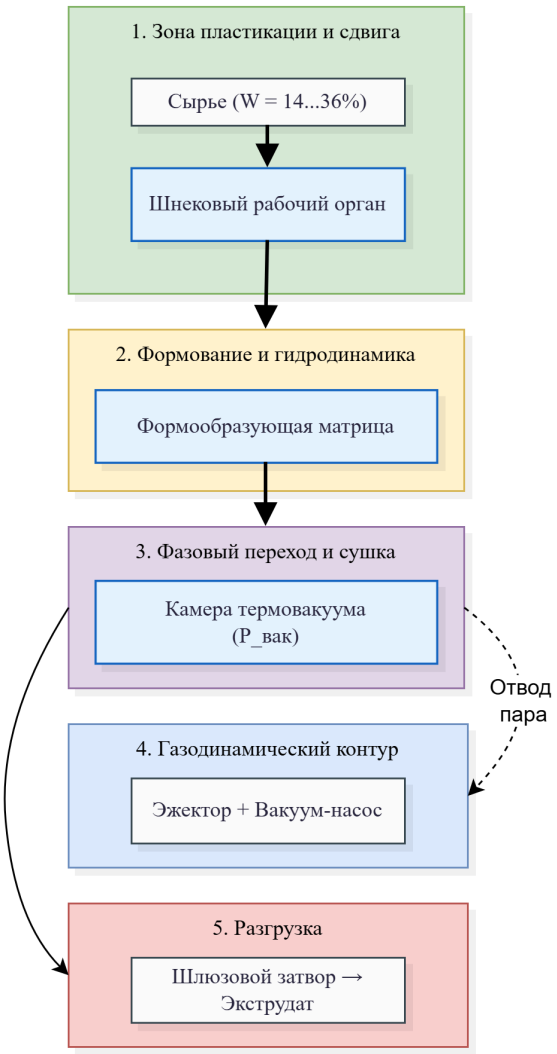


Рис. 1. Структурно-функциональная схема термовакуумного экструдера с выделением сопряжённых подсистем и контрольных точек сбора данных (что моделируем с точки зрения физики и оборудования)

в SolidWorks Flow Simulation подтвердили, что вакуум в зоне выхода создаёт параметры среды, значительно увеличивающие скорость сушки и индекс расширения экструдата [8]. Этот результат важен принципиально: он указывает на то, что свойства продукта определяются не только температурой, но и гидродинамической обстановкой в камере. Однако моделирование ограничено упрощённой геометрией и не связано с прогнозированием структурных характеристик экструдата.

Отдельный блок данных касается газодинамики эжекторной подсистемы. Показано, что для удаления образующегося пара достаточно вакуумного насоса производительностью 4 м³/ч, а установка эжектора после насоса позволяет отводить пар из камеры предварительного обезвоживания, повышая энергоэффективность установки. Для цифровой модели это означает, что вакуумная подсистема должна рассматриваться как самостоятельный объект моделирования, влияющий на давление в камере, а следовательно, и на интенсивность испарения.

Сопоставление этих результатов с подходами, развиваемыми для экструзии в целом, выявляет разрыв. Современные работы по цифровым двойникам экструзии предлагают гибридные архитектуры, в которых контролируемые входы связываются с промежуточными переменными состояния (удельная механическая энергия, давление на матрице, температура расплава), а те, в свою очередь, – с измеримыми атрибутами качества (расширение, плотность, твёрдость). Для термовакуумной экструзии подобная трёхуровневая схема пока не реализована: существующие модели останавливаются на первом уровне (вход → температура) и не переходят к уровню свойств продукта.

Таким образом, основной результат анализа состоит в идентификации структурного пробела: накопленные данные описывают отдельные звенья процесса, но не связывают их в прогностическую цепь, необходимую для управления функциональными свойствами. Цифровая модель термовакуумного экструдера должна заполнить этот пробел, объединив физику вакуумной камеры с гибридной схемой «процесс – состояние – качество».

Полученный вывод согласуется с общей тенденцией в моделировании пищевых процессов, где переход от эмпирических регрессий к цифровым двойникам рассматривается как условие перехода от оптимизации к проектированию. Для термовакуумной экструзии этот переход имеет специфические основания. Вакуумная камера вносит в процесс фактор, который отсутствует в традиционной экструзии, – резкое снижение давления на выходе, вызывающее вскипание влаги и интенсивное охлаждение материала. В результате температура экструдата может снижаться при увеличении времени выдержки, что противоречит интуитивным ожиданиям, основанным на опыте атмосферной экструзии. Эмпирическая модель фиксирует этот эффект, но не объясняет его через баланс теплоты испарения и подвода энергии; цифровая модель, включающая уравнение энергии и модель испарения, способна воспроизвести его как следствие физических механизмов.

Второе обстоятельство связано с конструктивной неоднородностью термовакуумных экструдеров. Помимо камеры предварительного и заключительного воздействия, установка включает шлюзовые затворы, эжектор, вакуумный насос и систему рециркуляции воздуха. Изменение любого из этих элементов влияет на давление в камере и, следовательно, на свойства продукта. Регрессионная модель, построенная для одной конфигурации, не переносится на другую без переобучения. Цифровая модель, содержащая явное описание газодинамики подсистемы, обладает потенциальной переносимостью: при изменении конструкции меняются геометрические и режимные параметры модели, но не её структура.

Третье обстоятельство касается свойств продукта. Функциональные экструдированные пищевые системы характеризуются не только температу-

УРОВЕНЬ 1. Входные параметры процесса	Рецептура: влажность W (14–36%), состав смеси
	Режим экструдера: частота шнека n, профиль T_цил
	Вакуумная подсистема: давление P_вак, подача эжектора Q_эж
УРОВЕНЬ 2. Переменные состояния расплава и среды	CFD-базис: Навье–Стокса для расплава + баланс пара в камере
	Энергия: удельная механическая энергия (SME, кДж/кг)
	Термогидродинамика: давление на матрице P_die, температура T_melt
	Движущая сила вскипания: перепад давления ΔP = P_die − P_вак
УРОВЕНЬ 3. Целевые функциональные свойства	Макроструктура: радиальное расширение (SEI), насыпная плотность
	Микроструктура: средний диаметр пор, общая пористость
	Механика и гидратация: прочность/твердость, индексы WAI и WSI

Рис. 2. Архитектурная схема трехуровневой цифровой модели «Процесс – Состояние – Качество» (Digital Twin Architecture), отражающая связь между входными параметрами, физическими CFD/термодинамическими блоками и целевыми характеристиками готового экструдата

рой или влажностью, но и комплексом структурных характеристик – пористостью, размером пор, прочностью стенок, растворимостью. Для их прогнозирования необходима связь между параметрами состояния материала в момент выхода из матрицы и последующей эволюцией структуры в вакуумной камере. Такая связь может быть построена на основе представлений о вскипании и росте пузырей, однако для этого требуется информация о реологических свойствах расплава, которая в опубликованных работах по термовакуумной экструзии практически отсутствует. Это указывает на необходимость целенаправленных реологических исследований в условиях, соответствующих вакуумной камере.

С практической точки зрения предлагаемая архитектура цифровой модели открывает возможность сокращения экспериментальных циклов настройки оборудования. Вместо перебора режимов на реальной установке модель позволяет отсеивать заведомо непригодные комбинации параметров и целенаправленно выбирать области для экспериментальной проверки. Подобный подход уже реализуется в промышленных цифровых платформах для экструзии, хотя и без учёта вакуумной специфики. Для термовакуумного оборудования такая платформа могла бы стать инструментом как проектирования новых продуктов, так и диагностики отклонений в работе установки.

Ограничением настоящего обзора является отсутствие собственных экспериментальных данных, которые позволили бы верифицировать предлагаемую структуру модели. Кроме того, опубликованные работы по термовакуумной экструзии выполнены преимущественно на ограниченном наборе сырья, что не позволяет оценить универсальность выявленных зависимостей. Дальнейшие исследования должны включать: реологические измерения экструдатов в условиях вакуумного воздействия; экспериментальное определение полей температуры и давления в вакуумной камере; построение и валидацию численной модели, связывающей режимные параметры с характеристиками пористой структуры.

Выводы

Проведённый анализ показал, что существующие математические модели термовакуумной экструзии описывают преимущественно температуру экструдата как функцию режимных параметров и не выходят на уровень прогнозирования функциональных свойств продукта. Цифровая модель, способная решить эту задачу, должна объединять три компонента: физическое описание гидродинамики и теплообмена в вакуумной камере с учётом испарения; модель газодинамики вакуумной подсистемы, включающей эжектор и насос; гибридную схему «процесс – состояние – качество», в которой промежуточными переменными выступают удельная механическая энергия, давление и температура расплава, а целевыми откликами – расширение, плотность и прочность экструдата.

Практическая значимость такого подхода состоит в возможности переноса модели между конфигурациями оборудования без полного переобучения, а также в сокращении объёма экспериментальных испытаний при разработке новых функциональных продуктов. Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальным определением реологических свойств экструдатов в вакуумных условиях, верификацией численной модели по полям температуры и давления и последующим включением в модель подсистемы управления для реализации режима прогнозирующего управления качеством.

Литература

[1] Курочкин А. А., Новикова О. А., Юрьев В. Ю. Термовакуумная экструзия как представитель нового технологического уклада в пищевых системах //Инновационная техника и технология. – 2024. – Т. 11. – №. 1. – С. 38-45.

[2] 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.

[3] Аббасова Т. С. Развитие виртуальных инструментов для создания цифровых двойников // Информационно-технологический вестник. – 2019. – №. 2 (20). – С. 79.

[4] Frolov D. I., Kurochkin A. A. Aerodynamic study of an ejector in a modernized device for thermal vacuum extrusion of food products //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 954. – №. 1. – С. 012030.

[5] Курочкин А. А., Соколова Н. Н., Новикова О. А. Рациональные параметры термовакуумной экструзии смеси зерна пшеницы и семян расторопши //Инновационная техника и технология. – 2025. – Т. 12. – №. 3. – С. 50-56.

[6] Курочкин А. А., Аширов Р. Р., Поляков А. В. Структурная модель агрегата для термовакуумной обработки растительного сырья //Инновационная техника и технология. – 2025. – Т. 12. – №. 4. – С. 59-63.

[7] Курочкин А. А., Фролов Д. И., Воронина П. К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – №. 4 (32). – С. 172-177.

[8] Frolov D. I. et al. Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder //Volga Region Farmland. – 2019. – №. 2. – С. 87-94.

References

[1] Kurochkin A. A., Novikova O. A., Yuryev V. Yu. Thermal-vacuum extrusion as a representative of a new technological paradigm in food systems // Innovative Machinery and Technology. – 2024. – Vol. 11. – No. 1. – pp. 38–45.

[2] Frolov D. I., Kurochkin A. A., Potapov M. A. Influence of thermal-vacuum extrusion on the physical and physicochemical properties of the resulting product // Proceedings of the Samara State Agricultural Academy. – 2024. – No. 4. – pp. 37–46.

[3] Abbasova T. S. Development of virtual tools for creating digital twins // Information Technology Bulletin. – 2019. – No. 2 (20). – p. 79.

[4] Frolov D. I., Kurochkin A. A. Aerodynamic study of an ejector in a modernized device for thermal vacuum extrusion of food products // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 954. – No. 1. – 012030.

[5] Kurochkin A. A., Sokolova N. N., Novikova O. A. Rational parameters for the thermal-vacuum extrusion of a mixture of wheat grain and milk thistle seeds // Innovative Machinery and Technology. – 2025. – Vol. 12. – No. 3. – pp. 50–56. 6.

[6] Kurochkin A. A., Ashirov R. R., Polyakov A. V. Structural model of a unit for the thermo-vacuum processing of plant-based raw materials // Innovative Machinery and Technology. – 2025. – Vol. 12. – No. 4. – pp. 59-63.

[7] Kurochkin A. A., Frolov D. I., Voronina P. K. Determination of the main parameters of the vacuum chamber of a modernized extruder // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. – 2015. – No. 4 (32). – pp. 172-177.

[8] Frolov D. I. et al. Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder // Volga Region Farmland. – 2019. – No. 2. – pp. 87-94.

Сведения об авторах

Шканов Данил Матвеевич
аспирант кафедры «Пищевые производства»
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11
Тел.: +7(937) 914-73-00
E-mail: Danila.shkanov@mail.ru

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

Information about the authors

Shkanov Danil Matveevich
upostgraduate student of the department «Food productions»
Penza State Technological University
Phone: +7(937) 914-73-00
E-mail: Danila.shkanov@mail.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